UNIVERSIDADE DE SÃO PAULO CENTRO DE ENERGIA NUCLEAR NA AGRICULTURA

EVANDRO LUIZ SCHONINGER

Absorção foliar de amônia e produtividade do milho em função da época de aplicação de ureia em cobertura

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

Piracicaba

EVANDRO LUIZ SCHONINGER

Absorção foliar de amônia e produtividade do milho em função da época de aplicação de ureia em cobertura

versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011

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

Área de Concentração: Energia Nuclear na Agricultura e no Ambiente

Orientador: Prof. Dr. Paulo Cesar Ocheuze Trivelin

Piracicaba

AUTORIZO A DIVULGAÇÃO TOTAL OU PARCIAL DESTE TRABALHO, POR QUALQUER MEIO CONVENCIONAL OU ELETRÔNICO, PARA FINS DE ESTUDO E PESQUISA, DESDE QUE CITADA A FONTE.

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

Schoninger, Evandro Luiz

Absorção foliar de amônia e produtividade do milho em função da época de aplicação de ureia em cobertura / Evandro Luiz Schoninger; orientador Paulo Cesar Ocheuze Trivelin. - - versão revisada de acordo com a resolução CoPGr 6018 de 2011 - - Piracicaba, 2014.

94 f.: il.

Tese (Doutorado – Programa de Pós-Graduação em Ciências. Área de Concentração: Energia Nuclear na Agricultura e no Ambiente) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura da Universidade de São Paulo.

1. Adubação 2. Cereais 3. Fertilizantes nitrogenados 4. Isótopos estáveis 5. Nitrogênio 6. Produção vegetal I. Título

CDU (631.841 + 621.039.85) : 633.15

Dedico aos meus pais Ademar Osvaldo Schoninger e Esther Beatriz Schaurich Schoninger, meus irmãos Everton Miguel Schoninger e Elizabeth Cristina Schoninger, e à minha companheira Carmelice Boff de Almeida

AGRADECIMENTOS

À minha família, pelos ensinamentos para a vida e por todo o auxílio que só eles poderiam fornecer.

À Carmelice Boff de Almeida pelo companheirismo e atenção desprendida nos momentos fáceis e difíceis.

Ao Professor Paulo Cesar Ocheuze Trivelin pela orientação no decorrer do curso e também pela amizade e pelos conhecimentos adquiridos através da convivência com este professor exemplar.

Ao Centro de Energia Nuclear na Agricultura - CENA/USP pela oportunidade de cursar o doutorado.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico- CNPq pelo custeio do projeto que gerou esta tese (Processo nº 480225/2011-7).

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de São Paulo - FAPESP pela concessão da bolsa de estudo (Processo n° 2011/07176-1).

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciências (Energia Nuclear na Agricultura e no Ambiente) pelo ensino e condições de trabalho, e em especial ao Laboratório de Isótopos Estáveis pelo suporte na condução dos experimentos e análises laboratoriais.

Ao Centro Rural de Tanquinho, representado pelo Professor José Albertino Bendassolli, pela concessão da área experimental e auxílio na implantação dos experimentos.

Aos colegas de pós-graduação José Marcos, Eduardo, João Milagres, Otto, Oriel, Michele, Beatriz, Maria Stefânia, Murilo e Carlos Sant'Ana, pela amizade, convívio e auxílio em diversas etapas.

Ao colega Hugo González (Paraguaio), pela amizade e constante ajuda nos trabalhos, além de nos aproximar de Ciudad del Este.

Ao colega Lucas Miachon (Axadô), pela amizade, e que com muita sabedoria auxiliou na condução deste projeto em campo.

Aos estagiários Daniel (Tiozão), Jessica Scarpin (Pipitô), Bruna Arruda (Mandiocão), João Luis (Furúnku), Jussara, Luiz Massucheto e Gabriela (Ispanô).

Aos membros do LIE/CENA, Prof. Dr. Albertino Bendassolli, Prof. Dr. Helder de Oliveira, Pingin, Hugo (Original), Ana Paula, Magda, Bento e Clelber (VP).

Enfim, a todos, que embora não mencionados especificamente, contribuíram para a conclusão desta etapa em minha vida, meu muito obrigado.

RESUMO

SCHONINGER, E. L. **Absorção foliar de amônia e produtividade do milho em função da época de aplicação de ureia em cobertura**. 2014. 94 f. Tese (Doutorado) — Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

A necessidade da adubação nitrogenada no milho e as perdas significativas de N que podem ocorrer, tanto do solo, como pela folhagem das plantas, são fatores que elevam os custos de produção. Contudo, com a possibilidade de aplicação do N em cobertura em diferentes estádios fenológicos da cultura do milho e, como o N pode ser perdido na forma de amônia e as plantas apresentam a capacidade de absorver NH₃ da atmosfera pela folhagem, torna-se interessante a quantificação dessa via de ganho de N nos agrossistemas em diferentes estádios de desenvolvimento das culturas, com a finalidade de proporcionar maior aproveitamento do nutriente pelas plantas. Nesse contexto, objetivou-se: i) avaliar a época de aplicação da ureia em cobertura no milho que proporcione maior aproveitamento do N do fertilizante e produtividade de grãos; ii) mensurar a absorção foliar de NH₃ oriunda da ureia aplicada na superfície do solo em diversos estádios fenológicos do milho, e verificar a correlação entre a quantidade de NH3 absorvida e a área foliar da cultura. O estudo foi desenvolvido no bairro rural de Tanquinho, município de Piracicaba, SP, nas safras 2011/12 e 2012/13. Foram desenvolvidos dois experimentos em campo, em delineamento experimental de blocos ao acaso, com quatro repetições. O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico, manejado em sistema convencional de preparo do solo. No primeiro experimento foi quantificado o aproveitamento do N do fertilizante pela cultura, a produção de fitomassa seca da parte aérea em diversos estádios fenológicos, bem como a produtividade de grãos, em função dos tratamentos testados, a saber: cinco épocas de aplicação de ureia (140 kg ha⁻¹ de N) em cobertura nos estádios fenológicos V4, V6, V8, V10 e V12, e um controle sem adubação de cobertura. No segundo experimento, foi quantificada a área foliar e a absorção da amônia volatilizada da ureia aplicada em bandejas contendo o mesmo solo da área experimental, para que não fosse exposto ao sistema radicular de plantas de milho, em função de cinco tratamentos (épocas de aplicação - idem ao primeiro experimento). Os resultados foram submetidos à análise de variância ($p \le 0.05$) e à comparação das médias pelo teste de Tukey. Não houve diferença entre os tratamentos quanto ao acúmulo de fitomassa seca da parte aérea em todos os estádios fenológicos avaliados. Do mesmo modo, não houve incremento na produtividade de grãos com a aplicação de N em cobertura em diferentes estádios fenológicos. Por outro lado, a aplicação de N em cobertura nos estádios mais precoces (V4 ou V6) proporcionou maior recuperação do N do fertilizante, chegando a valores de 53 %. Na média das duas safras, o nitrogênio volatilizado da ureia que foi absorvido pelas plantas apresentou valores de 3,4, 5,5, 6,2, 9,0 e 14,8 %, respectivamente, nos estádios V4, V6, V8, V10 e V12; aproximadamente 90 % do N absorvido pela folhagem foram acumulados nas folhas e apenas 10 % nos colmos. Houve alta correlação entre a área foliar e a porcentagem de amônia absorvida pelas folhas (r = 0,93, $p \le 0.05$). Isto ocorreu porque a área foliar representa a superfície de contato da planta com a amônia da atmosfera, confirmando a hipótese de que a maior área foliar reflete em maior absorção foliar percentual de amônia.

Palavras-chave: Fertilização nitrogenada em cobertura. Recuperação do fertilizante. Isótopo ¹⁵N. Volatilização de amônia. *Zea mays* L.

ABSTRACT

SCHONINGER, E. L. Foliar uptake of ammonia and corn yield as a function of urea sidedress timing. 2014. 94 f. Tese (Doutorado) – Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.

The need for nitrogen fertilization of corn crop and the significant losses of N that can occur both from soil and plants foliage are factors that increase production costs. However, with the possibility of sidedress application of N at different corn growth stages and considering that N can be lost as ammonia, and that plants have the capacity to uptake NH₃ from the atmosphere by the foliage, it is interesting to measure this pathway of N uptake in agricultural systems in different stages of crop development, in order to provide greater N fertilizer recovery by plants. In this context, this study aimed to: i) evaluate the urea sidedress timing in corn that provides the greater N fertilizer recovery and grain yield; ii) measure the foliar uptake of NH₃ volatilized from urea applied on the surface at different corn growth stages, and to evaluate the correlation between the amount of NH₃ absorbed and corn leaf area. The study was performed in Piracicaba, State of São Paulo, during the growth seasons of 2011/12 and 2012/13. Two field experiments were performed in experimental design of randomized blocks with four replications. The soil of experimental area is classified as Rhodic Haplustox, cultivated under conventional tillage system. In the first experiment, N fertilizer recovery by crop, dry matter yield in different growth stages and grain yield were evaluated as a function of five urea sidedress timing (140 kg ha⁻¹ N), represented by growth stages V4, V6, V8, V10 and V12, and a control without N application. In the second, leaf area was measured and the absorption of volatilized ammonia from urea applied in trays containing the same soil of the experimental area, to avoid that N was exposed to the corn roots, according to five treatments (application times - same as the first experiment). The data were submitted to analysis of variance (p≤0.05) and comparison of means by Tukey test. There was no difference among treatments for dry matter accumulation of shoots in all growth stages. Similarly, there was no increase in grain yield with the N application at different growth stages. However, the N application in the early stages (V4 or V6) provided greater N fertilizer recovery, reaching values of 53 %. In average, the nitrogen volatilized recovered by plants presented values of 3.4, 5.5, 6.2, 9.0 and 14.8 %, respectively, in V4, V6, V8, V10 and V12; approximately 90 % of N absorbed by foliage were retained in the leaves and only 10 % in the stalks. There was a high correlation between leaf area and the percentage of ammonia absorbed by the leaves (r = 0.93, p≤0.05). This occurred because the leaf area is the contact surface of the plant with atmospheric ammonia, confirming the hypothesis that the greater leaf area reflects in greater percentage of leaf ammonia absorption.

Keywords: Sidedress nitrogen fertilization. Fertilizer recovery. ¹⁵N isotope. Ammonia volatilization. *Zea mays* L.

SUMÁRIO

1	INTRODU	JÇÃO							•••••	13
2	ÉPOCAS	DE	APLICAÇÃO	DE	UREIA	EM	COBERTURA	NO	MILHO	Э:
	PRODUT	IVIDA	DE DA CULTU	RA E	RECUPE	RAÇÃ	O DO N DO FEI	RTILIZ	ZANTE .	16
Re	sumo								•••••	16
Ab	stract				•••••				•••••	17
2.1	Introdução								•••••	18
2.2	Material e	Métod	os						•••••	19
2.3	Resultados	e Disc	cussão						•••••	26
2.3	.1 Volatiliza	ação d	e amônia						•••••	26
2.3	.2 Acúmulo	de fit	omassa seca e nit	rogên	io na parte	e aérea			•••••	31
2.3	.3 Recupera	ıção do	N do fertilizant	e					•••••	44
2.3	.4 Produtivi	dade o	le grãos e índice	de col	lheita				•••••	48
2.4	Conclusões	S							•••••	54
3	ÉPOCAS I	DE Al	PLICAÇÃO DE	UREI	IA EM CC	BERT	URA NO MILH	O: AB	SORÇÃ	O
	FOLIAR I	DA AN	MÔNIA VOLAT	ILIZA	ADA DO F	ERTII	LIZANTE		•••••	55
Re	sumo								•••••	55
Ab	stract								•••••	56
3.1	Introdução								•••••	57
3.2	Material e	Métod	os						•••••	59
3.3	Resultados	e Disc	cussão						•••••	62
3.4	Conclusões	S							•••••	71
4	CONSIDE	RAÇĈ	ĎES FINAIS						•••••	72
RE	FERÊNCIA	\S							•••••	74
ΑP	ÊNDICES .									90

1 INTRODUÇÃO

O nitrogênio é o nutriente requerido em maior quantidade pelo milho (*Zea mays* L.) e, como o fornecimento deste nutriente pelo solo geralmente é limitado, a fertilização nitrogenada torna-se prática obrigatória quando se almeja alta produtividade da cultura.

