**Universidade de São Paulo
Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”**

**Dinâmica do nitrogênio no ambiente solo-planta em razão do
sistema de adubação**

Silas Maciel de Oliveira

Dissertação apresentada para obtenção do título de
Mestre em Ciências. Área de concentração:
Fitotecnia

**Piracicaba
2014**

Silas Maciel de Oliveira
Engenheiro Agrônomo

**Dinâmica do nitrogênio no ambiente solo-planta em razão do sistema de
adubação**

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Orientador:
Prof. Dr. **JOSÉ LAÉRCIO FAVARIN**

Dissertação apresentada para obtenção do título
de Mestre em Ciências. Área de concentração:
Fitotecnia

Piracicaba
2014

**Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
DIVISÃO DE BIBLIOTECA - ESALQ/USP**

Oliveira, Silas Maciel de
Dinâmica do nitrogênio no ambiente solo-planta em razão do sistema de adubação /
Silas Maciel de Oliveira. -- versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de
2011. -- Piracicaba, 2014.
56 p. : il.

Dissertação (Mestrado) -- Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2014.
Bibliografia.

1. *Zea mays* L. 2. Milho 3. *Avena strigosa* 4. *Avena sativa* 5. Aveia 6. ¹⁵N
7. Sistema de produção em plantio direto 8. Sistemas de adubação nitrogenada
9. Eficiência de uso do N I. Título

CDD 633.14
O48d

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte – O autor"

À Deus sempre presente
Ofereço

A minha família

A minha maior incentivadora, amiga e namorada, Michely

Dedico

AGRADECIMENTOS

Este trabalho é fruto da colaboração de varias pessoas. A todos que contribuíram mencionar seu nome neste documento é apenas uma pequena amostra do reconhecimento por sua colaboração.

Aos meus familiares, pelo apoio em todos os momentos. Mesmo com a distância, vocês sempre se fizeram presente.

Ao programa de Pós Graduação em Fitotecnia, a CAPES e a FAPESP por esta oportunidade.

A palavra orientador deriva da junção de termos que significa “aconselhar o pensamento”. Agradeço ao Professor José Laércio Favarin, pois de todos os ensinamentos, instruir o raciocínio foi sem dúvida o maior, fazendo jus ao nome a ele atribuído. E ao José Laércio Favarin, que ensinou algo que para muitos é impensável e inaplicável, alegria na arte de fazer Ciência.

Aos senhores Evaldo Klein, Edmar Klein (Caiçara) e José Luiz Motta de Almeida, que além de cederem às áreas experimentais e financiar parte desta pesquisa, sempre receberam nossa equipe muito bem em suas propriedades. Seja pela visão empreendedora seja pela competência, vocês são modelos a seguir em nosso agronegócio.

Aos funcionários das Fazendas Esperança e Cerrado Chão Quente, Elizeu, Jeferson, Marco, Adão, João Luís e Carlito pela valorosa ajuda.

Ao grupo ENUSP, companheiros de todas as horas que compartilharam ideias, viagens, trabalho e alegrias durante a realização deste trabalho. Graças ao apoio de vocês essa jornada foi concretizada e também bem humorada.

Ao amigo Txarli-Braun, que foi mais que um simples colaborador neste projeto, sempre pronto a ajudar. Tenho certeza que esta realização também é sua caro amigo.

A cooperativa Agrária na figura do Engenheiro Agrônomo James Dandolin, e a Fundação ABC na figura de Aline Copacheski pelas informações meteorológicas.

A fundação Agrisus, que promove uma filosofia de agricultura sustentável financiando projetos como este. Graças também ao financiamento concedido pela Agrisus, foi possível viabilizar este projeto.

A todos os funcionários do laboratório de isótopos estáveis do CENA/USP e ao professor Paulo Cesar Ocheuze Trivelin, pelos ensinamentos em técnicas isotópicas.

Ao grupo GEA por ter colaborado em diversas ocasiões nesse e em demais trabalhos.

Aos estagiários Rafael e Michel pela ajuda durante a safra.

À Luciane, pela paciência e carinho com que exerceu seu trabalho junto aos alunos de pós-graduação.

Aos colegas da república Paraná pelo seu companheirismo.

Ao professor Roberto Rezende, meu orientador durante a graduação. Suas atitudes estimulou em mim a afeição pela pesquisa e me ensinou a realizar meu trabalho com seriedade.

A todos meus professores de graduação da minha magnífica Universidade Estadual de Maringá- UEM, graças a vocês sou um Engenheiro Agrônomo.

Ao PET-Agronomia/UEM, por ter atribuído a minha formação ensinamentos preciosos sobre cidadania, ética e profissionalismo.

Muito Obrigado!

“Existem apenas dois modos de viver a vida: um é como se nada fosse milagre,
o outro é como se tudo fosse um milagre”

(Albert Einstein)

SUMÁRIO

RESUMO.....	11
ABSTRACT	13
1 INTRODUÇÃO	15
1.1 Objetivo	17
2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA	19
3 MATERIAL E MÉTODOS	23
3.1 Área experimental e tratamentos	23
3.2 Avaliações	26
3.3 Aplicação do fertilizante com ^{15}N , amostragem e análise	26
3.4 Procedimento estatístico	30
4 RESULTADOS	31
4.1 Estado nutricional, acúmulo de N e produtividade do milho	31
4.2 Recuperação de ^{15}N no milho e aveia.....	33
4.3 Recuperação de ^{15}N no solo	35
4.4 Balanço do N e avaliação dos sistemas de adubação	38
5 DISCUSSÃO	41
5.1 Estado nutricional, acúmulo de N e produtividade do milho	41
5.2 Recuperação de ^{15}N no milho e aveia.....	42
5.3 Recuperação de ^{15}N no solo	43
5.4 Balanço do N e avaliação dos sistemas de adubação	45
6 CONCLUSÃO.....	49
REFERÊNCIAS.....	51

RESUMO

Dinâmica do nitrogênio no ambiente solo-planta em razão do sistema de adubação

No cultivo do milho safra, os produtores em sistema de produção em plantio direto (SPD) antecipam a dose da adubação nitrogenada de cobertura, que seria feita nos estádios V3 e V6, na cultura da aveia durante a entressafra ou em pré-semeadura do milho. Não se conhece a eficiência destes sistemas de adubação do milho. Assim, esta pesquisa foi realizada com a finalidade de elucidar a dinâmica do nitrogênio (N) por meio da avaliação do seu aproveitamento nos compartimentos solo, milho e no resíduo da aveia, e determinar a eficiência de uso do fertilizante nitrogenado (EUFN). O experimento foi realizado nos municípios de Guarapuava-PR e Taquarituba-SP, com a aplicação de 180 kg ha⁻¹ e 150 kg ha⁻¹ de N, respectivamente. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso com cinco sistemas de adubação e quatro repetições. Os sistemas de adubação foram: N no perfilhamento da aveia; N na pré-semeadura do milho; N na semeadura do milho; N em cobertura no estádio V3 do milho; e N em duas coberturas, nos estádios V3 e V6 do milho. Em ambos locais não houve diferença na produtividade de grãos, em razão do sistema de adubação, em Guarapuava a produtividade média foi de 14,2 Mg ha⁻¹ de grãos, e em Taquarituba 10,6 Mg ha⁻¹ de grãos. A antecipação do N na aveia reduziu a EUFN em até 41%, com maior dependência do N fornecido pelo solo, e foi o sistema de adubação que mais perdeu ¹⁵N-fertilizante, uma vez que não recuperou 50% do ¹⁵N aplicado. Os sistemas de adubação, em que o ¹⁵N foi aplicado no estádio V3 ou nos estádios V3 e V6 foram mais eficientes, com EUFN de 51% e 55%, nessa ordem. A avaliação da produção de grãos não serve para avaliar a eficiência de sistema de adubação. Os sistemas de adubação antecipado na cultura do milho não são eficientes no uso do N proveniente do fertilizante.

Palavras-chave: *Zea mays* L.; Milho; *Avena strigosa*; *Avena sativa*; Aveia; ¹⁵N; Sistema de produção em plantio direto; Sistemas de adubação nitrogenada; Eficiência de uso do N

ABSTRACT

Nitrogen dynamics in soil-plant environment due to fertilization system

In maize crop, sidedress nitrogen fertilization in V3 or V6 phenological stages was moved to cultivated oat during off season or in pre-sowing by farmers that adopt the no-tillage maize system. However, the efficiency of this fertilization system is unknown. This research was designed to understand nitrogen (N) dynamic by evaluating the recovery in soil, maize plant and oat straw to calculate the N use efficiency (NUE) by maize crop. Maize crop fields experiments were conducted in Guarapuava, Paraná state and Taquarituba, São Paulo state, where fertilization rate was 180 kg ha⁻¹ and 150 kg ha⁻¹ of N respectively. Experimental design was randomized block with four repetitions and five fertilization systems: N in oat tillering; N in pre-sowing corn, N in sowing corn; N sidedress in V3 and N sidedress in V3 and V6. Grain yield, with average 14,2 Mg ha⁻¹ in Guarapuava and 10,6 Mg ha⁻¹ in Taquarituba were not statistically different. N fertilization in oat showed NUE 41% lower due to N soil contribution and high N loss with 50% ¹⁵N unaccounted. Fertilization systems which N-fertilizer was applied sidedress in V3 or V3 and V6 maize stage were more efficient with NUE 51% and 55%, respectively. Grain yield was not able to measure the efficiency of fertilization system. The anticipation of N fertilization in maize crop had low N use efficiency from N derived from fertilizer..

Keywords: *Zea mays* L.; Corn, *Avena strigosa*; *Avena sativa*; oat; ¹⁵N; no-tillage; Nitrogen system Fertilization; Use efficiency of nitrogen fertilization

1 INTRODUÇÃO

No sistema de produção em plantio direto (SPD) o solo permanece úmido por mais tempo, devido à presença de resíduos vegetais na superfície, os quais reduzem o aquecimento do solo e, em consequência, perde-se menos água por evaporação. A umidade e o carbono oxidável dos resíduos favorecem a atividade microbiana. Em consequência altera a dinâmica do nitrogênio (N) e, também, a recuperação do nutriente proveniente do fertilizante. O SPD é o sistema de produção mais utilizado no cultivo do milho no Brasil, o qual está presente em 15% da área agrícola do país (CONAB, 2013).

A recomendação da adubação nitrogenada do milho considera a aplicação de parte da dose de N na semeadura, a fim de suprir a demanda inicial da planta, e o restante em cobertura, com a finalidade de atender a exigência durante o ciclo da planta, e para às reduzir perdas. Os resultados de diversas pesquisas sobre a recuperação do N pelo milho indicam que, em geral, 50% do N do fertilizante são recuperados pela planta.