Dentre as fontes de N empregadas como fertilizantes no Brasil, a ureia é a mais utilizada, principalmente, pelo menor custo por unidade de N em relação às demais fontes sólidas disponíveis no mercado. Quando aplicada ao solo, a ureia sofre hidrólise por ação da enzima urease, convertendo o R-NH₂ para NH₄⁺. Por consumir H⁺ do meio, essa reação promove elevação no pH do solo próximo aos grânulos de fertilizantes, favorecendo a desprotonação do NH₄⁺ à NH₃, sendo esta uma forma gasosa e passível de perdas por volatilização (SINGH; NYE, 1984; KIEHL, 1989). Segundo Lara Cabezas et al. (2000), a aplicação de ureia em superfície sem incorporação ao solo pode proporcionar perdas de 31 a 78 % do total de N aplicado. Entretanto, se a ureia for incorporada ao solo, as perdas por volatilização de NH₃ diminuem sensivelmente (LARA CABEZAS et al., 2000; SANGOI et al., 2003; TRIVELIN et al., 2002), pois a amônia ao se difundir do interior do solo em direção a atmosfera, encontra regiões com valores de pH mais baixo em relação aos valores próximos aos grânulos de ureia, sendo novamente protonada a NH₄ (ERNANI, 2008).

Além das perdas de N sob a forma de amônia, esse nutriente também é passível de remoções significativas do sistema solo-planta pela lixiviação, principalmente na forma de NO₃⁻. Isto ocorre porque grande parte do NH₄⁺ no solo é transformada a NO₃⁻ por ação de microrganismos nitrificadores e, como a quase totalidade dos solos agricultáveis apresentam carga líquida negativa na camada arável, o NO₃⁻ praticamente não é adsorvido aos colóides do solo, permanecendo principalmente na solução. Assim, se ocorrer elevado fluxo vertical de água no solo (após chuvas intensas principalmente em solos mais arenosos), parte do NO₃⁻ poderá ser movido para camadas mais profundas do solo, onde o nutriente não será mais absorvido pelas raízes das plantas, podendo, em certos casos, contaminar águas subsuperficiais. Ademais, caso ocorram condições de anaerobiose no solo, o NO₃⁻ também poderá ser convertido a formas gasosas como N₂ e N₂O que poderão ficar retidos em agregados do solo ou difundir até a atmosfera. Dependendo da intensidade de nitrificação no solo, a forma gasosa N₂O também poderá ser perdida do solo na reação aeróbia de nitritação (por ação microbiológica na transformação de NH₄⁺ a NO₂⁻) (BREMNER, 1997).

Com a finalidade de reduzir perdas do N aplicado ao solo, bem como suprir adequadamente a cultura no momento de maior demanda pelo nutriente, tem-se realizado o

parcelamento da adubação nitrogenada, sendo parte do N aplicada no momento da semeadura, e o restante em cobertura (CANTARELLA; DUARTE, 2004). Desse modo, o maior aproveitamento do N tem sido resultado da sincronização entre as aplicações e o período de alta demanda do nutriente (AMADO; MIELNICZUK; AITA, 2002; SILVA et al., 2005a; VILLAS BÔAS et al., 1999). Embora as recomendações técnicas para o Estado de São Paulo indiquem o estádio de 6 a 8 folhas como a melhor época para a aplicação de fertilizantes nitrogenados em cobertura na cultura do milho (CANTARELLA; RAIJ; CAMARGO, 1997), em alguns trabalhos não tem sido observadas diferenças significativas na eficiência de uso do fertilizante e na produtividade de grãos, com a variação da época de aplicação do N, em estádios que variaram entre 4 a 10 folhas (FRANÇA et al., 1994; SILVA et al., 2005a; SOUZA et al., 2001). Ademais, também têm sido relatados ganhos em produtividade (SILVA et al., 2005c) e na recuperação do fertilizante (LÜ et al., 2012) quando parte do N foi fornecido após o florescimento em híbridos com elevado potencial produtivo. De acordo com Ciampitti e Vyn (2013) e Huber, Tsai e Stromberger (1994), a resposta tanto em produtividade de grãos como na recuperação do fertilizante a aplicações de N mais tardias ocorre porque híbridos modernos e altamente produtivos absorvem consideráveis quantidades de N após o florescimento.

Sabendo-se da importância da fertilização nitrogenada em cobertura na cultura do milho, esta é realizada principalmente por meio da aplicação de fertilizantes em superfície, sem incorporação ao solo, devido ao maior rendimento operacional em relação aos outros métodos de aplicação. Nesse caso, se a fonte de N utilizada for ureia e, dependendo das condições edafoclimáticas, poderão ocorrer elevadas perdas por volatilização de amônia.

Apesar de toda a amônia volatilizada ser considerada perdida do sistema solo-planta, diversos trabalhos, com o auxílio da técnica de diluição isotópica do ¹⁵N, tem demonstrado que as plantas possuem a capacidade de absorver quantidades significativas de NH₃ pelas folhas (BOARETTO et al., 2013; FALLER, 1972; FENILI et al., 2007; HUTCHINSON; MILLINGTON; PETERS, 1972; LOCKYER; WHITEHEAD, 1986; MARTHA JÚNIOR; TRIVELIN; CORSI, 2009; PING; BREMER; JANZEN, 2000; ROGERS; ANEJA, 1980; WHITEHEAD; LOCKYER, 1987). Em trabalhos desenvolvidos com plantas de café, capim tanzânia e laranjeira, Fenili et al. (2007), Martha Júnior, Trivelin e Corsi (2009) e Boaretto et al. (2013) encontraram absorção foliar em torno de 43, 16 e 7% do N volatilizado, respectivamente. Dependendo do período de exposição das plantas à elevada concentração de NH₃ na atmosfera, o N absorvido pelas folhas na forma de NH₃ poderá representar parte significativa do N acumulado pela planta (LOCKYER; WHITEHEAD, 1986), podendo

chegar a valores de 34 a 45 % (WHITEHEAD; LOCKYER, 1987). Entretanto, além da capacidade de absorver NH₃, as plantas também podem liberar este gás para a atmosfera através das folhas. A intensidade e o sentido com que ocorrem essas trocas de amônia entre as folhas e a atmosfera dependem da concentração de NH₃ na atmosfera (MARTHA JÚNIOR; TRIVELIN; CORSI, 2009) e do ponto de compensação de amônia da planta (FARQUHAR et al., 1980), sendo este último variável com a temperatura, a intensidade luminosa, o fotoperíodo, a nutrição nitrogenada da planta, a espécie, a cultivar, e o estádio de desenvolvimento da planta (HOLTAN-HARTWIG; BOCKMAN, 1994; HUSTED; MATTSSON; SCHJOERRING, 1996; MATTSSON et al., 1997; MATTSSON; SCHJOERRING, 1996; SCHJOERRING; HUSTED; MATTSSON, 1998). Nas concentrações de NH₃ na atmosfera abaixo do ponto de compensação de amônia da planta, ocorre sua emissão pelas folhas, enquanto em concentrações acima, sua absorção (FARQUHAR et al., 1980; HOLTAN-HARTWIG; BOCKMAN, 1994; SCHJOERRING; HUSTED; MATTSSON, 1998). Normalmente, as concentrações de NH₃ em áreas rurais estão na faixa de 1 a 14 µg m⁻³ (HOLTAN-HARTWIG; BOCKMAN, 1994; SCHLESINGER; HARTLEY, Entretanto, após a aplicação de fertilizantes nitrogenados propícios a perdas por volatilização de NH₃ (ureia, por exemplo), as concentrações de NH₃ na atmosfera próximo a fonte emissora podem ser elevadas (HARPER et al., 1983), favorecendo assim a absorção foliar dessa forma de N.

Outro fator de grande importância na capacidade de absorção de NH₃ pelas folhas é a área foliar (MARTHA JÚNIOR; TRIVELIN; CORSI, 2009), pois numa mesma espécie, o elevado valor desta característica representa aumento na área de contato entre as folhas e a atmosfera, que poderá refletir na maior absorção de NH₃ pelos vegetais. Além disso, Boaretto et al. (2013) comentaram que a maior absorção foliar de amônia também pode ser resultado da arquitetura das plantas e da densidade foliar, proporcionando dosséis mais "fechados". Segundo estes mesmos autores, culturas com dossel mais denso limitam a passagem do vento e aumentam o tempo de residência da amônia próxima às folhas da cultura, podendo contribuir para maior absorção dessa forma de N.

Pelo exposto, as hipóteses deste trabalho são as seguintes: i) a adubação nitrogenada de cobertura na cultura do milho em estádios mais tardios aumenta a recuperação do N do fertilizante e a produtividade de grãos; ii) plantas em estádios fenológicos mais avançados, por apresentarem maior área foliar, absorvem maiores quantidades de NH₃ volatilizada da ureia.

2 ÉPOCAS DE APLICAÇÃO DE UREIA EM COBERTURA NO MILHO: PRODUTIVIDADE DA CULTURA E RECUPERAÇÃO DO N DO FERTILIZANTE

Resumo

A necessidade de aplicação de altas doses de N na cultura do milho aliada às inúmeras transformações desse nutriente na natureza são fatores que, de maneira geral, limitam a eficiência da adubação nitrogenada. Assim, a adoção de práticas que objetivam aumentar a eficiência de recuperação do N do fertilizante é necessária. Dentre estas, a época de aplicação do N em cobertura tem sido amplamente estudada e os resultados têm sido bem variados. Nesse contexto, objetivou-se avaliar a época de aplicação da ureia em cobertura no milho que proporcione maior aproveitamento do N do fertilizante e produtividade de grãos. O estudo foi desenvolvido em campo, no bairro rural de Tanquinho, município de Piracicaba, SP, nas safras 2011/12 e 2012/13, em delineamento experimental de blocos ao acaso com quatro repetições. O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico, manejado em sistema convencional de preparo do solo. Foram avaliadas a recuperação do N do fertilizante pela cultura, a produção de fitomassa seca da parte aérea em diversos estádios fenológicos, bem como a produtividade de grãos em função dos tratamentos testados, a saber: cinco épocas de aplicação de ureia fertilizante (140 kg ha⁻¹ de N) em cobertura nos estádios fenológicos V4, V6, V8, V10 e V12, e um controle sem adubação de cobertura. Os resultados foram submetidos à análise de variância ($p \le 0.05$) e à comparação das médias pelo teste de Tukey. Não houve diferença entre os tratamentos quanto ao acúmulo de fitomassa seca da parte aérea em todos os estádios fenológicos. Do mesmo modo, não houve incremento na produtividade de grãos com a aplicação de N em cobertura em diferentes estádios fenológicos. Por outro lado, a aplicação de N em cobertura nos estádios mais precoces (V4 ou V6) proporcionou maior recuperação do N do fertilizante, chegando a valores de 53 %.

Palavras-chave: Fertilização nitrogenada. Isótopo ¹⁵N. Volatilização de amônia. Zea mays L.

Abstract

UREA SIDEDRESS TIMING IN CORN CROP: GRAIN YIELD AND N FERTILIZER RECOVERY

The application of high N rates in corn crop and the many transformations that this nutrient suffers in nature are factors that, in general, decrease the efficiency of nitrogen fertilization. Thus, the adoption of management practices to increase the N fertilizer recovery N is needed. Therefore, the sidedress timing has been widely studied and the results have been quite varied. This work aimed to assess the urea sidedress timing in corn that provides the greater N fertilizer recovery and grain yield. The study was performed under field conditions in Piracicaba, State of São Paulo, during the growth seasons of 2011/12 and 2012/13, in experimental design of randomized blocks with four replications. The soil of experimental area is classified as Rhodic Haplustox, cultivated under conventional tillage system. N fertilizer recovery by crop, dry matter yield in different growth stages and grain yield were evaluated as a function of five urea sidedress timing (140 kg ha⁻¹ N), represented by growth stages V4, V6, V8, V10 and V12, and a control without N application. The data were submitted to analysis of variance (p≤0.05) and comparison of means by Tukey test. There was no difference among treatments for dry matter accumulation of shoots in all growth stages. Similarly, there was no increase in grain yield with the N application at different growth stages. However, the N application in the early stages (V4 or V6) provided greater N fertilizer recovery, reaching values of 53 %.