Produtores de milho em SPD de algumas regiões do Brasil tem antecipado a dose de N do milho. O fertilizante que deveria ser aplicado em cobertura no milho é aplicado na cultura de entressafra, no período de crescimento ou na dessecação em pré-semadura do milho. Geralmente são cultivadas na entressafra gramíneas, como aveia, trigo e milheto.

A antecipação da adubação é justificada pela vantagem operacional, pois reduz o custo da semeadura com a aplicação a lanço do fertilizante, em uma época que as máquinas são pouco usadas. Outra vantagem desta prática é a maior possibilidade de semear o milho no período definido pelo zoneamento agrícola, pois não se perde tempo com paradas para abastecer a semeadora.

Em tese, este sistema de adubação não prejudica a produção de grãos por restrição de N, porque os resíduos da cultura de entressafra, ainda que de gramíneas, degradariam sem dificuldades, pois o fornecimento de nitrogênio abaixa a relação C/N dos resíduos produzidos. E, ainda, a presença de umidade em SPD favorece a ação dos microorganismos decompositores. Entretanto, pesquisas sobre antecipação de N divergem quanto sua eficiência, com base na produtividade (SÁ, 1999; BASSO; CERETA, 2000; AMADO; MIELNICZUK; FERNANDES, 2003; MAI et al., 2003; PÖTTKER; WIETHÖLTER, 2004; SANTOS et al., 2010). Por sua vez há,

também, divergência sobre a eficiência da aplicação de N unicamente no milho, na semeadura e/ou em cobertura (ARGENTA; SILVA, 1999; GOMES et al., 2007; ALMEIDA, 2008).

Ao privilegiar a operacionalização e antecipar a dose de N do milho na cultura de entressafra, aumenta-se o risco da imobilização, em prejuízo da cultura ou da eficiência de aproveitamento do N proveniente do fertilizante. A primeira exposição à imobilização acontece quando o N é aplicado na aveia, e a segunda, depois que o nutriente é mineralizado dos resíduos desta planta. E, ainda, há o risco de perda por outros processos, como a lixiviação, desnitrificação e a volatilização. Esta última perda ocorre no solo, na aveia e, depois, do próprio resíduo.

Não se conhece o suficiente sobre a dinâmica do N, a eficiência no aproveitamento do nutriente proveniente do fertilizante e a provável economia da dose de N, em razão do sistema de adubação. A Figura 1 apresenta o ***“problema a que se refere a presente pesquisa”***.

Figura 1– Apresentação esquemática do problema a que se refere a presente pesquisa

1.1 Objetivo

Esta pesquisa pretende elucidar a dinâmica do nitrogênio nos vários compartimentos do sistema como solo-milho-resíduo de aveia; assim como determinar a eficiência de uso do N proveniente do fertilizante, quando a dose de N do milho for antecipada na cultura da aveia, em relação à que se faz somente no milho, e a provável economia na dose de N.

2 REVISÃO BIBLIOGRAFICA

O aproveitamento do N-fertilizante é requisito para o sucesso de qualquer sistema de produção agrícola. A busca pela eficiência de aproveitamento do N é necessária porque o fertilizante é obtido de combustíveis fósseis não renováveis, e que impacta no custo de produção dos alimentos. Nas culturas de grãos, a recuperação do N-fertilizante aplicado no solo, avaliada pela técnica do isótopo ^{15}N , é em torno de 50% (JAYASUNDARA, et al. 2007, HANCOCK, et al. 2011; HE, et al. 2013).

A quantidade do N fornecido pelo fertilizante que não é perdida ou absorvida pela cultura fica imobilizada em formas orgânicas presentes no solo. Parte do N imobilizado é, posteriormente, mineralizado e absorvido pelas culturas subsequentes (SUGIHARA et al., 2010). Entretanto, o N mineralizado que não for absorvido é submetido, novamente, aos mesmos processos (perda e imobilização). Os processos como volatilização de amônia, lixiviação de nitrato e desnitrificação são os que mais contribuem para a perda do N do sistema, seja do fertilizante ou nativo do solo (GHOLAMHOSEINI et al., 2012; GIROTTTO et al., 2013; SHIPITALO et al., 2013; YANG et al., 2013).

A quantidade de N não recuperada depende das práticas de manejo da lavoura. Diversas pesquisas realizadas nos últimos anos oferecem informações sobre o impacto da prática agrícola, e, também, sobre a dinâmica do N (DINNES et al., 2002; CASSMAN; DOBERMANN; WALTERS, 2002; DAWSON; HUGGINS; JONES, 2008; MARTÍNEZ-MENA et al., 2013). Estes autores destacam alternativas de manejos que aumentam a eficiência do fertilizante nitrogenado na produção de grãos, como o não revolvimento do solo, o cultivo de plantas na entressafra, e a rotação de culturas.

A chance de absorção de N pela cultura aumenta se reduzir a lixiviação de nitrato dos primeiros 0,3 m de profundidade, zona de maior concentração de raízes, onde há também maior a probabilidade de imobilização. A presença de cultura na entressafra diminui a possibilidade de perda de N por lixiviação, e contribui para que o N seja absorvido pela cultura subsequente (HANSEN; DJYRHUUS, 1997; KORSAKOV et al., 2012; HASHEMI et al., 2013). Constantin et al. (2010) determinaram uma contribuição de 10 kg ha^{-1} de N ao milho, devido ao cultivo na entressafra.

A quantidade de N do fertilizante que lixivia varia com o sistema de produção. De acordo com Jayasundara et al. (2007) aumentou em 11,5% a lixiviação de N do fertilizante em lavoura de milho convencional, e em SPD os autores observaram que a recuperação do N proveniente do fertilizante foi 30% superior, devido a redução da lixiviação de nitrato.

Na decomposição dos resíduos orgânicos, os microrganismos incorporam compostos nitrogenados orgânicos e inorgânicos em suas células, processo conhecido como imobilização. A intensidade da imobilização depende da quantidade de N e de resíduo. Entre as formas de N incorporado pelos microrganismos, uma se destaca, o N amoniacal (GEISSELER et al., 2010). Isto pode se tornar um problema, pois os microrganismos competem por N com as plantas, as quais absorvem amônio e nitrato, cuja forma no solo depende do pH dos microrganismos presentes (SUBBARAO et al., 2006).

Para atender a demanda dos microrganismos e evitar que estes imobilizem N do solo, o resíduo vegetal deve conter em torno de 15 g kg^{-1} de N (Silgran; Shepherd 1999). A deposição de resíduos de gramíneas, com teor de N inferior a 15 g kg^{-1} , eleva o tempo para decomposição pelos microrganismos. Nesta condição, aumenta a imobilização do N inorgânico do solo, com sequestro temporário de N proveniente do solo e do fertilizante.

A imobilização do N por microrganismos no SPD representa uma restrição ao uso eficiente do N do fertilizante, para obtenção de alta produtividade de milho, por ser o nutriente mais exportado nos grãos. A produtividade das lavouras de milho aumentou cerca de quatro toneladas por hectare nas últimas décadas em países como Canadá, Argentina e Brasil (OMAFRA, 2009; SAGPYA, 2011; CONAB, 2013b). Há relatos de acréscimos da produtividade e da qualidade dos grãos, em função da dose de N (CIAMPITTI; VYN, 2012; ARNALL et al., 2013; MOHAMMED et al., 2013), em pesquisas de longa duração.

Para atender o potencial produtivo dos atuais híbridos de milho, existe uma alta demanda por N, porém entre os estádios V2 a V8 tem-se o período decisivo para a nutrição da planta. A absorção de nitrato entre V2 e V8 ativa genes em raízes e folhas, a fim de aumentar a formação de cadeias carbônicas, necessárias à assimilação deste nutriente (SAKAKIBARA et al., 2006).

No milho adota-se há tempos o fornecimento de parte do N na semeadura e parte em cobertura, até o estágio V8 (CANTARELLA; RAIJ; CAMARGO, 1997). No

entanto, nos últimos anos, há produtores em SPD que antecipam a dose de N do milho, na cultura de entressafra, em geral aveia, milheto ou outra gramínea.

A aveia recicla uma grande quantidade de N, que associada a alta concentração do nutriente na parte aérea da gramínea facilita a degradação microbiana, em benefício do milho semeado na sequência, como indica a produção de 40% a mais de silagem (HASHEMI et al., 2013).

Nos últimos anos diversos pesquisadores estudaram alguns sistemas de adubação em milho, como: (i) N no perfilhamento da aveia, (ii) N na pré-semeadura do milho, e (iii) N exclusivamente na semeadura do milho. Os resultados destas pesquisas foram agrupados em duas categorias, com base no teor de matéria orgânica do solo (Tabela 1). Na primeira estão os trabalhos com adubação antecipada, em que a produtividade foi igual ou superior à que é feita somente no milho; e na segunda os trabalhos em que a produtividade foi superior com adubação feita somente no milho. Uma interpretação geral destas pesquisas indica que, em solos com teor de MOS entre 33 g kg⁻¹ e 43 g kg⁻¹ a produtividade de grãos não foi prejudicada pela antecipação da dose de N. No entanto, em solos com teor de MOS entre 19 g kg⁻¹ e 33 g kg⁻¹, a antecipação da dose de N do milho na cultura de entressafra prejudicou a produtividade. Neste caso, o aporte de N pela mineralização não foi suficiente para a demanda do milho. Há que se considerar, também, que a distribuição da precipitação pode ter prejudicado a resposta do milho.

Tabela 1 - Produtividade de milho com antecipação do N no perfilhamento da aveia ou em pré-semeadura do milho, comparado à adubação feita em cobertura no milho

Adubação antecipada	MOS a 10 cm g kg ⁻¹	Produtividade média Mg ha ⁻¹
Produtividade igual ou superior à adubação feita no milho		
Ceretta et al. (2002)	33	5,5
Pöttker e Wiethölter (2004)	36	7,8
Cabezas et al. (2005)	43	7,3
Cabezas et al. (2007)	43	7,9
Lange; Cabezas; Trivelin (2008)	33	8,4
Produtividade inferior à adubação feita no milho		
Pauletti; Costa (2000)	25	8,6
Basso et al. (2000)	19	5,5
Amado, et al. (2003)	19	3,9
Cabral et al. (2005)	33	5,6
Santos et al. (2010)	21	3,9

Na literatura, a maior parte das pesquisas sobre esse tema é pautada na produtividade do milho e/ou no teor de N mineral presente no solo. Neste caso, o uso do isótopo ¹⁵N com traçador do N-fertilizante é vantajoso, pois permite separar o N mineral proveniente do fertilizante, daquele oriundo do solo. Esta técnica possibilita responder se a diferença da produtividade é fruto da eficiência da adubação antecipada ou do estoque de N disponível, em solos com alta MOS em SPD.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área experimental e tratamentos

O experimento foi realizado no ano agrícola 2012/2013, na região de Guarapuava/PR a 25° 31.1' de latitude sul, 51° 40.4' de longitude oeste e 1.095 m de altitude, e na região de Taquaritiba/SP a 23° 35,4' de latitude sul, 49° 14,9' de longitude oeste e 646 m de altitude. A área experimental em Guarapuava há 30 anos é cultivada em SPD, e na última safra, antes de instalar o experimento, cultivou soja na primavera-verão e cevada no outono-inverno. A área experimental de Taquaritiba sempre fora pastagem, somente nos últimos três anos cultivou-se soja/milho em sucessão sob SPD. As informações sobre o solo, clima e semeadura da aveia e do milho estão apresentadas nas tabelas 2, 3 e 4.

Tabela 2 – Informações sobre o clima e condições de semeadura nas localidades em que se realizou a pesquisa

Dados	Guarapuava	Taquaritiba
Clima ⁽¹⁾	Cfb	Cfa
Altitude local do experimento (m)	1120	630
Semeadura da aveia	abr/12	mai/12
Cultura de entressafra	aveia branca	aveia preta
Semeadura do milho	set/12	nov/12
População de plantas de aveia por hectare	580.000	650.000
Espaçamento entre linhas de milho (m)	0,70	0,45
Híbrido de milho	AS1555	DKB390HX
População de plantas de milho por hectare	70.900	70.100
Colheita do milho	mar/13	abr/13

⁽¹⁾ Classificação climática, segundo Köppen, (1936)

Tabela 3 – Resultados da análise química do solo a 0,2 m de profundidade, antes da semeadura da aveia em Taquaritiba (T) e Guarapuava (G)

	pH	MOS	P	K	Ca	Mg	Al	H+Al	SB	CTC	V	S-SO ⁴
	CaCl ₂	g dm ⁻³	mg dm ⁻³				mmol _c dm ⁻³				%	mg dm ⁻³
T	5,5	40	19	7,6	42	31	0	34	81	115	70	12
G	5,1	51	29	4	50	23	0	64	77	141	55	15

pH em CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹ (acidez ativa); MOS (matéria orgânica do solo) – dicromato/colorimétrico; P, K Ca e Mg – extração pela resina trocadora de íons; alumínio trocável – titulometria (1 mol L⁻¹); H+Al (acidez potencial) – pH SMP; enxofre (S-SO₄) extração com Ca(H₂PO₄)₂ 0,01 mol L⁻¹.

Tabela 4 – Classe e textura dos solos das áreas experimentais em Taquarituba (T) e Guarapuava (G)

Tabela 1. Classe e textura dos solos das áreas experimentais em Paqueta (1) e Guarapava (2)						
Local	Solo ⁽¹⁾	Argila	Silte	Areia Total	Areia Grossa	Areia Fina
		<0,002 mm	0,002-0,053 mm	-	0,21-2 mm	<0,21 mm
----- g kg ⁻¹ -----						
T	NVe ⁽²⁾	530	270	200	60	140
G	LBe ⁽³⁾	672	228	100	60	40

⁽¹⁾ Classificação conforme Santos et al. (2006); ⁽²⁾ Latossolo Bruno eutrófico; ⁽³⁾ Nitossolo Vermelho eutrófico

A aveia foi dessecada com 960 gramas de ingrediente ativo de glifosate por hectare. No dia da semeadura do milho coletaram-se amostras de resíduos de aveia para determinar a quantidade de palha sobre a qual semeou o milho (Tabela 5). Os tratamentos 3, 4 e 5 estão agrupados de maneira conjunta, pois até a semeadura não haviam recebido N.

Tabela 5 - Quantidade de resíduos de aveia na semeadura do milho, nas duas áreas experimentais

Sistema de adubação de N	Resíduos de aveia - Mg ha ⁻¹	
	Guarapuava	Taquarituba
T1 - N no perfilhamento da aveia	4.600	2.000
T2 - N na pré-semeadura do milho	3.100	1.000
T3, T4 e T5 – N na cultura do milho	3.100	2.000

Em Guarapuava, de abril de 2012 a março de 2013 registrou-se um acúmulo de 2154 mm de chuva, e em Taquarituba acumulou 1683 mm (Figura 2).

Figura 2 - Precipitação pluvial, temperatura média mensal e datas da aplicação de N na safra 2012/2013, nas áreas experimentais em Guarapuava (G) e Taquarituba (T)

O experimento foi instalado em blocos ao acaso, com cinco tratamentos e quatro repetições. Os tratamentos referentes ao sistema de adubação foram identificados, como: T1: N no perfilhamento da aveia; T2: N na pré-semeadura do milho; T3: N na semeadura do milho; T4: N em cobertura no estágio V3 do milho, e T5: N em duas coberturas, nos estádios V3 e V6 no milho. As épocas que o N foi aplicado encontram-se na tabela 6. As parcelas experimentais tinham sete linhas de 10 m de comprimento ou 49 m² em Guarapuava, e 31,5 m² em Taquarituba, em razão do espaçamento (Tabela 2). As avaliações foram realizadas nas três linhas centrais, excluindo 2,5 m das extremidades de cada linha, exceto para a análise de ¹⁵N, em que adotou uma microparcela de 1 m, no centro de cada parcela.

Tabela 6 – Épocas que foram feitas a aplicação de N nos respectivos tratamentos em 2012

Sistema de adubação do N	Guarapuava	Taquarituba
T1: N no perfilhamento da aveia	18/mai	20/mai
T2: N na pré-semeadura do milho	25/ago	30/out
T3: N na semeadura do milho	22/set	14/nov
T4: N no estágio V3 do milho	16/out	04/dez
T5: N nos estádios V3 e V6 do milho	16/out e 1/nov	04/dez e 15/dez

A fonte de N utilizada foi ureia. O fertilizante foi aplicado em sulco paralelo ao da semeadura, e depois recoberto com solo. A dose total de N aplicado em

Guarapuava e Taquarituba foram 180 kg ha^{-1} e 150 kg ha^{-1} , recomendada com base no histórico de produtividade destas áreas.

3.2 Avaliações

Na colheita do milho, coletaram-se amostras de resíduos da aveia a fim de determinar a quantidade de resíduos vegetais remanescente, e a recuperação do ^{15}N do fertilizante nos sistema de adubação com fornecimento de N na aveia.

O estado nutricional do milho foi avaliado em amostras composta de doze folhas por tratamento, sem a nervura central, colhidas no florescimento, que se encontrava abaixo e oposta à espiga superior (CANTARELLA; RAIJ; CAMARGO, 1997). O material colhido foi seco em estufas com circulação de ar a 65°C por 72 horas, seguido da moagem. No material cominuído determinou-se a concentração de N, conforme a metodologia descrita por Sarruge e Haag (1974).

As espigas das plantas de três linhas centrais, excluía as bordaduras, e da microparcela na linha central foram debulhadas, e posteriormente determinou-se a massa de grãos e a umidade. Os resultados da produtividade de grãos foram corrigidos para 130 gramas de água por quilo de semente (13%).

3.3 Aplicação do fertilizante com ^{15}N , amostragem e análise

A aplicação do fertilizante marcado foi idêntica ao descrito anteriormente para o fertilizante comum. A ureia enriquecida com isótopos de ^{15}N (2,53 % de átomos ^{15}N) foi aplicada no centro de cada parcela, de acordo com os tratamentos, em microparcela de $0,7 \text{ m}^2$ em Guarapuava e $0,45 \text{ m}^2$ em Taquarituba.

A colheita da parte aérea do milho nas microparcelsas com ^{15}N foi efetuada na maturidade fisiológica. Do centro da microparcela coletaram-se duas plantas, e outras quatro plantas nas linhas adjacentes às que receberam o fertilizante marcado. Para avaliação da concentração de ^{15}N dividiu-se a planta em grãos e planta (raiz, folha, bainha, colmo, pendão, grãos, sabugo, estilo-estigma e palha da espiga).

Depois de retirada a parte aérea das plantas amostrou-se as raízes. Para tanto, escavou-se uma tricheira de $0,70 \text{ m} \times 0,15 \text{ m}$ em Guarapuava, e $0,45 \text{ m} \times 0,15 \text{ m}$ em Taquarituba nos primeiros $0,2 \text{ m}$ de profundidade, de $0,2 \text{ m}$ a $0,4 \text{ m}$, e de $0,4$

m a 0,6 m. As raízes foram separadas do solo com peneira de 2 mm de malha, e, depois, lavadas para retirar o excesso de solo.

O material coletado dentro das microparcelas foi seco em estufa com circulação de ar a 65 °C por 72 horas, para determinar a matéria seca. Depois, as amostras foram moídas em moinho tipo Wiley, com peneira de 2 mm de malha. No material cominuído determinou-se o teor de N-total e da abundância de ^{15}N (% em átomos) em espectrômetro de massa automatizado modelo ANCA-GLS, da CERCON Co., UK (BARRIER; PROSSER, 1996). As análises foram realizadas no laboratório de isótopos estáveis do Centro de Energia Nuclear na Agricultura (CENA).

O aproveitamento do N do fertilizante e a quantidade de N nas plantas proveniente do solo foram calculados de acordo com os procedimentos descritos a seguir:

- a) Total de N acumulado na planta (NA; kg ha^{-1}), pela equação:

$$NA = \frac{N \times MS}{100} \quad (1)$$

em que: **N** corresponde a concentração de N na planta (%), e **MS** a matéria seca da planta (kg ha^{-1});

- b) N na planta proveniente do fertilizante (NPPF; kg ha^{-1}):

$$NPPF = \frac{P - S_1}{F - S_2} \times NA \quad (2)$$

em que: **F** é a abundância de átomos de ^{15}N no fertilizante, **P** é a abundância de átomos de ^{15}N na planta, **S₁** é a abundância natural de átomos de ^{15}N na planta, **S₂** é a abundância natural de átomos ^{15}N no fertilizante, e **NA** corresponde ao total de N acumulado na planta (kg ha^{-1});

- c) Eficiência de uso do fertilizante nitrogenado (EUFN; %):

O aproveitamento do N do fertilizante foi determinado como segue:

$$EUFN = \frac{NPPF}{QNA} \times 100 \quad (3)$$

em que: **NPPF** corresponde a quantidade de N na planta proveniente do fertilizante (kg ha^{-1}), e **QNA** a quantidade de N marcado aplicado como fertilizante (kg ha^{-1});

d) N nas plantas de milho proveniente do solo (NPPS; kg ha^{-1}):

$$NPPS = NA - NPPF \quad (4)$$

em que: **NA** corresponde ao total de nitrogênio acumulado na planta (kg ha^{-1}); e **NPPF** a quantidade de nitrogênio na planta proveniente do fertilizante (kg ha^{-1}).

e) N total do solo (NTS; kg ha^{-1}):

$$NTS = NS \times MSS \quad (5)$$

em que: **NS** é teor de N nas profundidades do solo (%) e **MSS** massa seca de solo das respectivas profundidades (kg ha^{-1}).

f) N no solo proveniente do fertilizante (NSPF) kg ha^{-1} :

$$NSPF = \frac{ST - S_1}{F - S_2} \times QNA \quad (6)$$

em que: **F** é a abundância de átomos de ^{15}N no fertilizante; **S₁** é a abundância natural de átomos de ^{15}N no solo, **S₂** é a abundância natural de átomos de ^{15}N no fertilizante, **ST** é a abundância de átomos de ^{15}N no solo do tratamento que recebeu fertilizante marcado, e **QNA** corresponde a quantidade de N marcado aplicado como fertilizante (kg ha^{-1});

g) Nitrogênio remanescente do fertilizante no solo (NRFS; %):

$$NRFS = \frac{(NSPF)}{(QNA)} \times 100 \quad (7)$$

em que: **NSPF** corresponde a quantidade de N no solo proveniente do fertilizante (kg ha^{-1}), e **QNA** a quantidade de N marcado aplicado como fertilizante (kg ha^{-1}).