Keywords: Nitrogen fertilization. Isotope ¹⁵N. Ammonia volatilization. Zea mays L.

2.1 Introdução

A área do território brasileiro cultivada com milho no ano de 2013 foi de aproximadamente 15,8 milhões de hectares, com produtividade média de 5120 kg ha⁻¹ (CONAB, 2014). Segundo Sangoi et al. (2001), para a produção de cada tonelada de grãos de milho, são necessários de 20 a 25 kg de N, sendo esse nutriente o requerido em maior quantidade pela cultura. Todavia, como o fornecimento de N pelo solo é limitado na maioria das lavouras, torna-se indispensável a adubação nitrogenada.

Devido às inúmeras transformações que o N pode sofrer no solo, a eficiência de recuperação do N do fertilizante pelo milho geralmente não ultrapassa 50 % (DUETE et al., 2008; GAVA et al., 2006; LARA CABEZAS et al., 2000; SCIVITTARO et al., 2000; SILVA et al., 2006), podendo atingir, em alguns casos, valores muito baixos de apenas 9 % (LÜ et al., 2012). O N do fertilizante não recuperado pela cultura pode permanecer no solo, ou ser perdido do sistema solo-planta por lixiviação, desnitrificação e/ou volatilização. Assim, a busca pelo aumento da eficiência de recuperação do fertilizante nitrogenado torna-se necessária, por meio de práticas culturais ou manejo do solo.

Dentre diversas estratégias para elevar a recuperação do N do fertilizante pode-se citar a época de aplicação do mesmo (ABBASI et al., 2012; ABBASI et al., 2013; DUETE et al., 2008; LÜ et al., 2012; RANDALL; VETSCH, 2005; RANDALL; VETSCH; HUFFMAN, 2003; RUIZ-DIAZ; SAWYER, 2008; SILVA et al., 2005a; SILVA et al., 2006). De maneira geral, a adubação nitrogenada do milho é realizada de forma parcelada, aplicando-se parte do N na semeadura (30 a 40 kg ha⁻¹ de N) e o restante da dose recomendada em cobertura (CANTARELLA; DUARTE, 2004). Embora a época de realização da adubação de cobertura recomendada para a maioria das condições brasileiras situa-se entre os estádios V4 a V8, trabalhos avaliando épocas de aplicação têm encontrado resultados diversos. Silva et al. (2006), por exemplo, verificaram que não houve diferenças na recuperação do fertilizante pelas plantas de milho quando o N foi aplicado em V4 ou V8, com média próxima a 50 %. Por outro lado, Lü et al. (2012), avaliando número e épocas de parcelamentos, observaram maior recuperação do fertilizante quando o N foi parcelado em mais vezes, incluindo aplicações após o florescimento.

Além da recuperação do fertilizante, a produtividade de grãos também tem sido avaliada em função da época de aplicação do N em cobertura. Duete et al. (2008), avaliando doses de N e épocas de aplicação em solo de textura média, observaram que na dose de 135 kg ha⁻¹ de N, a maior produtividade de grãos foi obtida quando todo o N foi aplicado até o

estádio V8, comparativamente à aplicação de parte do N em V12. Por outro lado, Silva et al. (2005a), testando doses de N de até 180 kg ha⁻¹ em solo argiloso, constataram que não houve diferenças para produtividade de grãos quando o N foi aplicado apenas no estádio V4-6, ou metade na semeadura e o restante em V4-6, ou mesmo metade na semeadura e outra metade em V8-10. Silva et al. (2005c), por sua vez, relataram maiores produtividades de grãos com a aplicação de N no florescimento, desde que o fornecimento de N durante o desenvolvimento vegetativo não tenha sido limitado.

A resposta tanto em produtividade de grãos como na recuperação do fertilizante às aplicações de N mais tardias, ocorre porque híbridos modernos e altamente produtivos absorvem consideráveis quantidades de N mesmo após o florescimento da cultura (CIAMPITTI; VYN, 2013; HUBER; TSAI; STROMBERGER, 1994). Portanto, como o fornecimento de N aos grãos via remobilização das folhas e dos colmos é limitado, faz-se necessária a absorção de quantidades significativas do nutriente durante o período reprodutivo (CIAMPITTI; VYN, 2013).

Ademais, aplicações mecanizadas de fertilizantes sólidos na cultura de milho são impraticáveis com plantas apresentando grande porte. Assim, uma das maneiras de manter maior quantidade de N disponível à cultura após o florescimento seria realizar aplicações em estádios vegetativos mais avançados do que os atualmente recomendados (V4 a V8), mas que ainda permitissem a adubação mecanizada sem dano (quebramento) excessivo às plantas. Neste sentido, objetivou-se neste trabalho avaliar a produtividade da cultura e a recuperação do N do fertilizante em função da época de realização da adubação nitrogenada em cobertura no milho.

2.2 Material e Métodos

Os experimentos foram desenvolvidos no bairro rural de Tanquinho, munícipio de Piracicaba, SP, e as análises laboratoriais realizadas no Centro de Energia Nuclear na Agricultura, da Universidade de São Paulo (CENA/USP), no mesmo município. Foram desenvolvidos dois experimentos em campo (safras 2011/12 e 2012/13), em delineamento experimental de blocos ao acaso e quatro repetições, em área manejada em sistema convencional de preparo do solo (Apêndice A). O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico, e havia sido cultivado com milho nas três últimas safras que antecederam a implantação deste experimento, durante o verão, e mantido em pousio na entressafra. Anteriormente à implantação dos experimentos, foi realizada a caracterização

química e física do solo da área experimental, nas camadas de 0-20 e 20-40 cm (Tabela 1). Os tratamentos constaram de cinco épocas de aplicação de ureia fertilizante em cobertura na cultura do milho, equivalentes aos estádios fenológicos V4, V6, V8, V10 e V12, além de um tratamento controle, no qual não foi realizada a adubação nitrogenada de cobertura. As parcelas foram compostas por dez linhas de milho com 10 m de comprimento, espaçadas em 0,5 m entre si, totalizando uma área de 50 m². No interior de cada parcela foi demarcada uma miniparcela com 0,5 m de largura e 1,5 m de comprimento (Apêndice A), para a aplicação de ureia marcada (com abundância de 2 % de átomos ¹⁵N), na mesma dose e época da ureia comercial aplicada no restante da parcela.

O híbrido de milho utilizado foi o 30F35HR, da Pioneer[®], incluindo a tecnologia Herculex[®], que controla a lagarta do cartucho (*Spodoptera Frugiperda*) e a broca da cana de açúcar (*Diatrea saccharallis*), e a tecnologia Roundup Ready[®], que confere a resistência à aplicação pós-emergente de herbicidas que contém o glifosato como princípio ativo. Esse híbrido apresenta elevado potencial produtivo, sendo altamente responsivo à elevação dos níveis de adubação e é adaptado para cultivo em terras baixas e altas do Brasil Central (PIONEER, 2014).

Antes da semeadura do milho, nos meses de outubro de 2011 e novembro de 2012, o solo da área experimental recebeu a aplicação de calcário visando à elevação da saturação por bases para 70 %, com posterior incorporação por meio de duas gradagens. Em 08 de dezembro de 2011 e 19 de dezembro de 2012 foi realizada a semeadura manual do milho, colocando-se sementes aos pares a cada 0,33 m no sulco de semeadura, com posterior raleio no estádio V4 (deixando-se apenas uma planta a cada 0,33 m), visando à distribuição uniforme das plantas (homogeneidade de estande) e população final de 60.000 plantas por hectare. Em ambas as safras, foi realizada a adubação de base com a aplicação de 750 kg ha⁻¹ do formulado 04-14-08 em todas as parcelas, resultando na dose de 30, 105 e 60 kg ha⁻¹, respectivamente, de N, P₂O₅ e K₂O. Para a adubação nitrogenada de cobertura foram aplicados 140 kg ha⁻¹ de N na forma de ureia. No estádio V4 foram aplicados 60 kg ha⁻¹ de K₂O na forma de cloreto de potássio, na entrelinha e sem incorporação. Essas doses de N e de K₂O foram definidas objetivando-se alta produtividade de grãos (10 - 12 Mg ha⁻¹), conforme recomendado por Cantarella, Raij e Camargo (1997).

A aplicação do nitrogênio em cobertura foi realizada no centro da entrelinha da cultura, em filete contínuo, sem incorporação ao solo (Apêndice A). As épocas de aplicação equivalentes a cada tratamento foram representadas pelos estágios vegetativos V4, V6, V8, V10 e V12, conforme descrito por Ritchie, Hanway e Benson (1993).

Os tratos culturais realizados no milho estão descritos no Apêndice B, e os dados climáticos (pluviosidade e temperatura) durante a condução dos experimentos são apresentados na Figura 1.

A quantidade de amônia volatilizada foi mensurada com o uso de coletores semiabertos estáticos (Apêndice A), seguindo o modelo descrito por Nömmik (1973) e calibrado por Lara Cabezas et al. (1999), com a mudança de bases entre amostragens como proposto por Cantarella et al. (2003b). Os coletores foram alocados nas parcelas imediatamente após a aplicação do fertilizante nitrogenado.

Durante o desenvolvimento da cultura do milho foram realizadas seis amostragens da parte aérea das plantas, com a finalidade de avaliar o acúmulo de fitomassa seca e nitrogênio. A primeira amostragem foi efetuada quando as plantas estavam no estádio fenológico V4 (quatro folhas totalmente expandidas - com lígula visível). Nesta etapa, foram coletadas seis plantas por parcela. As demais foram realizadas nos estádios V8 (oito folhas totalmente expandidas), V12 (dose folhas totalmente expandidas), R1 (florescimento), R3 (grãos leitosos) e R6 (maturação fisiológica), sendo coletadas quatro plantas por parcela. Quando possível, o material vegetal da parte aérea do milho foi separado em amostras de colmo, folhas (folhas + pendão + folhas da espiga), sabugo e grãos. Todo o material foi seco em estufa a 65°C com ventilação forçada, para em seguida ser mensurada a fitomassa seca. O material vegetal seco foi triturado em moinho tipo Wiley, homogeneizado, subamostrado e, submetido à determinação da concentração de N. A quantidade de N acumulado em cada parte das plantas foi obtida por meio da multiplicação da concentração de N nos tecidos pela fitomassa seca de cada parte das plantas.

Tabela 1 - Caracterização química e física do solo da área experimental

Camada	pН	$\mathbf{P}_{(resina)}$	K	Ca	Mg	H+Al	Al	T	\mathbf{V}	MO^1	Argila		
cm	(CaCl ₂)	mg dm ⁻³			mmc	%	g	g kg ⁻¹					
Safra 2011/12													
0–20	4,9	27	1,9	30	13	42	1	87	52	29	529		
20–40	4,5	32	0,6	19	8	58	5	86	32	22	548		
Safra 2012/13													
0–20	4,8	29	1,3	16	9	47	2	73	36	30	-		
20–40	4,6	21	0,6	10	7	52	3	70	25	24	-		

¹ = Matéria orgânica.

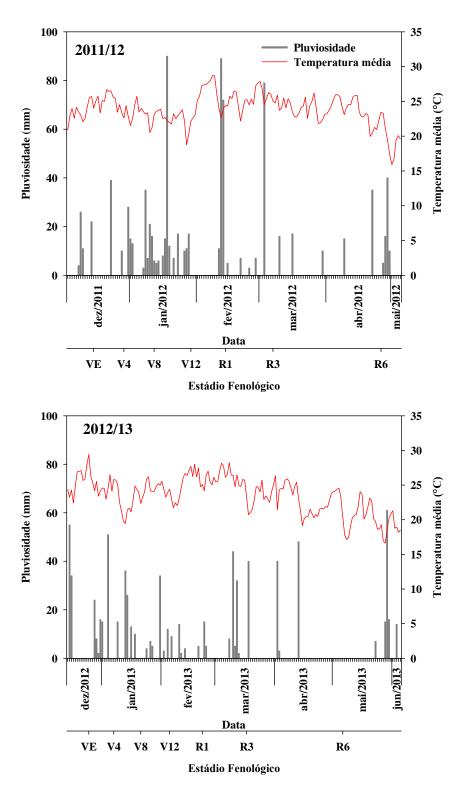


Figura 1 - Pluviosidade e temperatura média durante o ciclo da cultura do milho nas safras 2011/12 e 2012/13. Os dados de pluviosidade foram obtidos por meio de pluviômetro instalado na área experimental e os dados de temperatura foram obtidos no Posto Meteorológico da ESALQ/USP (Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2013), distante a aproximadamente 15 km da área experimental

A porcentagem de N remobilizado (NR) das folhas ou dos colmos para os grãos após o florescimento foi calculada pelo método da diferença (equação 1), a semelhança do realizado por Dordas (2009), DeBruin et al. (2013) e Ciampitti et al. (2013a; 2013b).

(Eq. 1)
$$NR \ (\%) = \left(\frac{(N_{R6} - N_{R1})}{NG_{R6}}\right). \ 100$$

em que,

NR é o nitrogênio remobilizado (das folhas ou dos colmos), em porcentagem;

 N_{R6} é a quantidade de N acumulado nas folhas ou nos colmos no estádio R6 (maturação fisiológica), em kg ha⁻¹;

 N_{R1} é a quantidade de N acumulado nas folhas ou nos colmos no estádio R1 (florescimento), em kg ha^{-1} ;

NG_{R6} é a quantidade de N acumulado nos grãos no estádio R6, em kg ha⁻¹;

A porcentagem total de N remobilizado (NRT) foi dada pela soma da remobilização das folhas e dos colmos. A porcentagem de N nos grãos ao final do ciclo (NAF) proveniente da absorção após o florescimento foi calculada pela equação 2, na qual foram desprezadas as quantidades remobilizadas do sabugo.

$$(Eq. 2) NAF (\%) = 100 - NRT$$

em que,

NAF é o nitrogênio absorvido após o estádio R1 (florescimento) que foi acumulado nos grãos, em porcentagem;

NRT é o nitrogênio total remobilizado das folhas e dos colmos após o estádio R1, em porcentagem;

Para estimar a razão de exportação de fitomassa seca, foi calculado o índice de colheita de grãos com base na equação 3.

$$(Eq.3) ICG (\%) = \frac{MSG}{MSPA} .100$$

em que,

ICG é o índice de colheita de grãos, em porcentagem;

MSG é a massa seca de grãos, em kg ha⁻¹;

MSPA é massa seca da parte aérea (folhas, colmo, sabugo e grãos), em kg ha⁻¹.

Também foi calculado o índice de colheita de N, utilizando-se a equação 4.

$$(Eq.4) ICN (\%) = \frac{QNAG}{QNAP} .100$$

em que,

ICN é o índice de colheita de nitrogênio, em porcentagem;

QNAG é a quantidade de N acumulado nos grãos, em kg ha⁻¹;

QNAP é a quantidade de N acumulado em toda a parte aérea da planta, em kg ha⁻¹;

Ao término do ciclo da cultura, foi determinada a produtividade de grãos por meio da coleta de todas as espigas da área útil (duas linhas centrais, desprezando-se 1 m em cada extremidade). As espigas foram debulhadas para separação dos grãos. A produtividade de grãos foi determinada pela pesagem dos grãos colhidos, com correção da umidade para 130 g kg⁻¹.

Quatro plantas das miniparcelas (duas plantas centrais de cada uma das linhas de milho adjacentes à faixa de aplicação da ureia com ¹⁵N) foram coletadas e separadas em grãos, sabugo, colmo e folhas (folhas + pendão + folhas da espiga), para então serem secas em estufa, pesadas e finamente moídas, para posterior determinação das concentrações de N-total e abundância de ¹⁵N, em espectrômetro de massas (BARRIE; PROSSER, 1996). A quantidade de N acumulado nas diferentes partes da planta (QNAP) foi calculada pela equação 5.

(Eq. 5)
$$QNAP (kg ha^{-1}) = \frac{(MSP \cdot CNT)}{1000}$$

em que,

QNAP é a quantidade de N acumulado nas diferentes partes da planta, em kg ha⁻¹; MSP é a fitomassa seca acumulada nas diferentes frações da planta, em kg ha⁻¹; CNT é a concentração de N total nas diferentes frações da planta, em g kg⁻¹;

A eficiência de recuperação do fertilizante (ERF) avaliada no término do ciclo da cultura foi calculada pela equação 6.

(Eq. 6)
$$ERF (\%) = \left(\frac{\left(\frac{15Np}{15Nf}\right) \cdot QNAP}{QNA}\right) \cdot 100.2$$

em que,

ERF é a eficiência de recuperação do fertilizante, em porcentagem;

¹⁵Np é a abundância de ¹⁵N em excesso nas diferentes frações da planta, em porcentagem;

¹⁵Nf é a abundância de ¹⁵N em excesso no fertilizante aplicado, em porcentagem; QNAP é a quantidade de N acumulado nas diferentes partes da planta, em kg ha⁻¹; QNA é a quantidade de N aplicado via fertilizante, em kg ha⁻¹.

Considerando-se que as plantas absorvem quantidades semelhantes do fertilizante aplicado em cada um dos lados da linha da cultura (JHONSON; KURTZ, 1974) e, que o fertilizante marcado foi aplicado no centro da entrelinha (equivalente a apenas um dos lados de cada linha onde foram coletadas as plantas), assume-se que 50 % do N do fertilizante absorvido pela planta foi oriundo do fertilizante marcado e 50 % do fertilizante comum, tornando-se necessário o uso do fator de multiplicação 2 na equação 6.

O nitrogênio na planta proveniente do fertilizante (NPPF) foi calculado pela equação 7.

(Eq. 7)
$$NPPF (\%) = \frac{(ERF \cdot QNA)}{QNAP}$$

em que,

NPPF é o nitrogênio na planta proveniente do fertilizante, em porcentagem;

ERF é a eficiência de recuperação do fertilizante nas diversas frações da planta, em porcentagem;

QNA é a quantidade de N aplicado via fertilizante, em kg ha⁻¹;

QNAP é a quantidade de N acumulado nas diferentes partes da planta, em kg ha⁻¹.

As taxas de acúmulo de fitomassa seca e de nitrogênio na parte aérea do milho foram calculadas com base na proposta de Lucchesi (1984). Nesse método, as taxas referentes a cada período de desenvolvimento da cultura (intervalo entre as coletas realizadas em V4, V8, V12, R1, R3 e R6) são determinadas por meio da divisão do acúmulo de fitomassa seca ou nitrogênio em cada período pelo tempo (dias) de duração deste. A partir dessas taxas foram

ajustadas curvas, optando-se pela escolha das significativas ($p \le 0.05$) com maior coeficiente de determinação.

Os resultados foram submetidos à análise de variância ($p \le 0.05$), e quando o teste F mostrou-se significativo, as médias foram comparadas pelo teste de Tukey ($p \le 0.05$). Para a realização das análises estatísticas foi utilizado o programa SAS versão 9.2 (SAS INSTITUTE INC., 2009).

2.3 Resultados e Discussão

2.3.1 Volatilização de amônia

As maiores perdas de N por volatilização de amônia ocorreram quando a ureia foi aplicada nos estádios V12 ou V10, chegando a 35 e 41 % do N aplicado, nas safras 2011/12 e 2012/13, respectivamente (Figura 2). Quando o N foi aplicado em V8, ocorreram perdas intermediárias (até 20 %). Com a aplicação do N em V6, na primeira safra, houve perdas de aproximadamente 11 %, enquanto na segunda safra, as perdas não ultrapassaram 1,5 %. Para a aplicação do N no estádio V4, as perdas por volatilização foram mínimas, não ultrapassando 0,5 %.

Em locais sob mesmo manejo da cobertura do solo e modo de aplicação de fertilizantes nitrogenados, as variações nas quantidades de amônia volatilizada ocorrem, principalmente, devido às diferentes condições climáticas que predominaram nos dias subsequentes à aplicação (CANTARELLA et al., 2003b; DA ROS; AITA; GIACOMINI, 2005; FENILLI et al., 2007). Mesmo ocorrendo chuvas poucos dias após a aplicação da ureia em praticamente todos os tratamentos e ambas as safras (Figura 3), exceto no estádio V12 na safra 2011/12, a volatilização ocorreu de forma acentuada com a aplicação mais tardia do N em cobertura (Figura 2). Assim, se a pluviosidade após a aplicação de ureia em cobertura não for suficiente para incorporar o fertilizante (ou os produtos de sua hidrólise) no solo, a uma profundidade que evite a volatilização de amônia, ou não seja eficiente para difundir as hidroxilas e/ou o NH₄⁺ provenientes da ureia, poderá contribuir ainda mais para as perdas de N por volatilização. Isto ocorre porque a pluviosidade aumenta o potencial de evaporação de água do solo (desde que mantidas as demais condições climáticas), que segundo Al-Kanani, Mackenzie e Barthakur (1991), Martin e Chapman (1951) e Wahhab, Randhawa e Alam (1957), é indispensável para que ocorra difusão da amônia até a atmosfera.

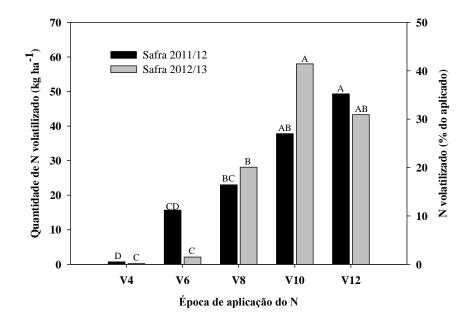


Figura 2 - Quantidade e porcentagem de N volatilizado a partir da ureia aplicada em cobertura em estádios fenológicos do milho. Em cada safra, colunas com letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey (*p*≤0,05). Os coeficientes de variação para as safras 2011/12 e 2012/13 foram de 28 e 39 %, respectivamente

A ocorrência de chuvas em quantidades consideráveis (> 20 mm) no primeiro dia após a aplicação da ureia em superfície foi um dos fatores responsáveis pela redução da perda de amônia por volatilização, justificando as pequenas perdas observadas no tratamento V4 na primeira safra, e no V6 na segunda. Na safra 2012/13, as perdas de amônia no estádio V4 também foram mínimas, mesmo a primeira chuva tendo ocorrido apenas no segundo dia após a aplicação do fertilizante, que foi de 15 mm. Após esta precipitação pluvial, passaram-se mais três dias sem chuvas, o que poderia ter favorecido a perda de amônia. Contudo, como a ureia foi aplicada sobre o solo seco (no dia da aplicação já haviam se passado três dias da última chuva), é provável que a hidrólise do fertilizante tenha sido limitada, permanecendo na forma de ureia e, após a chuva de 15 mm, esta foi incorporada a uma profundidade suficiente para reduzir a perdas de amônia. Zhengping, Cleemput e Baert (1996) observaram que, aumentando a umidade do solo de 10 para 20 %, o tempo necessário para que metade da ureia fosse hidrolisada diminuiu de quatro para dois dias, demonstrando a importância da umidade no processo de hidrólise. Black, Sherlock e Smith (1987) aplicaram ureia em solo seco e relataram que 73 % do N aplicado permaneceu na forma não hidrolisada por 30 dias após a aplicação.