Para o cálculo da quantidade de NRFS e NSPF, depois da colheita do milho, coletaram-se amostras de solo em trincheiras, dentro das microparcelas, nos primeiros 0,2 m de profundidade, de 0,2 a 0,4 m, e de 0,4 a 0,6 m. As amostras foram secas e processadas em moinho de solo para determinação das quantidades de ^{15}N .

h) Total de N do fertilizante recuperado (TNFR; kg ha^{-1})

$$\text{TNFR} = \text{NPPF} + \text{NSPF} \quad (8)$$

em que: **NPPF** é a quantidade de N (kg ha^{-1}) na planta proveniente do fertilizante e **NSPF** corresponde a quantidade de N no solo proveniente do fertilizante (kg ha^{-1}).

i) Nitrogênio do fertilizante não recuperado (NFNR; kg ha^{-1}):

$$\text{NFNR} = \text{QNA} - \text{TNFR} \quad (9)$$

em que: **TNFR** é o total de N do fertilizante recuperado (kg ha^{-1}); **QNA** a quantidade de nitrogênio isotopicamente marcado aplicado como fertilizante (kg ha^{-1}).

O balanço do N foi elaborado por meio da recuperação do N do fertilizante em cada compartimento, mais o N não recuperado em razão do sistema de adubação.

3.4 Procedimento estatístico

Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F e a comparação de médias pelo teste LSD a 5% de probabilidade, por meio do programa “Statistical Analysis System versão Windows 9.2 (SAS Inst., 2008).

4 RESULTADOS

4.1 Estado nutricional, acúmulo de N e produtividade do milho

A concentração de N do milho não foi influenciada pelo sistema de adubação em Guarapuava (Tabela 7). Em Taquarituba, a menor concentração de N foliar no milho ocorreu quando aplicou o N no perfilhamento da aveia. A concentração do nutriente aumentou com o parcelamento em duas épocas (Tabela 7).

Tabela 7 - Estado nutricional do milho em relação à concentração de N, nos dois experimentos, em razão do sistema de adubação ao florescimento pleno

Sistema de adubação de N	Guarapuava	Taquarituba
	N - g kg ⁻¹	N - g kg ⁻¹
T1: N no perfilhamento da aveia	36	32 c
T2: N na pré-semeadura do milho	35	34 bc
T3: N na semeadura do milho	34	34 bc
T4: N no estágio V3 do milho	35	35 ab
T5: N nos estádios V3 e V6 do milho	35	37 a
CV (%) ⁽¹⁾	4,5	3,2
F ⁽²⁾	0,76 ^{ns}	0,0015
Análise conjunta entre locais		Teste F
Local (L)	0,07 ^{ns}	
Sistema de adubação (S)	0,45 ^{ns}	
L x S	0,0002	
Bloco (local)	0,88 ^{ns}	
CV (%)	4,53	

Médias seguidas pela mesma letra nas colunas não diferem entre si; ⁽¹⁾ coeficiente de variação; ⁽²⁾ valor do teste F; ^{ns} não significativo.

O acúmulo de N nos grãos de milho também não diferiu entre os tratamentos (Tabela 8) e foram, em média, iguais a 180 kg ha⁻¹ de N na pesquisa em Guarapuava e 160 kg ha⁻¹ de N em Taquarituba. A quantidade de N na planta (raiz, folha, bainha, colmo, pendão, grãos, sabugo, estilo-estigma e palha da espiga) variou com o sistema de adubação somente em Taquarituba. A antecipação do N do milho no perfilhamento da aveia prejudicou o acúmulo de N na planta em relação ao fornecimento em pré-semeadura, mas não diferiu daquela efetuada na semeadura.

Tabela 8 – Acúmulo de N nos grãos e na planta de milho, em razão do sistema de adubação nitrogenada na colheita do milho

Sistema de adubação N	N acumulado (kg ha ⁻¹)			
	Guarapuava		Taquarituba	
	Grãos	Planta	Grãos	Planta
T1: N no perfilhamento da aveia	173	268	142	231 b
T2: N na pré-semeadura do milho	179	268	168	285 a
T3: N na semeadura do milho	186	280	147	266 ab
T4: N no estágio V3 do milho	193	294	147	281 a
T5: N nos estádios V3 e V6 do milho	189	304	167	300 a
CV (%) ⁽¹⁾	14	10	15	11
F ⁽²⁾	0,92 ^{ns}	0,33 ^{ns}	0,35 ^{ns}	0,0446
Análise conjunta entre locais		Teste F		
	Grãos	Planta		
Local (L)	0,0003	0,26 ^{ns}		
Sistema de adubação (S)	0,45 ^{ns}	0,0166		
L x S	0,53 ^{ns}	0,44 ^{ns}		
Bloco (local)	0,49 ^{ns}	0,78 ^{ns}		
CV(%)	13	10		

⁽¹⁾ coeficiente de variação; ⁽²⁾ valor do teste F; ^{ns} não significativo

A produtividade de grãos e o índice de colheita (IC) não variaram em razão do sistema de adubação nos dois experimentos (Tabela 7). O milho cultivado em Guarapuava produziu, em média, 14,2 Mg ha⁻¹, e em Taquarituba 10,6 Mg ha⁻¹.

Tabela 9 - Produtividade média de grãos e índice de colheita (IC) nos dois experimentos, em razão dos sistemas de adubação

Sistema de adubação de N	Guarapuava		Taquaritiba	
	Mg ha ⁻¹	IC	Mg ha ⁻¹	IC
T1: N no perfilhamento da aveia	13,5	0,50	9,9	0,49
T2: N na pré-semeadura do milho	14,9	0,50	10,7	0,49
T3: N na semeadura do milho	14,4	0,50	10,7	0,50
T4: N no estágio V3 do milho	14,2	0,47	11,2	0,47
T5: N nos estádios V3 e V6 do milho	13,7	0,52	10,3	0,52
Média	14,2	0,49	10,6	0,49
CV (%) ⁽¹⁾	12,47	8,43	17,57	22,85
F ⁽²⁾	0,99 ^{ns}	0,30 ^{ns}	0,96 ^{ns}	0,28 ^{ns}
Análise conjunta entre locais		Teste F		
Local		<0,0001		
Sistema de adubação (S)		0,77		
L x S		0,98		
Bloco (local)		0,86		
CV (%)		14,41		

⁽¹⁾ coeficiente de variação; ⁽²⁾ valor do teste F; ^{ns} não significativo

A quantidade residual de palha de aveia não variou com o sistema de adubação nitrogenada (Tabela 10).

Tabela 10 – Massa seca de resíduos de aveia na superfície do solo após a colheita do milho, em razão dos sistemas de adubação nitrogenada

Sistema de adubação N	Guarapuava	Taquaritiba
	kg ha ⁻¹	
T1: N no perfilhamento da aveia	445	400
T2: N na pré-semeadura do milho	539	673
T3: N na semeadura do milho	642	617
T4: N no estágio V3 do milho	431	591
T5: N nos estádios V3 e V6 do milho	461	817
CV (%) ⁽¹⁾	55,2	57,7
F ⁽²⁾	0,87 ^{ns}	0,87 ^{ns}

⁽¹⁾ coeficiente de variação; ⁽²⁾ valor do teste F; ^{ns} não significativo

4.2 Recuperação de ¹⁵N no milho e aveia

A quantidade de N na planta procedente do fertilizante (NPPF) e a eficiência de uso do N proveniente do fertilizante (EUFN) para grãos e plantas de milho estão

apresentadas na tabela 11. A aplicação de N no perfilhamento da aveia prejudicou em até cinco vezes o NPPF e a EUFN em relação ao fornecimento do nutriente em cobertura no milho (Tabela 11).

Tabela 11 – Nitrogênio na planta proveniente do fertilizante (NPPF) e eficiência de uso do fertilizante nitrogenado (EUFN) para grãos e planta de milho em Guarapuava e Taquarituba na colheita do milho

Sistema de adubação de N	Guarapuava		Taquarituba	
	NPPF (kg ha ⁻¹)	EUFN (%)	NPPF (kg ha ⁻¹)	EUFN (%)
Grãos				
T1: N no perfilhamento da aveia	35 c	20 c	9 d	6 d
T2: N na pré-semeadura do milho	55 ab	31 ab	28 c	19 c
T3: N na semeadura do milho	50 bc	28 bc	26 c	17 c
T4: N no estágio V3 do milho	72 a	40 a	36 b	24 b
T5: N nos estádios V3 e V6 do milho	72 a	40 a	43 a	28 a
CV (%) ⁽¹⁾	27,4	14,3	14,2	14,2
F ⁽²⁾	0,046	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Planta*				
T1: N no perfilhamento da aveia	50 c	28 c	14 c	9 c
T2: N na pré-semeadura do milho	75 b	42 b	49 b	32 b
T3: N na semeadura do milho	70 bc	39 bc	48 b	32 b
T4: N no estágio V3 do milho	102 a	57 a	69 a	46 a
T5: N nos estádios V3 e V6 do milho	108 a	60 a	76 a	50 a
CV (%)	19,7	19,7	13,6	13,7
F	0,0014	0,0014	<0,0001	<0,0001
Análise conjunta entre locais		Teste F		
	Grãos		Planta	
	NPPF	EUFN	NPPF	EUFN
Local (L)	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
Sistema de adubação (S)	<0,0001	<0,0001	<0,0001	<0,0001
L x S	0,74 ^{ns}	0,83 ^{ns}	0,59 ^{ns}	0,74 ^{ns}
Bloco (local)	0,68 ^{ns}	0,62 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,68 ^{ns}
CV(%)	21	20	17	21

Médias seguidas pela mesma letra nas colunas não diferem entre si; ⁽¹⁾ coeficiente de variação; ⁽²⁾ valor do teste F; ^{ns} não significativo; * Planta inclui todas as partes do milho, inclusive grãos

O parcelamento do N em duas coberturas não acresceu a recuperação de ¹⁵N nos grãos em Guarapuava. No entanto, no experimento em Taquarituba a opção por duas aplicações foi mais eficiente em relação a uma cobertura em V3. Quando considerada a planta toda, não constatou diferença para NPPF e EUFN pelo fornecimento de uma ou duas vezes a dose de N em cobertura no milho.