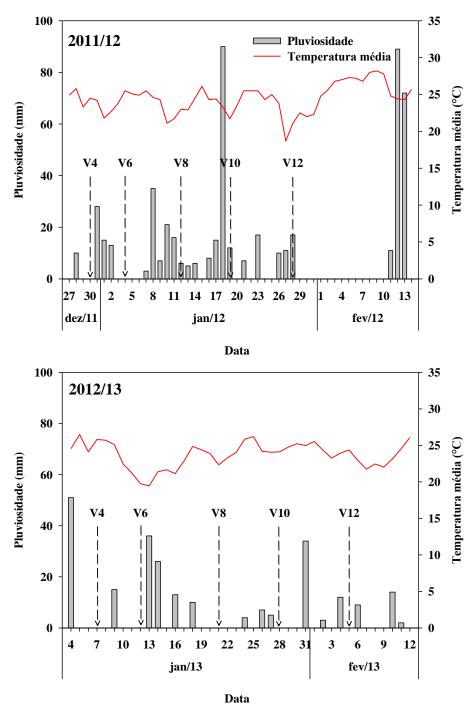


Figura 3 - Pluviosidade e temperatura média nas épocas de aplicação da ureia em cobertura na cultura do milho nas safras 2011/12 e 2012/13. Setas indicam a data de aplicação dos tratamentos e os respectivos estádios fenológicos da cultura. Os dados de pluviosidade foram obtidos por meio de pluviômetro instalado na área experimental e os dados de temperatura foram obtidos no Posto Meteorológico da ESALQ/USP (Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2013), distante a aproximadamente 15 km da área experimental

Por ser uma molécula não iônica, a ureia é mais móvel no solo em relação ao NH₄⁺ (BLACK; SHERLOCK; SMITH, 1987; BROADBENT; HILL; TYLER, 1958; DAWAR et al., 2011; WAGENET; BIGGAR; NIELSEN, 1977), necessitando de menor lâmina de água para ser incorporada ao solo. A menor mobilidade do amônio no solo deve-se ao fato que esse íon pode ficar retido nas cargas negativas do solo. Dawar et al. (2011), ao avaliarem o uso de inibidor da enzima urease (IEU), observaram que a ureia sem IEU aplicada na superfície do solo sofreu rápida hidrólise (em condições adequadas de umidade e temperatura), formando grande quantidade de NH₄⁺ nas camadas mais superficiais do solo, podendo favorecer as perdas de amônia por volatilização. Por outro lado, ao empregaram IEU, estes mesmos autores observaram que a hidrólise da ureia foi retardada e ocorreu, em sua maioria, em subsuperfície, devido à maior movimentação do N na forma de ureia em profundidade. A maior mobilidade da ureia, juntamente com a possibilidade de ser hidrolisada em camadas mais profundas do solo, podem então justificar a baixa perda de amônia quando o N foi aplicado no estádio V4 na segunda safra, mesmo com a ocorrência de uma única chuva de 15 mm nos cinco dias subsequentes à aplicação do fertilizante. Contudo, a quantidade de chuva considerada suficiente para o controle das perdas de amônia depende das características do solo (umidade, textura, porosidade, entre outras), da cobertura do solo, da intensidade da chuva, e do tempo transcorrido entra a aplicação da ureia e precipitação pluvial (CANTARELLA et al., 2003b; DA ROS; AITA; GIACOMINI, 2005; FENILLI et al., 2007; FERGUSON et al., 1988; KELLER; MENGEL, 1986).

Embora em outros estádios (por exemplo, V8 na primeira safra e V12 na segunda) também tenham ocorrido chuvas de até 9 mm no primeiro dia após a aplicação, foi observada perda significativa de N por volatilização. Nestes casos, a chuva não foi suficiente para impedir a volatilização, provavelmente, porque a aplicação do fertilizante foi realizada sobre o solo úmido, situação que favoreceu a hidrólise da ureia com consequente formação de NH₄⁺, que é menos móvel no solo, como comentado anteriormente.

Ademais, também é interessante considerar a possibilidade de interferência da interceptação de água pelas folhas e do fluxo preferencial de água da chuva em plantas mais velhas sobre a volatilização de amônia. Alguns trabalhos têm demonstrado que parte da chuva que é interceptada pelo dossel das plantas pode ficar retida nas folhas ou chegar ao solo via escorrimento pelo colmo (*stemflow*) ou na forma de respingos (ALVES; FRIZZONE; DOURADO NETO, 2001; CONTE; LEOPOLDO, 1986; HAYNES, 1940; LEOPOLDO; SOUSA; TUACEK FILHO, 1981; PARKIN; CODLING, 1990; SILVA et al., 1994). Segundo Alves, Frizzone e Dourado Neto (2001), as taxas de interceptação da chuva pelas

folhas e consequentemente de escoamento de água pelo colmo são aumentadas quando a área foliar da cultura é maior. Parkin e Codling (1990) observaram, para chuvas de 3 a 7,5 mm, que o escoamento pelo colmo do milho variou de 19 a 48 % do total da precipitação pluviométrica. Assim, é provável que as chuvas ocorridas em estádios mais avançados da cultura do milho, neste estudo, tenham sido menos eficientes em incorporar o fertilizante nitrogenado no solo, após sua aplicação na entre linha.

Por outro lado, como a perda de amônia por volatilização é dependente da evaporação de água do solo, torna-se necessária a compreensão desse fenômeno. O processo de evaporação de água do solo pode ser dividido em três fases (FEDDES, 1971; IDSO et al., 1974; RITCHIE, 1972). Na fase 1, a taxa de evaporação de água do solo é limitada apenas pela quantidade de energia disponível para vaporizar a água na camada mais superficial do solo (FEDDES, 1971; IDSO et al., 1974; LEMON, 1956; RITCHIE, 1972; VENTURA; SNYDER; BALI, 2006), e inicia-se logo após o término das chuvas ou irrigações. A duração desta fase é variável e, geralmente, maior quando há cobertura do solo (DALMAGO et al., 2010; LEMON, 1956). Na fase 2, a diminuição da umidade do solo na camada superficial e as características hidráulicas do solo são os fatores que determinam a transferência de líquido e vapor para a superfície (FEDDES, 1971; IDSO et al., 1974; LEMON, 1956; RITCHIE, 1972; VENTURA; SNYDER; BALI, 2006). Nesta fase, a evaporação ocorre abaixo da superfície e o vapor d'água alcança a superfície por difusão molecular e por fluxo de massa (FREITAS et al., 2006; JENSEN; BURMAN; ALLEN, 1990). A fase 3 é determinada principalmente pelas características físicas e adsortivas do solo, sendo a taxa de evaporação de pouca importância (VENTURA; SNYDER; BALI, 2006).

Com base nessa distinção entre as fases de evaporação de água do solo, é possível que a maior área foliar da cultura nos estádios mais avançados possa ter contribuído para as diferenças nas perdas por volatilização. Em primeira análise, a maior cobertura do solo impedindo a incidência direta dos raios solares reduziria a quantidade de energia incidente e, consequentemente, a evaporação de água do solo na fase 1 (DALMAGO et al., 2010), podendo então reduzir as perdas de amônia. No entanto, a maior cobertura também aumenta o período de atuação da fase 1 de evaporação de água do solo (DALMAGO et al., 2009; 2010; MARTORANO et al., 2009; YUAN et al., 2009) mantendo maior umidade na superfície e favorecendo a ocorrência de diversas reações que contribuem para as perdas por volatilização (por exemplo, hidrólise e conversão de NH₄⁺ para NH₃). Por outro lado, quando a cobertura do solo é inexistente ou pouco expressiva (por exemplo, estádios V4 e V6), a duração da fase 1 de evaporação será reduzida, dando-se início à fase 2 mais cedo do que nos demais estádios

fenológicos do milho (V8, V10 e V12, por exemplo). Nesta segunda fase de evaporação, como a água passa da forma líquida para vapor ainda alguns centímetros abaixo da superfície do solo (FREITAS et al., 2006; JENSEN; BURMAN; ALLEN, 1990), pouco interfere nas reações químicas envolvidas no processo de perdas de amônia (hidrólise, conversão de NH₄⁺ para NH₃, e arraste do NH₃ em solução via evaporação).

Desde que exista umidade suficiente para hidrólise da ureia e evaporação de água do solo, o processo de volatilização de amônia geralmente apresenta taxa máxima, dois a quatro dias após a aplicação da ureia (BLACK; SHERLOCK; SMITH, 1987; CANTARELLA et al., 2003b; DA ROS; AITA; GIACOMINI, 2005; FENILLI et al., 2007; HARGROVE, 1988; KHANIF, 1992; LARA CABEZAS; TRIVELIN, 1990; LIGHTENER; MENGEL; RHYKERD, 1990; PEREIRA et al., 2009; TERMAN, 1979; ZHANG et al., 1992). Assim, a ocorrência tardia de chuvas, mesmo que em quantidades consideráveis, não será eficiente na redução das perdas de amônia, pois estas já ocorreram, conforme observado para a aplicação do N nos estádios V6, V8 e V10, na safra 2011/12, e V10 na safra 2012/13. Black, Sherlock e Smith (1987) também constataram que a aplicação de água 48 horas após a aplicação da ureia em solo úmido não foi eficiente para reduzir as perdas de amônia, pois quantidades substanciais de NH₃ já haviam sido volatilizadas.

2.3.2 Acúmulo de fitomassa seca e nitrogênio na parte aérea

Não houve diferenças entre os tratamentos quanto ao acúmulo de fitomassa seca nos diversos estádios fenológicos do milho em ambas as safras (Tabela 2), indicando que a ausência de aplicação de N em cobertura ou a época de realização da mesma não foram fatores limitantes para a produção de fitomassa seca (Figura 4) no local em que foram desenvolvidos os experimentos.

A quantidade de N acumulado em cada fração da planta nos diversos estádios fenológicos (Tabela 3) diferiu entre os tratamentos em algumas situações. Para a amostragem em V8, na safra 2012/13, observou-se maior acúmulo de N nas folhas apenas com coberturas nitrogenadas em V4 e V6, tratamentos esses em que já havia sido realizada a aplicação de ureia em cobertura, demonstrando que parte do N aplicado já havia sido absorvida pelas plantas. Quando realizada a amostragem das plantas no estádio V12, observou-se, nas duas safras, que a quantidade de N acumulado nas folhas e no colmo foi menor apenas nos tratamentos que não receberam N em cobertura até este momento (controle e aplicação em

V12). Isto evidencia a eficiência das adubações nitrogenadas em aumentar o acúmulo de N na planta, poucos dias após a aplicação.

Para o N acumulado nas folhas (safra 2011/12) e no colmo (safra 2012/13) no estádio R1, menores valores foram observados no tratamento controle, indicando efeito positivo da aplicação de N em cobertura no N acumulado, independente da época de aplicação. Para a safra 2011/12, nos estádios R3 e R6, o N acumulado nas folhas foi maior com a fertilização nitrogenada em V4 e V6, respectivamente, embora os tratamentos tenham diferido apenas do controle. Para o N total acumulado nas plantas no estádio R6, apenas a aplicação de N em cobertura no estádio V6 foi superior ao controle. Na safra 2012/13, o N acumulado nas folhas em R3 foi menor no controle comparado aos tratamentos V4 e V6. Nesta mesma safra, o N acumulado no colmo nos estádios R3 e R6 foi menor nos tratamentos V12 e controle, respectivamente, enquanto o N total acumulado não diferiu entre os tratamentos.

Embora no tratamento controle tenham sido aplicados 30 kg ha⁻¹ de N na semeadura, essa quantidade pode ser considerada insuficiente para garantir o bom desenvolvimento da cultura em solos com baixa disponibilidade de N, pois equivaleu a apenas 20 e 16 % da quantidade média de N acumulada pela parte aérea das plantas ao final do ciclo, respectivamente, nas safras 2011/12 e 2012/13. Assim, como houve diferenças entre a quantidade de N acumulado pelo controle e alguns tratamentos, na maioria das avaliações realizadas, e ao final do ciclo, essas diferenças se tornaram irrisórias ao ponto de não serem significativas, pode-se afirmar que o solo da área experimental foi um bom fornecedor de N às plantas. É provável que o fornecimento de N às plantas no controle foi lento, mas contínuo, a ponto de equivaler-se aos demais tratamentos ao final do ciclo da cultura. Esta capacidade do solo em fornecer N pode estar relacionada ao considerável teor de matéria orgânica tanto na camada de solo de 0-20 cm (29,5 g kg⁻¹) como na camada de 20-40 cm (23 g kg⁻¹) e, principalmente, à elevada capacidade de mineralização da matéria orgânica, responsável pela disponibilização das formas de N mineral, passíveis de absorção e utilização pelas plantas.

Tabela 2 - Produção de fitomassa seca (kg ha⁻¹) de folhas (F), colmo (C), sabugo (S) e grãos (G) em diversos estádios fenológicos do milho em função da época de aplicação de ureia em cobertura nas safras 2011/12 e 2012/13

	Estádio Fenológico																
Época de	V4	V	′8	V	12		R1			R	3		R6				
aplicação [†]	Fração da planta																
	F	F	C	F	C	F	C	S	F	C	S	G	F	C	S	G	Total ‡
									Safra 2	011/12							
Controle	160	1469	206	3800	1549	5373	3972	111	6357	4522	1302	1902	4582	3119	1232	6790	15723
V4	150	1410	197	4035	1767	6180	4644	140	7173	4894	1621	2790	5301	4130	1500	8295	19226
V6	162	1425	204	3826	1559	5864	4271	108	7422	5073	1569	2286	5316	4165	1562	7659	18702
V8	183	1488	232	3753	1466	5424	3773	77	7212	5195	1395	1911	4846	3562	1296	5698	15402
V10	168	1531	221	3996	1574	5810	4209	148	7297	4846	1620	2635	5113	3768	1516	9467	19864
V12	146	1440	175	3813	1561	5653	3931	128	6845	4672	1520	2229	5197	3662	1532	8460	18851
Valor de F	0,78	0,34	0,48	0,82	0,93	2,09	1,75	1,71	1,33	0,42	1,05	0,98	1,44	1,39	2,34	2,08	2,12
C.V. (%)	19	11	28	7	13	7	11	33	10	16	17	32	10	18	13	24	17
									Safra 2	012/13							
Controle	94	981	50	2852	943	5390	3534	130	7200	4265	1893	4012	4563	3193	1574	10579	19908
V4	97	1115	92	3467	1309	6115	4164	192	7098	4519	1825	4045	4714	3650	1611	11013	20987
V6	97	1022	60	3132	1135	6021	4075	173	7661	4524	1965	4296	4838	3810	1627	10909	21184
V8	107	995	50	2929	1018	5434	3617	189	6955	4242	1925	4010	4412	3236	1587	10764	19998
V10	93	922	41	3045	1058	5748	3681	192	7309	4447	1872	3944	4638	3454	1639	11178	20909
V12	89	791	38	2841	952	5540	3525	179	6933	4065	1791	3983	4654	3118	1562	11491	20825
Valor de F	0,98	1,53	2,68	2,23	1,90	1,59	2,39	0,68	2,35	2,03	0,71	0,25	0,57	2,31	0,28	0,86	0,59
C.V. (%)	13	18	45	10	19	9	10	32	5	6	8	12	8	11	7	6	7

[†] As épocas de aplicação da ureia foram representadas pelo estádio fenológico em que a cultura se encontrava no momento da aplicação. Controle indica ausência de aplicação de ureia em cobertura no milho.

[‡] Soma das frações da planta no estádio R6.

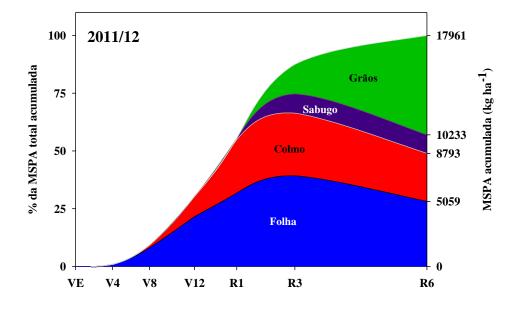
Tabela 3 - Nitrogênio acumulado (kg ha⁻¹) em folhas (F), colmo (C), sabugo (S) e grãos (G) em diversos estádios fenológicos do milho em 🛱 função da época de aplicação de ureia em cobertura nas safras 2011/12 e 2012/13

	Estádio Fenológico																
Época de	V4	V8	3	V	12		R1 R3					R6					
aplicação [†]	Fração da planta																
	F	F	C ‡	F	C	F	C	S	F	C	S	G	F	С	S	G [‡]	Total ‡
	Safra 2011/12																
Controle	6,0	39,4	4,3	66,3 b	12,0 c	64,3 c	25,6	2,8	61,2 b	17,9	11,4	27,3	40,9 b	15,2	8,5	85,7	150,2 b
V4	5,8	44,3	4,5	95,1 a	19,9 a	114,9 a	32,8	3,8	99,4 a	23,7	12,0	40,0	50,0 ab	24,0	10,5	115,7	200,3 ab
V6	5,4	41,6	4,9	89,0 a	17,8 ab	97,2 ab	31,1	3,1	98,6 a	29,1	14,6	35,6	55,5 a	25,9	11,6	125,6	218,6 a
V8	6,1	39,4	4,9	86,3 a	17,8 ab	79,5 bc	28,2	2,2	86,8 ab	24,9	12,1	29,1	55,2 a	23,8	8,7	78,9	166,6 ab
V10	5,4	37,8	4,4	88,7 a	15,1 abc	86,9 abc	28,1	3,9	90,5 ab	27,3	12,8	39,9	53,5 ab	21,3	11,0	131,7	217,4 ab
V12	5,1	35,8	3,4	79,4 ab	12,9 bc	87,4 abc	30,3	3,6	88,1 ab	23,8	13,0	34,1	49,9 ab	18,0	11,7	110,5	190,1 ab
Valor de F	0,49	0,84	0,69	5,78*	7,64*	$7,07^{*}$	0,25	2,15	4,58*	1,36	0,7	0,96	3,55*	1,95	0,88	3,30*	3,55*
C.V. (%)	20	16	31	10	14	15	35	28	15	27	21	32	11	27	29	22	15
								Saf	fra 2012/1	3							
Controle	3,2	19,0 b	1,0	54,6 c	11,3 b	93,1	22,1 b	3,8	90,7 b	19,8 ab	10,1	49,7	35,3	10,6 b	6,6	129,6	182,1
V4	3,7	33,9 a	2,0	87,8 a	18,2 a	108,4	31,3 a	5,3	118,8 a	21,2 ab	10,8	56,2	45,5	15,1 a	6,8	127,6	195,1
V6	3,5	33,3 a	1,6	76,9 ab	16,7 ab	111,8	31,8 a	4,6	121,5 a	22,8 a	10,5	58,0	43,4	16,3 a	7,6	130,7	198,1
V8	3,8	21,8 ab	1,0	64,3 bc	12,5 ab	95,2	25,7 ab	5,0	106,2 ab	21,2 ab	12,0	55,6	39,0	15,2 a	8,3	121,9	184,4
V10	3,4	20,5 b	0,8	63,5 bc	12,9 ab	103,1	29,1 ab	5,1	113,4 ab	19,9 ab	12,4	56,0	39,3	15,8 a	9,0	135,6	199,7
V12	3,2	17,0 b	0,8	60,4 bc	10,9 b	92,6	26,2 ab	5,1	103,8 ab	17,9b	11,9	54,8	41,8	13,4 ab	8,8	145,7	209,8
Valor de F	0,72	7,68*	3,47*	10,96*	5,06*	1,77	4,45*	0,68	3,75*	4,33*	1,94	0,75	1,68	5,14*	2,65	2,56	1,83
C.V. (%)	16	22	45	11	19	12	13	28	11	8	12	12	14	13	16	8	8

Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de significância. [‡] As letras de comparação de médias do teste Tukey não foram apresentadas, pois, embora o teste F tenha indicado diferença entre as épocas de aplicação, o teste Tukey indicou igualdade entre elas.

[†] As épocas de aplicação da ureia foram representadas pelo estádio fenológico em que a cultura se encontrava no momento da aplicação. Controle indica ausência de aplicação de ureia em cobertura no milho. ‡ Soma das frações da planta no estádio R6.

^{*} significativo pelo teste F com $p \le 0.05$.



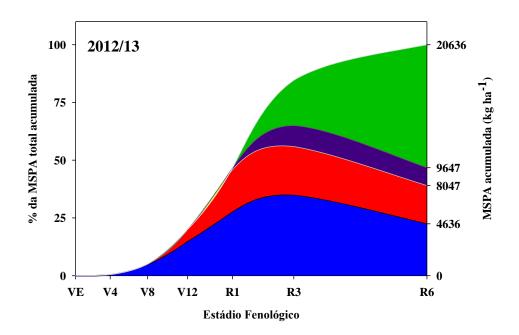


Figura 4 - Acúmulo de fitomassa seca da parte aérea (MSPA) da cultura do milho em diferentes estádios fenológicos nas safras 2011/12 e 2012/13. Médias de seis tratamentos

É importante ressaltar que embora as quantidades de N acumulado pelas plantas no tratamento controle tenham sido menores que nos tratamentos que receberam a aplicação de ureia em cobertura, o menor acúmulo não foi limitante à produção de fitomassa seca da parte aérea. Portanto, em todos os tratamentos, é provável que as concentrações de N no tecido vegetal tenham sido suficientes para o bom desenvolvimento da cultura. O adequando fornecimento de N ao milho desde o início de seu desenvolvimento é fundamental para a obtenção de elevadas produtividades, pois o potencial produtivo da cultura é determinado quando as plantas são jovens. De acordo com Fancelli e Dourado Neto (2004), o potencial de produção do milho é definido entre os estádios V4 e V6, e a confirmação do número de fileiras por espiga entre V7 e V9. Portanto, em casos que o fornecimento de N à cultura (oriundo do solo ou da adubação de semeadura) é limitado, não é recomendada a realização da adubação de cobertura em estádios mais tardios que os anteriormente mencionados.

Vale ressaltar que no estádio V12, na média de todos os tratamentos, a cultura já havia acumulado aproximadamente 53 e 42 % do N total acumulado ao final do ciclo, nas safras 2011/12 e 2012/13, respectivamente. Juntamente com a observação das taxas de acúmulo de N (Figura 5), isto vem confirmar a elevada necessidade de N no início do desenvolvimento do milho, mas com correto fornecimento do nutriente à cultura, mesmo após o florescimento.

A disponibilidade de N à cultura após o florescimento é fundamental para a manutenção da atividade fotossintética das folhas por maior período, assegurando o *stay-green*. Quando a absorção de N após o florescimento é limitada, a remobilização de N de órgãos vegetativos (folhas e colmos) para reprodutivos (grãos) se faz necessária (HE; ZHOU; JIN, 2005; NING et al., 2013; PEARSON; JACOBS, 1987; POMMEL et al., 2006), diminuindo a vida útil fotossintética das folhas (WOLFE et al., 1988).

Com base nas curvas de taxa de acúmulo de fitomassa seca (Figura 6) na parte aérea do milho, para cada tratamento, bem como nas taxas máximas de acúmulo (TMA-MS) e o tempo em dias em que ocorreram essas taxas (Tabela 4), observou-se que a aplicação precoce de N em cobertura (V4 e/ou V6) proporcionou maior TMA-MS, bem como antecipou a ocorrência desta. As TMA-MS variaram de 266 a 326 kg ha⁻¹ dia⁻¹ (V4) na safra 2011/12 e de 353 a 389 kg ha⁻¹ dia⁻¹ na safra 2012/13, estando estes valores dentro do intervalo de 250 a 530 kg ha⁻¹ dia⁻¹ observado por Fischer e Palmer (1980), em variadas condições climáticas. Segundo Lucchesi (1984), a taxa de acúmulo de fitomassa seca representa o incremento de matéria seca por unidade de tempo, e é classificada como produtividade primária liquida.