No sistema de adubação em que o N do milho foi antecipado no perfilhamento da aveia, avaliou-se a quantidade de ^{15}N presente no resíduo da aveia. Nos experimentos em Guarapuava e Taquarituba, permaneceram nos resíduos até a colheita do milho 0,36% e 0,4% do ^{15}N aplicado no perfilhamento da aveia.

Para NPPF e EUFN o comportamento dos sistemas de adubação foi semelhante independentemente do local, pois não houve interação significativa entre local e sistema de adubação (LxS) (Tabela 11). O resultado da análise em conjunto demonstra que independentemente do local, da condição climática e do híbrido de milho, o sistema de adubação antecipada de N na aveia foi menos eficiente, em relação aos sistemas com aplicação de N em cobertura no milho.

A maior parte do ^{15}N contido na planta encontra-se nos grãos de milho (Figura 3 e 4). No experimento em Guarapuava, 70 % do N do fertilizante estavam nos grãos, e em Taquarituba constatou 60% do ^{15}N nos grãos de milho.

Figura 3 - Distribuição do ^{15}N em partes da planta, conforme o sistema de adubação no experimento em Guarapuava

Figura 4 - Distribuição do ^{15}N em partes da planta, conforme o sistema de adubação em Taquarituba

4.3 Recuperação de ^{15}N no solo

O N total no solo (NTS) e o residual do N-fertilizante no solo (RFNS) estão apresentados nas tabelas 12 e 13. O N total engloba o N nativo do solo mais aquele proveniente do fertilizante (NSPF).

Tabela 12 – N total do solo (NTS), N no solo proveniente do fertilizante (NSPF) e N residual do fertilizante no solo (RFNS) no experimento de Guarapuava, em razão dos sistemas de adubação na colheita do milho

Sistema de adubação de N							
Solo (m)	T1	T2	T3	T4	T5	CV(%) ⁽¹⁾	F ⁽²⁾
NTS (Mg ha ⁻¹)							
0,0-0,2	4,6	4,2	5,0	5,0	3,3	23	0,13 ^{ns}
0,2-0,4	2,6	2,6	2,9	1,9	2,4	17	0,62 ^{ns}
0,4-0,6	1,7	1,9	2,2	1,6	1,7	34	0,36 ^{ns}
NSPF (kg ha ⁻¹)							
0,0-0,2	40,2	25,9	34,4	33,0	22,2	36	0,16 ^{ns}
0,2-0,4	9,4 ab	5,2 c	7,8 bc	6,8 bc	11,8 a	30	0,0236
0,4-0,6	7,1	7,2	9,3	6,3	6,7	32	0,39 ^{ns}
RFNS (%)							
0,0-0,2	22,4	14,4	19,1	18,2	12,3	36	0,16 ^{ns}
0,2-0,4	5,2 ab	2,9 c	4,3 bc	3,8 bc	6,5 a	30	0,0236
0,4-0,6	4,0	4,0	5,8	3,5	3,7	32	0,39 ^{ns}

⁽¹⁾ coeficiente de variação; ⁽²⁾ valor do teste F; ^{ns} não significativo; médias seguidas pela mesma letra nas linhas não diferem entre si

Tabela 13 - N total do solo (NTS), N do solo proveniente do fertilizante (NSPF) e N no solo residual do fertilizante (RFNS) no experimento em Taquarituba, em razão do sistema de adubação na colheita do milho

Sistema de adubação de N							
Solo (m)	T1	T2	T3	T4	T5	CV(%) ⁽¹⁾	F ⁽²⁾
NTS (Mg ha ⁻¹)							
0,0-0,2	5,1	5,2	4,8	5,0	4,9	14	0,96 ^{ns}
0,2-0,4	2,8	2,6	2,3	2,0	2,6	12	0,17 ^{ns}
0,4-0,6	1,9	2,0	1,8	1,6	1,6	9	0,06 ^{ns}
NSPF (kg ha ⁻¹)							
0,0-0,2	32,8	22,9	35,1	26,7	29,6	13	0,78 ^{ns}
0,2-0,4	9,0 a	7,0 ab	4,8 b	4,9 b	7,2 ab	24	0,0132
0,4-0,6	4,5 a	5,0 a	2,8 b	2,5 b	2,1 b	17	0,0101
RFNS (%)							
0,0-0,2	21,9	15,3	23,4	17,8	19,4	15	0,77 ^{ns}
0,2-0,4	6,0 a	4,7 ab	3,2 b	3,2 b	4,8 ab	24	0,0132
0,4-0,6	3,0 a	3,4 a	1,9 b	1,6 b	1,4 b	17	0,0098

⁽¹⁾ coeficiente de variação; ⁽²⁾ valor do teste F; ^{ns} não significativo; médias seguidas pela mesma letra nas linhas não diferem entre si

A quantidade total de N em todas as profundidades foi igual entre os sistemas de adubação (Tabelas 12 e 13). A maior parte do N total do solo concentra-se nos

primeiros 0,2 m de profundidade, em que verificou 50% e 54% do N em Guarapuava e Taquarituba, nessa ordem.

Nos dois experimentos, a quantidade de NSPF e RFNS não variou com o sistema de adubação nitrogenada, nos primeiros 0,2 m de profundidade (Tabelas 12 e 13). Os valores de NSPF e RFNS diferem entre locais (L). No entanto, em todas as profundidades não houve interação entre local e sistema de adubação (LxS), ou seja, variou a recuperação do N do fertilizante, sem alterar o comportamento do nutriente no solo, nos dois experimentos (Tabela 14).

Tabela 14 - Análise conjunta entre locais para o N do solo proveniente do fertilizante (NSPF) e N no solo residual do fertilizante (RFNS), nas três profundidades amostradas

Profundidade solos (m)	NSPF (kg ha ⁻¹)			RFNS (%)		
	0,0-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6	0,0-0,2	0,2-0,4	0,4-0,6
Local (L)	0,38 ^{ns}	0,0198	<0,0001	0,61 ^{ns}	0,66 ^{ns}	<0,0001
Sistema de adubação (S)	0,24 ^{ns}	0,0016	0,07 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,0014	0,06 ^{ns}
L x S	0,57 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,09 ^{ns}	0,61 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,07 ^{ns}
Bloco (local)	0,16 ^{ns}	0,40 ^{ns}	0,89 ^{ns}	0,15 ^{ns}	0,36 ^{ns}	0,87 ^{ns}
CV(%) ⁽¹⁾	20	27	39	20	27	23

⁽¹⁾ coeficiente de variação; ^{ns} não significativo

A quantidade de N total, NSPF e RFNS referente ao somatório das três profundidades estudadas estão apresentados na tabela 15. Determinou-se, em média, 8,7 Mg ha⁻¹ de N total no experimento em Guarapuava, e 9,2 Mg ha⁻¹ em Taquarituba (Tabela 15). Não houve diferença na recuperação do ¹⁵N aplicado como fertilizante no solo.

Tabela 15 - N total do solo (NTS), N no solo proveniente do fertilizante (NSPF) e N residual do fertilizante no solo (RFNS) no experimento de Guarapuava e Taquarituba na profundidade de 00-0,6m, em razão dos sistemas de adubação na colheita do milho

Sistema de adubação N	Guarapuava			Taquarituba		
	NTS (Mg ha ⁻¹)	NSPF (kg ha ⁻¹)	RFNS (%)	NTS (Mg ha ⁻¹)	NSPF (kg ha ⁻¹)	RFNS (%)
T1: N no perf. da aveia	8,9	57	32	9,8	46	31
T2: N pré-sem. milho	8,7	38	21	9,8	35	23
T3: N na semead. milho	10,0	51	29	8,9	43	29
T4: N em V3 milho	8,4	46	26	8,6	34	23
T5: N em V3 + V6 milho	7,4	41	23	9,1	38	26
CV(%) ⁽¹⁾	22	28	28	11	40	39
F ⁽²⁾	0,33 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,38 ^{ns}	0,76 ^{ns}	0,77 ^{ns}
Análise conjunta entre locais						
			Teste F			
			NSPF	RFNS		
Local (L)			0,06 ^{ns}	0,74 ^{ns}		
Sistema de adubação (S)			0,33 ^{ns}	0,35 ^{ns}		
L x S			0,76 ^{ns}	0,78 ^{ns}		
Bloco(local)			0,21 ^{ns}	0,19 ^{ns}		
CV(%)			17	16		

⁽¹⁾ coeficiente de variação; ⁽²⁾ valor do teste F; ^{ns} não significativo

4.4 Balanço do N e avaliação dos sistemas de adubação

A análise conjunta entre os locais demonstra o mesmo comportamento de recuperação do fertilizante em Guarapuava e Taquarituba (Tabela 16; LxS). O sistema de adubação com aplicação de N na aveia obteve a menor recuperação do N fertilizante.

Tabela 16 – N do fertilizante não recuperado (NFNR) e total de N do fertilizante recuperado (TNFR) no experimento de Guarapuava e Taquarituba em razão dos sistemas de adubação na colheita do milho

Sistemas de adubação	Guarapuava		Taquarituba	
	NFNR ⁽¹⁾ (kg ha ⁻¹)	TNFR ⁽²⁾ (kg ha ⁻¹)	NFNR (kg ha ⁻¹)	TNFR (kg ha ⁻¹)
T1: N no perfilhamento da aveia	72	107 c	90	60 c
T2: N na pré-semeadura do milho	66	113 bc	66	84 bc
T3: N na semeadura do milho	59	121 abc	59	91 ab
T4: N no estágio V3 do milho	25	148 ab	47	103 ab
T5: N nos estád. V3 e V6 do milho	31	149 a	36	114 a
CV(%) ⁽¹⁾		18,0		18,1
F ⁽²⁾		0,0263		0,0059
Análise conjunta entre locais				
	Teste F			
Local (L)	<0,0001			
Sistema de adubação (S)	0,77 ^{ns}			
L x S	0,98 ^{ns}			
Bloco	0,86 ^{ns}			
CV (%)	14,61			

⁽¹⁾ coeficiente de variação; ⁽²⁾ valor do teste F; ^{ns} não significativo

Na figura 5 está apresentada a participação relativa dos compartimentos solo-milho-resíduo de aveia e a porcentagem de N não recuperado. A antecipação do N do milho na aveia inclui o ¹⁵N recuperado do resíduo remanescente da aveia, da amostra feita na colheita do milho. De modo geral, a planta foi o compartimento que mais recuperou o N proveniente do fertilizante. Entretanto, observou aumento do N não recuperado, quando o N foi antecipado no perfilhamento da aveia.

Figura 5 - Porcentagem do fertilizante nos compartimentos planta, solo e não recuperado na colheita dos grãos, em Guarapuava (G) e em Taquarituba (T)

5 DISCUSSÃO

5.1 Estado nutricional, acúmulo de N e produtividade do milho

O estado nutricional do milho não foi prejudicado pelo sistema de adubação. Houve variação na concentração foliar de N nas plantas em Taquarituba (Tabela 7), mas todos os valores determinados estão na faixa adequada, que varia entre 27 e 35 g kg⁻¹ de N (CANTARELLA; RAIJ; CAMARGO, 1997). A maior concentração de N foliar foi obtida com a aplicação do nutriente em cobertura nos estádios V3 e V6. Este resultado é coerente, pois as folhas foram amostradas depois da emissão do estilo-estigma da espiga. Na pesquisa realizada por Crusciol et al. (2013) os autores também não obtiveram diferença para produtividade, quando a concentração foliar de N estava dentro ou acima do nível crítico inferior citado.

O acúmulo de N na planta foi superior com o fornecimento do nutriente no milho e em pré-semeadura, no experimento em Taquarituba (Tabela 8). A antecipação do N no perfilhamento da aveia prejudicou o acúmulo na planta, assim como a concentração foliar. A aplicação do nutriente no milho e na pré-semeadura do mesmo disponibilizaram mais N ao milho, seja do fertilizante ou do N nativo do solo. O N do solo é liberado pelos microorganismos, cuja atividade aumenta com a adição de N, o que explica o acúmulo pelo fornecimento na pré-semeadura. Outros pesquisadores também constataram acúmulo similar de N na planta (JAYASSUNDARA et al., 2007; RIMSKI-KORSAKOV et al., 2012).

A produtividade não variou em razão do sistema de adubação nitrogenada, independentemente do local, o que pode ser atribuído a não alteração do estado nutricional do milho, pois a concentração de N foliar esteve dentro da faixa adequada. Esta afirmação baseia-se no fato de que há, dentro de limites, relação positiva entre o teor foliar e a produção. A produtividade média de grãos em Guarapuava foi 14,2 Mg ha⁻¹ e 10,6 Mg ha⁻¹ em Taquarituba. A análise conjunta entre locais constatou maior produtividade em Guarapuava, devido, principalmente, ao ambiente e, em parte, a diferença entre genótipos. O milho em Guarapuava foi mais produtivo porque consumiu menos fotoassimilados, especialmente pela respiração noturna, pois a região está situada a 1120 m de altitude.

5.2 Recuperação de ^{15}N no milho e aveia

Os menores valores de NPPF e EUFN (Tabela 11), quando o N foi aplicado na aveia, deve-se a perda, como indica o alto valor de N não recuperado (Tabela 16). A semelhança para a concentração foliar de N e a produtividade do milho não pode ser atribuída à eficiência do sistema de adubação antecipada, mas sim à quantidade de MOS presente nos solos, com 51 g dm^{-3} e 40 g dm^{-3} no experimento em Guarapuava e Taquarituba, nessa ordem (Tabela 3). No sistema de adubação com N antecipado na aveia, o nutriente liberado pela mineralização da aveia fertilizada após a dessecação não foi aproveitado pelo milho, porque a liberação aconteceu antes de sua semeadura. Deste modo, o N permaneceu mais tempo no solo, elevando a exposição aos processos de perda para o ambiente.

O desenvolvimento do milho coincidiu com o período em que houve aumento da temperatura média e da precipitação (Figura 2). Estas condições são favoráveis a mineralização da MOS (LIU; ZHANG; WAN, 2009; GUNTIÑAS et al., 2012; FUJITA et al., 2013), que forneceu uma quantidade suficiente de N para a cultura, compensando a baixa EUFN, a qual foi, em média, 30% menor na aplicação de N no perfilhamento da aveia. A adubação antecipada do N na aveia depende muito da mineralização da MOS, e do N contido no resíduo da cultura anterior, o que significa maior risco de prejuízo da produtividade quando a quantidade e/ou a distribuição da precipitação for adversa.

O solo contribuiu com a maior parte do N no milho, em média, com 70% do N total na planta, em Guarapuava, e com 80% em Taquarituba (Figuras 6 e 7). Na literatura, outros autores obtiveram proporção semelhante (DOURADO-NETO et al., 2010; HE et al., 2013). Esta proporção está relacionada à interação entre o teor de MOS e o fornecimento de N via fertilizante. A adição do fertilizante no solo estimula a atividade microbiana, a qual acelera a mineralização da MOS. Assim, aumenta a disponibilidade de N nativo do solo, com influência na quantidade desse nutriente na planta (KUZYAKOV et al., 2000; FONTAINE; MARIOTTI; ABBADIE, 2003). A participação do N do fertilizante na quantidade total de N na planta foi baixa, mas a EUFN do ^{15}N na presente pesquisa foi adequada, quando comparada aos resultados de outras pesquisas em milho (Duete et al., 2008; Hancock et al., 2011; He, et al., 2013).

Figura 6 – Contribuição do NPPF em relação ao N total na planta em Guarapuava. Barras seguidas pela mesma letra não diferem entre si

Figura 7 - Contribuição do NPPF em relação ao N total na planta em Taquarituba. Barras seguidas pela mesma letra não diferem entre si

As maiores EUFN foram conseguidas pelo fornecimento de N no milho, no estágio V3 (T4) e nos estádios V3 e V6 (T5) (Tabela 11). A maior eficiência de uso do N pelo milho nestes tratamentos explica-se: (i) pela sincronia entre a aplicação do nutriente e a demanda da planta, (ii) por menos tempo de exposição do N aos processos de perda, e (iii) porque o sistema radicular havia se desenvolvido, o que não acontecera nos demais sistemas de adubação. A aplicação de N modifica a arquitetura radicular, as quais concentram próximo da fonte de N (CHASSOT et al., 2001; MA et al., 2013).

A EUFN na adubação parcelada de N no estágio V3 ou nos estádios V3 e V6 não variou (Tabela 11). Trata-se de informação importante do ponto de vista logístico, uma vez que agronomicamente pode-se adotar uma ou outra.

5.3 Recuperação de ^{15}N no solo

A quantidade de N total em todas as profundidades foi igual entre os sistemas de adubação. Este resultado está coerente, pois a dose de N aplicada corresponde a, aproximadamente, 3% do N total dos solos, que corresponde a $8,7 \text{ Mg ha}^{-1}$ em Guarapuava e $9,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ de N em Taquarituba (Tabela 15). Assim, a dose aplicada dificilmente provoca, em um ano, mudanças no N total do solo. O alto valor de N total nos primeiros 0,6 m de solo resultou, em parte, do manejo utilizado nas áreas,

ou seja, 30 anos em SPD em Guarapuava e pelos últimos 40 anos com pastagem em Taquarituba.

A quantidade de NSPF presente nos primeiros 0,2 m de solo não variou com o sistema de adubação. A porcentagem de N imobilizada na mesma profundidade foi da ordem de 20%, acima dos 11% determinado por Rimski-Korsakov et al. (2012). A imobilização aumenta com a atividade microbiana, a qual depende da disponibilidade de C oxidável, na forma de matéria orgânica particulada, presente na MOS do solo. Nos dois locais, a condição para a imobilização era favorável, como indicam o manejo das respectivas áreas, descrito no parágrafo acima.

O baixo valor de NPPF presente no milho, proveniente da adubação antecipada no perfilhamento da aveia, sem haver aumento do valor de NSPF, indica que houve perda para o ambiente, registrado como N não recuperado (Tabela 16). Portanto, este sistema de adubação não é recomendável, porque para nutrir a planta ele depende muito mais da mineralização, variável com a umidade do solo e temperatura (GUNTÍÑAS et al., 2012; FUJITA et al., 2013).

A quantidade de N residual do fertilizante na profundidade de 0,2-0,4 m, nos dois experimentos, foram superiores na adubação antecipada na aveia (T1), nos estádios V3 e V6 do milho (T5) e na aplicação em pré-semeadura para Taquarituba (T2) (Tabelas 12 e 13). A maior quantidade de N na referida profundidade pode ser explicada pela elevada precipitação que sucede as aplicações do fertilizante nos tratamentos T1, T2 e T5 (Figura 2).

A lixiviação do N proveniente do fertilizante é um processo de perda inevitável. Na presente pesquisa, as avaliações de NSPF foram efetuadas até 0,6 m, zona ainda explorada pelo sistema radicular do milho (QIN; STAMP; RICHNER, 2006; GAO et al., 2010). Entretanto, a média de NSPF determinada nas profundidades de 0,2-0,4 m e 0,4-0,6 m de cada sistema de adubação variou entre 6,2 kg ha⁻¹ e 9,2 kg ha⁻¹ no experimento de Guarapuava, e entre 3,7 kg ha⁻¹ e 6,8 kg ha⁻¹ em Taquarituba (Tabelas 12 e 13). Estes valores indicam que a lixiviação foi pouco expressiva, em razão de vários fatores, como: (i) textura argilosa do solo, (ii) manutenção do teor de MOS em SPD, e (iii) pela presença da aveia na entressafra, como relatado em várias pesquisas (FRASER et al., 2012; KORSAKOV et al., 2012; HASHEMI et al., 2013). Na presente pesquisa estimou-se a contribuição da aveia na entressafra para minimizar a lixiviação por meio da estimativa feita com base na matéria seca e na relação C/N. A biomassa seca da aveia, na semeadura do milho,

foram 4.000 kg ha^{-1} e 2.000 kg ha^{-1} em Guarapuava e Taquarituba, respectivamente (Tabela 5). Assumindo C/N 30 e 420 g kg^{-1} de carbono na matéria seca, têm-se 14 g kg^{-1} de N. Portanto, a biomassa da aveia continha 56 kg ha^{-1} e 28 kg ha^{-1} de N em Guarapuava e Taquarituba, nessa ordem. Deste modo, quando foi efetuada a aplicação de N sobre a palha da aveia, no sistema de adubação em pré-semeadura, presume-se que aconteceu aumento da imobilização, assumido em razão da disponibilidade de C oxidável do resíduo. Desta forma, seja pela absorção da aveia ou pela imobilização microbiana, minimizou-se a perda por lixiviação.

O residual de N do fertilizante presente nos primeiros 0,2 m representam 70% do RFNS contido até 0,6 m de solo (Tabela 15). A colocação do N em sulco a 0,05 m de profundidade e a maior atividade microbiana nesta região explica o acúmulo de N nos primeiros 0,2 m.