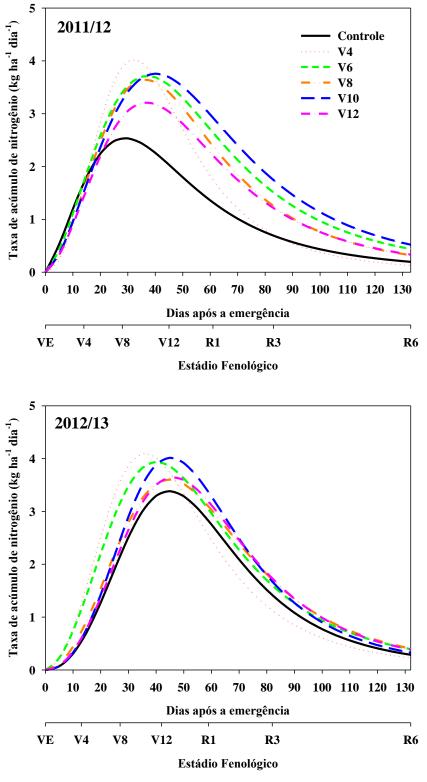
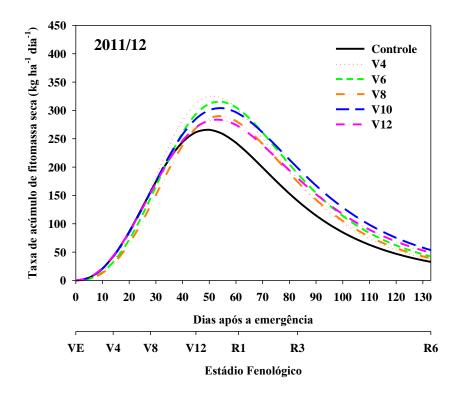


Figura 5 - Taxa de acúmulo de nitrogênio na parte aérea do milho durante o ciclo da cultura em função de épocas de aplicação de ureia em cobertura (representadas pelos estádios fenológicos V4, V6, V8, V10 e V12) ou ausência de aplicação (controle) nas safras 2011/12 e 2012/13



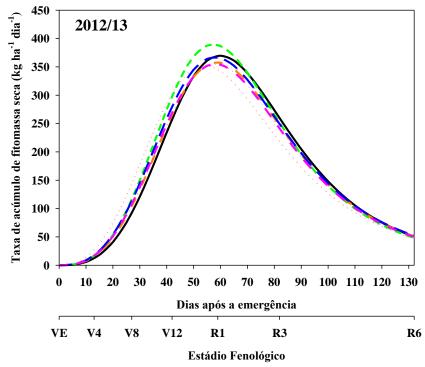


Figura 6 - Taxa de acúmulo de fitomassa seca da parte aérea do milho durante o ciclo da cultura em função de épocas de aplicação de ureia em cobertura (representadas pelos estádios fenológicos V4, V6, V8, V10 e V12) ou ausência de aplicação (controle) nas safras 2011/12 e 2012/13

Tabela 4 - Taxa máxima de acúmulo de fitomassa seca (TMA-MS, em kg ha⁻¹ dia⁻¹), dias após a emergência para a ocorrência da TMA-MS (DAE-MS), taxa máxima de acúmulo de nitrogênio (TMA-N, em kg ha⁻¹ dia⁻¹) e dias após a emergência em que ocorreu a TMA-N (DAE-N), em função da época de aplicação de ureia em cobertura na cultura do milho nas safras 2011/12 e 2012/13

Émana da ambanasa †	TMA-MS	DAE-MS	TMA-N	DAE-N		
Época de aplicação †	Safra 2011/12					
Controle	266	49	2,5	29		
V4	326	51	4,0	32		
V6	316	54	3,7	37		
V8	290	54	3,6	36		
V10	304	54	3,8	40		
V12	284	53	3,2	37		
	Safra 2012/13					
Controle	370	60	3,4	45		
V4	353	54	4,1	36		
V6	389	57	3,9	40		
V8	358	59	3,6	45		
V10	367	58	4,0	45		
V12	354	58	3,6	46		

[†] As épocas de aplicação da ureia foram representadas pelo estádio fenológico em que a cultura se encontrava no momento da aplicação. Controle indica ausência de aplicação de ureia em cobertura no milho.

Para o acúmulo de N (Figura 5), as maiores taxas máximas de N (TMA-N) foram observadas quando o N foi aplicado no estádio V4 (Tabela 4), tratamento esse que proporcionou a antecipação da ocorrência da TMA-N quando comparado às demais épocas de aplicação do N. Os valores de TMA-N variaram de 2,5 a 4,0 kg ha⁻¹ dia⁻¹ de N, na safra 2011/12 e de 3,4 a 4,1 kg ha⁻¹ dia⁻¹ de N na safra 2012/13.

Gava (2003), avaliando doses de N na cultura do milho, também observou que as TMA-MS ocorreram por volta de 50 DAE, com valores variando de 233 a 401 kg ha⁻¹ dia⁻¹. Para nitrogênio, as TMA-N ocorreram entre 30 e 40 DAE, e apresentaram valores de 3,65 a 6,47 kg ha⁻¹ dia⁻¹ de N. O autor também observou que, de maneira geral, tanto para fitomassa seca como para N, as TMA aumentaram com as doses de N, sendo as menores observadas no tratamento controle (sem aplicação de N), a semelhança do observado neste estudo.

Outro ponto importante que pode ser observado nas curvas das taxas de acúmulo de fitomassa seca e N, é que o TMA-N ocorreu, em média, 16 dias antes da TMA-MS. Para o N, a TMA foi observada entre os estádios V8 e V12, enquanto para a fitomassa seca, a TMA ocorreu entre os estádios V12 e R1, demonstrando que, nas condições em que foram

desenvolvidos os experimentos, o fornecimento de N para a cultura do milho não deve ser realizado tardiamente (estádios V10 e V12).

Foram constatadas diferenças entre os tratamentos na porcentagem de N remobilizado das folhas e dos colmos após o florescimento (Tabela 5). Nas duas safras agrícolas, os maiores valores de N total remobilizado (soma de folhas e colmos) foram observados com aplicação do N em cobertura nos estádios V4 e V6, que também proporcionaram, de maneira geral, maior acúmulo de N antes do florescimento. Esta associação entre o N remobilizado e o acúmulo de N nos estádios vegetativos foi observada por Coque e Gallais (2007), assim como, por Ciampitti e Vyn (2013), que relataram ser o N acumulado em pré-florescimento o principal controlador do processo de remobilização, mas a força do dreno (grãos) também parece ter um papel importante, principalmente quando a demanda não é satisfeita pela absorção de N durante o enchimento dos grãos. Neste estudo, como a massa seca de grãos ao final do ciclo não diferiu entre os tratamentos, pode-se considerar que a força do dreno foi semelhante e, portanto, o N acumulado no estádio vegetativo deve ter controlado a porcentagem de remobilização do nutriente.

Os resultados de N remobilizado das folhas e dos colmos após o florescimento indicaram que o N foi remobilizado principalmente das folhas (Tabela 5), enquanto o N dos colmos contribuiu em menor proporção para o N dos grãos, como relatado por DeBruin et al. (2013) e Paponov e Engels (2005). Como na safra 2011/12 o tempo de duração das folhas e a produtividade de grãos foram limitadas por incidência de doenças (comentada com mais detalhes no item 2.3.4), o N total remobilizado (NTR) representou, no máximo, 55 % do N total acumulado nos grãos. Isto provavelmente ocorreu porque com a menor produção de grãos (dreno) e, considerando taxas semelhantes de absorção de N após o florescimento nas duas safras (Figura 5), houve menor necessidade de remobilização para satisfazer a demanda de N pelos grãos. Uhart e Andrade (1995) também encontraram menor remobilização de N quando houve redução do dreno. Em condições de limitação do dreno (menor número de grãos por planta, por exemplo), a remobilização de N parece ser mais afetada que a sua absorção após o florescimento (COQUE; GALLAIS, 2007).

Tabela 5 - Nitrogênio remobilizado das folhas (NRF) e dos colmos (NRC), total remobilizado – soma folhas e colmo (NTR), e nitrogênio absorvido (NAF) pela cultura do milho após o florescimento, expressos em porcentagem da quantidade total acumulada nos grãos ao final do ciclo, em função da época de aplicação de ureia em cobertura na cultura do milho nas safras 2011/12 e 2012/13

T	NRF	NRC	NTR	NAF		
Época de Aplicação † -	Safra 2011/12					
Controle	33,0 ab	11,0	44,0 ab	56,0 ab		
V4	49,5 a	5,3	55,0 a	45,0 b		
V6	46,8 a	7,3	54,0 a	46,0 b		
V8	23,8 b	4,3	28,0 b	72,0 a		
V10	25,8 b	5,5	31,3 ab	68,7 ab		
V12	29,0 ab	3,0	32,3 ab	67,7 ab		
Valor de F	5,79*	1,18	4,86*	4,86*		
C.V. (%)	26	86	27	18		
	Safra 2012/13					
Controle	42,3 bc	9,0 b 54,5 bc		45,5 ab		
V4	61,0 a	16,0 a	76,8 a	23,2 с		
V6	52,5 ab	12,0 ab	64,3 ab	35,7 bc		
V8	46,5 bc	8,5 b	55,0 bc	45,0 ab		
V10	42,0 bc	9,5 b	51,8 bc	48,2 ab		
V12	34,5 c	8,5 b	8,5 b 43,5 c			
Valor de F	9,48*	5,75*	10,28*	10,28*		
C.V. (%)	13	23	12	17		

Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey a 5 % de significância.

Outro fato que merece destaque foi a senescência precoce das folhas devido às doenças que ocorreram na safra 2011/12, que limitaram o acúmulo de N nas folhas, com consequente restrição na remobilização direta do nutriente para os grãos. Na Figura 7 pode-se observar que, praticamente não houve alteração na quantidade de N acumulado nas folhas entre os estádios V12 e R3, e que a remobilização do N desse órgão iniciou-se próximo ao estádio R3.

Na safra 2012/13, o NTR chegou a 76,8 % no tratamento V4, demonstrando a importância da remobilização do nutriente para suprir as necessidades dos grãos, conforme relatado por Ta e Weiland (1992), que obtiveram remobilização de 60 a 85 % do N absorvido antes do florescimento. Na safra 2012/13, a quantidade de N acumulado nas folhas aumentou

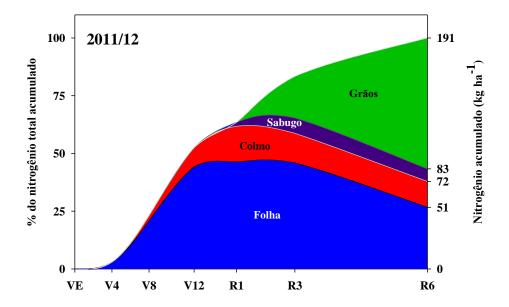
[†] As épocas de aplicação da ureia foram representadas pelo estádio fenológico em que a cultura se encontrava no momento da aplicação. Controle indica ausência de aplicação de ureia em cobertura no milho.

^{*} significativo pelo teste F com $p \le 0.05$.

do estádio R1 para o R3, enquanto que o N acumulado nos colmos diminuiu (Tabela 3). Esse fato evidencia que o N é remobilizado primeiramente dos colmos (TA; WEILAND, 1992), mantendo as folhas verdes por mais tempo (*stay green*). Este efeito é interessante porque as folhas continuam fontossinteticamente ativas (BORREL; HAMMER; OOSTEROM, 2001; MA; DWYER, 1998; RAJCAN; TOLLENAAR, 1999) e podem assegurar o fornecimento de fotoassimilados necessários para o enchimento de grãos.

Como o N acumulado nas folhas aumentou após o florescimento, o método baseado na diferença do N acumulado nas folhas entre os estádios R6 e R1 para estimar a remobilização pode estar subestimando a quantidade remobilizada. Se realizada a estimativa de remobilização com base na diferença do N máximo acumulado nas folhas e o acumulado em R6, este valor poderia ser maior. Por outro lado, é valido lembrar que o método da diferença não considera as perdas de N durante o processo de remobilização. Contudo, diversos trabalhos demonstram que ocorrem perdas foliares de N, principalmente na forma de amônia (FARQUHAR et al., 1980; FARQUHAR; WETSELAAR; FIRTH, 1979; FRANCIS; SCHEPERS; SIMS, 1997; FRANCIS; SCHEPERS; VIGIL, 1993; HOLTAN-HARTWING; BOCKMAN, 1994; STUTTE; WEILAND, 1978; TA; WEILAND, 1992; WEILAND; OMHOLT, 1985). Francis, Schepers e Vigil (1993), utilizando o método da diluição isotópica de ¹⁵N, observaram perdas de N da parte aérea de plantas de milho após o florescimento, variando de 45 a 81 kg ha⁻¹. Assim, se consideradas as perdas foliares de N, a contribuição do N remobilizado poderia ser menor do que a estimada neste trabalho e, a contribuição do N absorvido após o florescimento, maior.