5.4 Balanço do N e avaliação dos sistemas de adubação

No sistema com aplicação antecipada de N na aveia, em virtude da baixa recuperação de ^{15}N na planta esperava-se maior recuperação do solo, o que não aconteceu. Esta observação evidencia a ineficiência da adubação antecipada, principalmente a que faz no perfilhamento da aveia, não se deve a imobilização, uma vez que não aumentou a quantidade de N do solo. Portanto, aconteceram perdas ordem de até 50% de N do fertilizante no sistema.

Na presente pesquisa não será considerada a possibilidade de perda de N por volatilização, uma vez que o fertilizante foi aplicado em sulco e coberto com solo, independente do sistema de adubação. A lixiviação, por sua vez, foi pouco expressiva, como indica a média de 7 kg ha^{-1} de NSPF dos dois experimentos, nas profundidades de 0,2-0,4 m e 0,4-0,6 m, a semelhança do que fora constatada em outras pesquisas (JAYASUNDARA et al., 2007; FRASER et al., 2012). Deste modo, a lixiviação também não explica a elevada quantidade de N não recuperado. Entretanto, a maior exposição do N do fertilizante pode ter contribuído para o aumento da desnitrificação e da perda de NH_3 da parte aérea da aveia e do milho.

Em relação às perdas pela parte aérea da planta, sabe-se que diversos fatores influenciam a intensidade desse processo, como a idade fisiológica da planta, teor de N nos tecidos, temperatura atmosférica, umidade relativa do ar, e até mesmo o uso de herbicidas. Estes fatores ocasionam a perda de N na forma de NH_3 ,

pela superfície foliar, especialmente nos estômatos. Damim et al (2010) relataram uma perda de 10% do N aplicado, 10 dias após a aplicação de herbicida. Perdas desta ordem na presente pesquisa representariam cerca de 20 kg ha⁻¹ de N do fertilizante. Entretanto, as plantas com maior concentração de N nos tecidos perdem até 30% a mais de N pela parte aérea (BOLOGNA et al., 2006). Desta forma, a aplicação de N na aveia associado ao maior período de decomposição dos resíduos desta planta, podem ter potencializado as perdas de NH₃ na parte aérea, excedendo, os 10% registrados por Damim et al (2010).

No sistema de adubação com aplicação de N na aveia, a dessecação por herbicida pode, também, ter prejudicado a recuperação pelo milho do N do fertilizante, presente no resíduo da aveia. O uso de herbicidas na aveia reduziu em 9% a recuperação pelo milho do ¹⁵N presente na palha da aveia (Damim et al. (2012). A recuperação inferior de ¹⁵N pelo milho foi atribuída a redução da mineralização líquida, influenciada pela alteração da composição química dos resíduos da aveia dessecada.

A retenção de maior teor de água no solo em SPD e o aumento da microporosidade nos primeiros 0,1 m aumenta as zonas anaeróbicas, principalmente nos dias chuvosos. Neste ambiente de menor oxigenação, as bactérias anaeróbias transformam o N-NO₃⁻ em N₂, que se perde na atmosfera; assim como de N na forma do gás N₂O. A liberação de N₂ ocorre de maneira rápida, em até 24 horas, em solo com 70% de seu volume preenchido por água (SUBBARAO et al., 2006). Há pesquisa sobre o assunto que relata perda de até 28 kg ha⁻¹ de N por desnitrificação em SPD (VENTEREA; BURGER; SKOPAS, 2005; MKHABELA et al., 2007; GRAGEDA-CABRERA et al., 2011). Na presente pesquisa, a desnitrificação também poder ter ocorrido, principalmente no N aplicado antecipado no perfilhamento da aveia, pois se não foi absorvido pelas plantas, o nutriente permaneceu 11 meses no solo. Este período foi três vezes maior do que nos sistemas de adubação em que se aplicou o nutriente no milho. Desta forma, a desnitrificação do N-fertilizante no solo ocorreu por mais tempo nos sistemas de adubação que antecipam a dose de N do milho, o que explica o alto valor de N não recuperado (Tabela 16).

Estudos realizados em solos com alto teor de MOS, como o da presente pesquisa, podem induzir a conclusões equivocadas em relação à eficiência de fertilização. O uso do método do traçador isotópico possibilitou esclarecer que a não variação da produtividade de grãos não esta relacionada à eficiência da adubação

antecipada, mas sim a disponibilidade de N dos solos. Deste modo, trabalhos que se propõem estudar a dinâmica do N nestas situações devem considerar os teores de MOS, para não incorrer em afirmações errôneas. Na figura 8 estão apresentados, para os dois locais, os valores de ^{15}N na planta, no solo e o não recuperado, evidenciando a dinâmica do N em cada sistema de adubação.

Figura 8 - Balanço do N nos sistemas de adubação avaliados na presente pesquisa. Eficiência de uso do fertilizante nitrogenado (EUFN) e residual do fertilizante nitrogenado no solo (RFNS)

6 CONCLUSÃO

A dinâmica do nitrogênio nos vários compartimentos do sistema solo, milho, e resíduos da aveia está elucidada na forma de esquema.

A avaliação da produção de grãos não é um indicador da eficiência de sistemas de adubação nitrogenada.

A maior permanência do fertilizante nitrogenado no ambiente torna-o mais vulnerável aos processos de perda do sistema.

O sistema de adubação antecipada reduz a eficiência de uso do fertilizante nitrogenado, e aumenta a dependência da cultura do N proveniente do solo.

A adubação efetuada com uma ou duas aplicações no milho propicia uma recuperação maior do N fertilizante, 30% em relação a que é efetuada no perfilhamento da aveia, e 15% da que se faz em pré-semeadura e no sulco de semeadura.

A aplicação parcelada de N nos estádios V3 e V6 do milho pode ser substituída pela única aplicação no estágio V3, sem redução da eficiência de uso do fertilizante.

REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, R.E.M. **Balanço de ^{15}N em sistemas de produção de milho para adoção do plantio direto no Oeste baiano**. 2008. 85p. Dissertação (Mestrado em Ciências. Área de concentração: Fitotecnia) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Piracicaba, 2008.
- AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J.; FERNANDES, S.B.V. Leguminosas e adubação mineral como fontes de nitrogênio para o milho em sistemas de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 179-189, 2000.
- ARGENTA, G.; SILVA, P.R.F. Adubação nitrogenada em milho implantado em semeadura direta após aveia preta. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 29, p.745-754, 1999.
- ARNALL, D.; MALLARINO, A.; RUARK, M.; VARVEL, G.; SOLIE, J.; STONE, M.; MULLOCK, J.; TAYLOR, R.; RAUN, W. Relationship between grain crop yield potential and nitrogen response. **Agronomy Journal**, Madison, v. 105, p. 1335-1344, 2013.
- BARRIER, A.; PROSSER, S.J. Automated analysis of light –element stable isotopes by isotope ratio mass spectrometry. In BOUTON, T.W.; YAMSAHI, S. (Ed.). **Mass spectrometry of soils**. New York: Marcel Dekker, 1996. p. 1-46.
- BASSO, C.J.; CERETTA, C. A Manejo do nitrogênio no milho em sucessão a plantas de coberturas de solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 905-915, 2000.
- CABEZAS, L.W.A.R.; ARRUDA, M.R. de; CANTARELLA, H.; PAULETTI, Volnei; 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**, Viçosa, v. 29, n.2, p. 215-226, 2005.
- CABEZAS, L. W.A.R.; COUTO P.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**, Viçosa. V. 31, p. 739-752, 2007.
- CABRAL, S.M.S.E.; FERREIRA, G.P.S.; DE ASSIS, G.L; Épocas e formas de aplicação de nitrogênio no milho sob plantio direto em solo de cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 725-733, 2005.
- CANTARELLA, H.; VAN RAIJ, B.; CAMARGO, C.E.O. Cereais. In: B. VAN RAIJ; H. CANTARELLA; J.A. QUAGGIO; FURLANI, A.M.C. **Recomendação de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. Bol. Téc. 100. Campinas: IAC, 1997, cap 13, p. 43–71.(Boletim Técnico, 100)

CASSMAN, K.G.; DOBERMANN, A.; WALTERS, D.T. Agroecosystems, nitrogen-use efficiency, and nitrogen management. **AMBIO: A Journal of the Human Environment**, Stockholm, v. 31, p. 132-140, 2002.

CERETTA, C.A.; BASSO, C.J.; DIEKOW J.; AITA C.; PAVINATO P.S.; VIEIRA F.C.B.; VENDRUSCULO E.R.O. Nitrogen fertilizer split-application for corn in no-till succession to black oats. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 59, p. 549-554, 2002.

CHASSOT A.; STAMP P.; RICHNER W. Root distribution and morphology of maize seedlings as affected by tillage and fertilizer placement. **Plant and Soil**, The Hague v. 231, p. 123-135, 2001.

CIAMPITTI, I.A.; VYN, T.J. Physiological perspectives of changes over time in maize yield dependency on nitrogen uptake and associated nitrogen efficiencies: A review. **Field Crops Research**, Amsterdam ,v.133, p. 48-67, 2012.

CONAB, Companhia Nacional de Abastecimento. Séries Históricas. Publicado em jul de 2010. Disponível em : <http://www.conab.gov.br/conabweb/download/safra/MilhoTotalSerieHist.xls> Acesso em 28 ago 2013.

_____, Companhia Nacional de Abastecimento. Acompanhamento da safra brasileira. Publicado em set de 2013. Disponível em: http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/13_10_16_14_32_01_boletim_portugues_-_setembro_2013.pdf. Acesso em 28 out de 2013.

CONSTANTIN, J.; MARY, B.; LAURENT, F.; AUBRION, G.; FONTAINE, A.; KERVEILLANT, P.; BEAUDOIN, N. Effects of catch crops, no till and reduced nitrogen fertilization on nitrogen leaching and balance in three long-term experiments. **Agriculture, ecosystems & environment**, Amsterdam , v.135, p. 268-278, 2010.

CRUSCIOL C.A.C.; NASCENTE A.S.; MATEUS G.P.; BORGHI E.; LELES E.P.; SANTOS N.C.B. Effect of intercropping on yields of corn with different relative maturities and palisadegrass. **Agronomy Journal**, Madison, v. 105, p. 599-606, 2013.

DAWSON, J.C.; HUGGINS, D.R.; JONES, S.S. Characterizing nitrogen use efficiency in natural and agricultural ecosystems to improve the performance of cereal crops in low-input and organic agricultural systems. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.107, p. 89-101, 2008.

DINNES, D.L.; KARLEN, D.L.; JAYNES, D.B.; KASPAR, T.C.; HATFIELD, J.L.; COLVIN, T.S.; CAMBARDELLA, C.A. Nitrogen management strategies to reduce nitrate leaching in tile-drained midwestern soils. **Agronomy Journal**, Madison, v.94, p. 153-171, 2002.

DOURADO-NETO D.; POWLSON D.; ABU BAKAR R.; BACCHI O.O.S.; BASANTA M.V.; CONG P.T.; KEERTHISINGHE G.; ISMAILI M.; RAHMAN S.M.; REICHARDT K.; SAFWAT M.S.A.; SANGAKKARA R.; TIMM L.C.; WANG J.Y.; ZAGAL E.; VAN KESSEL C. Multiseason recoveries of organic and inorganic nitrogen-15 in tropical cropping systems. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v 74, p.139-152, 2010.

FONTAINE S.; MARIOTTI A.; ABBADIE L. The priming effect of organic matter: A question of microbial competition? **Soil Biology & Biochemistry**, Elmsford, v. 35, p. 837-843, 2003.

FRASER, P.M.; CURTIN, D.; HARRISON-KIRK, T.; MEENKEN, E.D.; BEARE, M.H.; TABLEY F.; GILLESPIE, R.N.; FRANCIS, G.S. Winter nitrate leaching under different tillage and winter cover crop management practices. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 77, p. 1391-1401, 2013.

FUJITA Y.; VAN BODEGOM P.M.; VENTERINK H.O.; RUNHAAR H.; WITTE J.-P.M. Towards a proper integration of hydrology in predicting soil nitrogen mineralization rates along natural moisture gradients. **Soil Biology & Biochemistry**, Elmsford, v.58, p. 302-312, 2013.

GAO Y.; DUAN A.; QIU X.; LIU Z.; SUN J.; ZHANG J.; WANG H. Distribution of roots and root length density in a maize/soybean strip intercropping system. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 98, p. 199-212, 2010.

GEISSELER, D.; HORWATH, W.R.; JOERGENSEN, R.G.; LUDWIG, B. Pathways of nitrogen utilization by soil microorganisms—a review. **Soil Biology & Biochemistry**, Elmsford, v. 42, p. 2058-2067, 2010.

GHOLAMHOSEINI, M.; AGHAALIKHANI, M.; MODARRES SANAVY, S.; MIRLATIFI, S. Interactions of irrigation, weed and nitrogen on corn yield, nitrogen use efficiency and nitrate leaching. **Agricultural Water Management**, Amsterdam, v. 126, p. 9-18, 2013.

GIROTTI, E.; CERETTA, C.A.; LOURENZI, C.R.; LORENSINI, F.; TIECHER, T.L.; BEBER VIEIRA, R.C.; TRENTIN, G.; BASSO, C.J.; MIOTTO, A.; BRUNETTO, G. Nutrient transfers by leaching in a no-tillage system through soil treated with repeated pig slurry applications. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 95, p. 115-131, 2013.

GOMES, R.F.; SILVA, A.G.; ASSIS, R.L.; PIRES, F.R. Efeito de doses e da época de aplicação de nitrogênio nos caracteres agrônômicos da cultura do milho sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 931-938, 2007.

GRAGEDA-CABRERA O.A.; VERA-NUNEZ J.A.; AGUILAR-ACUNA J.L.; MACIAS-RODRIGUEZ L.; AGUADO-SANTACRUZ G.A.; PENA-CABRIALES J.J. Fertilizer dynamics in different tillage and crop rotation systems in a vertisol in central Mexico. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 89, p. 125-134, 2011.

- GUNTIÑAS M.E.; LEIROS M.C.; TRASAR-CEPEDA C.; GIL-SOTRES F. Effects of moisture and temperature on net soil nitrogen mineralization: A laboratory study. **European Journal of Soil Biology**, Amsterdam, v. 48, p73-80, 2012
- HANCOCK, J.M.; MCNEILL, A.M.; MCDONALD, G.K.; HOLLOWAY, R.E. Fate of fertiliser n applied to wheat on a coarse textured highly calcareous soil under simulated semi-arid conditions. **Plant and Soil**, The Hague, v. 348, p.139-153, 2011.
- HANSEN, E.M.; DJURHUUS, J. Yield and n uptake as affected by soil tillage and catch crop. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 42, p. 241-252, 1997.
- HASHEMI, M.; FARSAAD, A.; SADEGHPOUR, A.; WEIS, S.A.; HERBERT, S.J. Cover-crop seeding-date influence on fall nitrogen recovery. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, New York, v. 176, p. 69-75, 2013.
- HE, P.; SHA, Z.; YAO, D.; XING, S.; ZHOU, W. Effect of nitrogen management on productivity, nitrogen use efficiency and nitrogen balance for a wheat-maize system. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 36, p. 1258-1274, 2013.
- JAYASUNDARA, S.; WAGNER-RIDDLE, C.; PARKIN, G.; VON BERTOLDI, P.; WARLAND, J.; KAY, B.; VORONEY, P. Minimizing nitrogen losses from a corn-soybean-winter wheat rotation with best management practices. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 79, p. 141-159, 2007.
- KÖPPEN, W. Das geographische system der climate. In: KÖPPEN, W.; GEIGER, R. (Ed.). **Handbuch der klimatologie**. Berlin: Gebrüder Borntraeger, 1936. p.1-44.
- LANGE, A.; CABEZAS, W.; TRIVELIN, P.C.O. Recuperação do nitrogênio das fontes sulfato e nitrato de amônio pelo milho em sistema semeadura direta. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, p. 123-130, 2008.
- LIU W.; ZHANG Z.; WAN S. Predominant role of water in regulating soil and microbial respiration and their responses to climate change in a semiarid grassland. **Global Change Biology**, Oxford, v.15, p. 184-195, 2009.
- MA Q.; ZHANG F.; RENGEL Z.; SHEN J. Localized application of nh_4 (+)-n plus p at the seedling and later growth stages enhances nutrient uptake and maize yield by inducing lateral root proliferation. **Plant and Soil**, The Hague, v. 72, p. 65-80, 2013.
- 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**, Brasília, v.38, p.125-131, 2003.
- MARTÍNEZ-MENA, M.; GARCIA-FRANCO, N.; ALMAGRO, M.; RUIZ-NAVARRO, A.; ALBALADEJO, J.; MELGARES DE AGUILAR, J.; GONZALEZ, D.; IGNACIO QUEREJETA, J. Decreased foliar nitrogen and crop yield in organic rainfed almond trees during transition from reduced tillage to no-tillage in a dryland farming system. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 49, p.149-157, 2013.

MKAHABELA, M.S.; MADANI, A.; GORDON, R.; BURTON, D.; CUDMORE, D.; ELMI, A.; HART, W. Gaseous and leaching nitrogen losses from no-tillage and conventional tillage systems following surface application of cattle manure. **Soil e Tillage research**, Amsterdam, v.98, p. 187-199, 2008.

MOHAMMED, Y.A.; KELLY, J.; CHIM, B.K.; RUTTO, E.; WALDSCHMIDT, K.; MULLOCK, J.; TORRES, G.; DESTA, K.G.; RAUN, W. Nitrogen fertilizer management for improved grain quality and yield in winter wheat in oklahoma. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 36, p. 749-761, 2013.

OMAFRA. Field Crops Statistics. Ontario Ministry of Agriculture, Food, and Rural Affairs. Disponível em: <http://www.omafra.gov.on.ca/english/stats/crops/index.html>. Acesso em: 01 set.2013.

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

QIN R.J.; STAMP P.; RICHNER W. Impact of tillage on maize rooting in a cambisol and luvisol in switzerland. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 85, p.50-61, 2006.

RIMSKI-KORSAKOV, H.; RUBIO, G.; LAVADO, R.S. Fate of the nitrogen from fertilizers in field-grown maize. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 93, p. 253-263, 2012.

SAKAKIBARA, H.; TAKEI, K.; HIROSE, N. Interactions between nitrogen and cytokinin in the regulation of metabolism and development. **Trends in Plant Science**, Oxford, v. 11, p. 440-448, 2006.

SÁ, J.C. de M. Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto. In: SIQUEIRA, J.O.; MOREIRA, F.M.S.; LOPES, A.S.; GUILHERME, L.R.G.; FAQUIM, V.; FURTINI NETO, A.E.; CARVALHO, J.G. (Ed.). **Interrelação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas**, Lavras: Sociedade Brasileira de Ciência do solo, 1999. cap 4, p. 267-319.

SAGPYA. Estimaciones agrícolas. Ministerio de Agricultura, Ganadería, Pesca y Alimentos. Disponível em: <http://www.siaa.gov.ar/index.php/series-por-tema/agricultura>. Acesso em: 01 set.2013.

SANTOS, H.D.; JACOMINE, P.; ANJOS, L.D.; OLIVEIRA, V.D.; OLIVEIRA, J.D.; COELHO, M.; LUMBRERAS, J.; CUNHA, T.D. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 2. ed. Rio de janeiro: Embrapa Solos, 2006. p. 306.

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

SARRUGE, J.R.; HAAG, H.P. **Análises químicas em plantas**. Piracicaba: ESALQ, Departamento de Química, Setor de Nutrição Mineral de Plantas 1974. , p 23-27.

SHIPITALO, M.J.; OWENS, L.B.; BONTA, J.V. ; EDWARDS, W.M. Effect of no-till and extended rotation on nutrient losses in surface runoff. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 77, p.1329-1337, 2013.

SILGRAM M.; SHEPHERD M.A. The effects of cultivation on soil nitrogen mineralization. **Advances in agronomy**, San Diego, v. 65, p. 267-311, 1999.

SUBBARAO, G.V.; ITO O.; SAHRAWAT, K.L.; BERRY, W.L.; NAKAHARA, K.; ISHIKAWA, T.; WATANABE, T.; SUENAGA, K.; RONDON, M.; RAO, I.M. Scope and strategies for regulation of nitrification in agricultural systems-challenges and opportunities. **Critical Reviews in Plant Sciences**, Tennessee, v. 25, p. 303-335, 2006.

SUGIHARA, S.; FUNAKAWA, S.; KILASARA, M.; KOSAKI, T. Dynamics of microbial biomass nitrogen in relation to plant nitrogen uptake during the crop growth period in a dry tropical cropland in tanzania. **Soil Science & Plant Nutrition**, Tokyo, v. 56, p. 105-114, 2010.

PÖTTKER, D.; WIETHÖLTER. S.; Épocas e métodos de aplicação de nitrogênio em milho cultivado no sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.4, p.1015-1020, 2004.

VENTEREA R.T.; BURGER M.; SPOKAS K.A. Nitrogen oxide and methane emissions under varying tillage and fertilizer management. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 34, p.1467-1477, 2005.

YANG, S.; PENG, S.; XU, J.; HOU, H. ; GAO X. Nitrogen loss from paddy field with different water and nitrogen managements in taihu lake region of china. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 44, p. 2393-2407, 2013.