É sabido que a formação de NH₃ é dependente do pH do meio e da concentração de NH₄⁺. Além de serem absorvidas diretamente do solo, as formas amoniacais de N (NH₃ e NH₄⁺) são produzidas nas plantas por diversos processos metabólicos, tais como, redução do nitrato, fixação de nitrogênio atmosférico e fotorrespiração (HIREL; LEA, 2001; HOLTAN-HARTWING; BOCKMAN, 1994; SOMMER; SCHJOERRING; DENMEAD, 2004). Além disso, o amônio também pode ser liberado durante a reassimilação de compostos nitrogenados de transporte (asparagina, glutamina, arginina, e ureídeos) e por meio da quebra de outros compostos nitrogenados durante a senescência e remobilização (RAVEN, 1988; SOMMER; SCHJOERRING; DENMEAD, 2004; STEWART; SUMAR; PATEL, 1987). Se o NH₃ no interior da planta não for rapidamente assimilado, poderá então ser perdido para a atmosfera junto à corrente transpiratória (FRANCIS; SCHEPERS; SIMS, 1997).



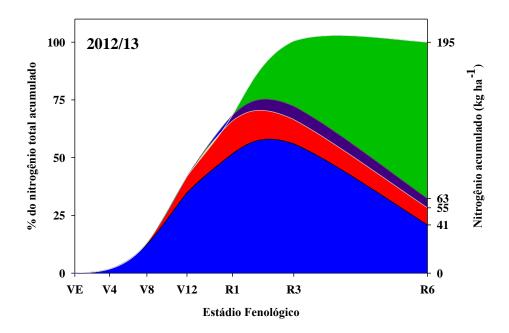


Figura 7 - Acúmulo de nitrogênio na parte aérea da cultura do milho em diferentes estádios fenológicos nas safras 2011/12 e 2012/13. Médias de seis tratamentos

Considerando que a absorção de N pelo milho ocorre até próximo à fase de maturação fisiológica (BENDER et al., 2013; KARLEN; FLANNERY; SADLER, 1988), mesmo que em pequenas taxas, e que na safra 2012/13 o N acumulado em toda a parte aérea atingiu seu máximo próximo ao estádio R3 e apresentou pequena diminuição no estádio R6 (média de todos os tratamentos), fica evidente a perda de N pela parte aérea da cultura. Como ocorre absorção de N após o R3 e não houve aumento no acúmulo, pode-se considerar que parte do N da parte aérea das plantas foi perdida para a atmosfera em taxas muito próximas às de absorção do nutriente neste período. Cantarella e Duarte (2004) fizeram inferências que as perdas de N pelas plantas podem ocorrer durante todo o ciclo da cultura, porém, são observadas apenas a partir do momento em que superarem as taxas de absorção de N. Isto foi comprovado no estudo realizado por Francis, Schepers e Vigil (1993), os quais relataram que a quantidade de N acumulado na parte aérea de plantas de milho praticamente não variou entre os estádios R2 e R6. Contudo, a quantidade de N proveniente do fertilizante marcado com ¹⁵N diminuiu.

Hay, Eatley e Deturk (1953) também citaram que a perda inevitável de material (folhas, por exemplo) no momento da coleta no campo, principalmente no estádio de maturação fisiológica, pode levar a erros na quantificação do N remobilizado das folhas, superestimando os valores de remobilização.

Convertendo-se a porcentagem de N absorvido após o florescimento para kg ha⁻¹, obtém-se valores de 29,6 até 90,5 kg ha⁻¹ de N, respectivamente, no caso da aplicação de N em V4 na safra 2012/13 e V10 na safra 2011/12. Como comentado anteriormente, se consideradas as perdas de N pela parte aérea, esse valor poderá ser maior, indicando a necessidade de bom fornecimento de N após o florescimento, quando se objetiva elevada produtividade de grãos e o acúmulo de N no estádio vegetativo for limitado.

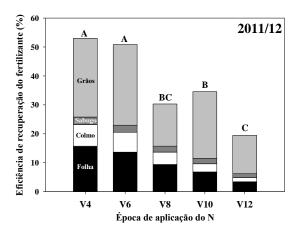
2.3.3 Recuperação do N do fertilizante

As aplicações de ureia em cobertura no milho nos estádios vegetativos V4 ou V6, em ambas as safras, proporcionaram as maiores recuperações do N do fertilizante quando comparadas aos demais tratamentos (Figura 8). Um fator que pode ter contribuído para a menor eficiência de recuperação do fertilizante (ERF) quando o N foi aplicado tardiamente é a quantidade de amônia volatilizada, que foi maior nos estádios V10 e V12 (Figura 2). Contudo, mesmo subtraindo-se a quantidade de N perdido por volatilização e assumindo-se a diferença entre o aplicado e o volatilizado como a dose efetiva de N do fertilizante

disponibilizada para a cultura, ainda se obtém valores de ERF de 53, 57, 36, 47 e 30 % na safra 2011/12 e 48, 53, 39, 44 e 26 % na safra 2012/13, respectivamente, com a ureia aplicada em V4, V6, V8, V10 e V12. Desse modo, mesmo com a correção da dose efetiva de N disponibilizada para a cultura, a ERF manteve o mesmo comportamento, sendo maior quando o fertilizante foi aplicado em V4 ou V6. Isto vem demonstrar que a perda por volatilização não foi o único fator que influenciou na diferença entre a ERF dos tratamentos, e que a época de aplicação é primordial para a recuperação do fertilizante pela cultura do milho.

Diversos valores de ERF na cultura do milho têm sido relatados, variando de 19 (GAVA et al., 2010) a 89 % (LARA CABEZAS; COUTO, 2007). Além das diferenças edafoclimáticas (HAUCK, 1973; TORBERT et al., 1992), essas variações na ERF geralmente estão associadas à fonte de N utilizada (LANGE; LARA CABEZAS; TRIVELIN, 2008; 2010; LARA CABEZAS; COUTO, 2007; LARA CABEZAS et al., 2004; 2005), ao sistema de manejo do solo adotado (GAVA et al., 2006), a forma e a época de aplicação do fertilizante (CANTARELLA et al., 2003a; DUETE et al., 2008; LANGE; LARA CABEZAS; TRIVELIN, 2008; 2010; LARA CABEZAS; COUTO, 2007; LARA CABEZAS et al., 2005), além da dose de N empregada (DUETE et al., 2008; GAVA et al., 2010; LIANG; MACKENZIE, 1994; SANCHEZ; BLACKMER, 1988; SCIVITTARO et al., 2003; SILVA et al., 2006; TIMMONS; BAKER, 1992; WALTERS; MALZER, 1990).

A diminuição da ERF nas aplicações mais tardias de N pode estar relacionada ao fato que, até o momento da aplicação do fertilizante nitrogenado em cobertura, as plantas foram supridas unicamente pelo N do solo e/ou da adubação de semeadura, enquanto nas aplicações mais precoces (V4 e V6) o N do fertilizante pode ter sido absorvido antecipadamente, resultando em maior ERF. Por exemplo, na média de todos os tratamentos com aplicação de N em cobertura, 49,5 e 40,1 kg ha⁻¹ de N foram acumulados pela cultura entre os estádios V4 e V12, respectivamente, nas safras 2011/12 e 2012/13. Duete et al. (2008), avaliando doses e formas de parcelamento da adubação nitrogenada em milho, também observaram que as aplicações em estádios mais avançados de desenvolvimento da cultura (após V8) não aumentaram o aproveitamento do fertilizante.



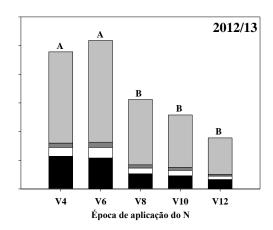
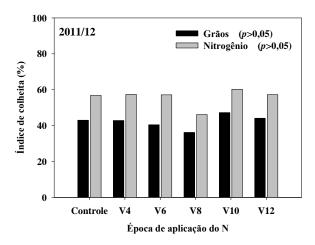


Figura 8 - Eficiência de recuperação do fertilizante pela planta em função da época de aplicação (estádios fenológicos) de ureia em cobertura na cultura do milho (safras 2011/12 e 2012/13). Em cada safra, colunas com letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey (*p*≤0,05). Os coeficientes de variação para as safras 2011/12 e 2012/13 foram de 14 e 20 %, respectivamente

Analisadas as taxas de acúmulo de N durante o ciclo da cultura (Figura 5), observa-se que as aplicações em V4 ou V6 coincidiram com a época de acelerado aumento nesta taxa. Esse fato corrobora com os estudos de Amado, Mielniczuk e Aita (2002), Silva et al. (2005a) e Villas Bôas et al. (1999), que verificaram o maior aproveitamento do N como sendo resultado da sincronização entre o fornecimento e o período de alta demanda do nutriente. Também é valido lembrar que em estádios mais tardios o sistema radicular da cultura está mais desenvolvido, tornando a cultura menos dependente do N-fertilizante devido à exploração de maior volume de solo.

Quanto à alocação do N do fertilizante na planta, observa-se que, na média de todos os tratamentos, 58 e 70 % do N-fertilizante recuperado pela planta foram alocados nos grãos nas safras 2011/12 e 2012/13, respectivamente. Valores de alocação do N-fertilizante nos grãos próximos a 70 % também foram relatados por Duete et al. (2008), Gava et al. (2010) e Lange, Lara Cabezas e Trivelin (2010). Com a observação dos valores de índice de colheita (IC) de N em cada uma das safras (Figura 9), nota-se que os valores de N-fertilizante alocado nos grãos e IC de N são muito próximos, indicando que não houve distinção pela planta quanto à alocação preferencial do N nativo do solo ou do fertilizante.



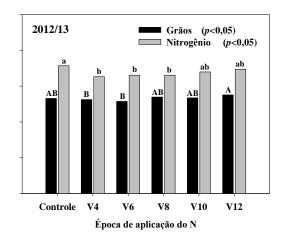
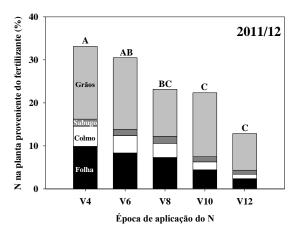


Figura 9 - Índice de colheita de grãos e de nitrogênio da cultura do milho nas safras 2011/12 e 2012/13 em função da época de aplicação (estádios fenológicos) de ureia em cobertura. Controle indica ausência de realização de fertilização nitrogenada de cobertura. Colunas com letras distintas (maiúsculas para grãos e minúsculas para nitrogênio) diferem entre si pelo teste de Tukey (*p*≤0,05). Os coeficientes de variação para índice de colheita de grãos foram 12 e 2 % e para índice de colheita de nitrogênio 11 e 3 % nas safras 2011/12 e 2012/13, respectivamente

Como o N total acumulado pela planta não diferiu entre as épocas de aplicação do N em cobertura (Tabela 3), o N na planta proveniente do fertilizante (NPPF) seguiu o mesmo comportamento da eficiência de recuperação do fertilizante (Figura 10), ou seja, maiores valores com a aplicação do N nos estádios V4 e V6, e diminuição do NPPF com as aplicações mais tardias. Os valores máximos para NPPF foram de 33,1 e 31,7 % do N total acumulado pela parte aérea do milho, e os mínimos de 12,9 e 12,0 %, nas safras 2011/12 e 2012/13, respectivamente.

Os baixos valores de porcentagem do NPPF evidenciam que o fertilizante nitrogenado não foi a principal fonte de N para a cultura, sendo o N proveniente de outras fontes (principalmente do solo), responsável pelo fornecimento de até 88 % do N acumulado pelas plantas, de modo semelhante ao relatado por Duete et al. (2008) e Gava et al. (2006).



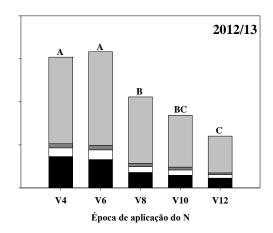


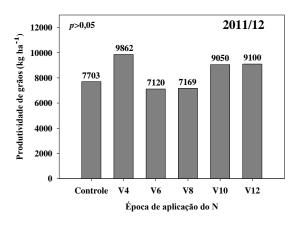
Figura 10 - Nitrogênio na planta proveniente do fertilizante em função da época de aplicação (estádios fenológicos) de ureia em cobertura na cultura do milho (safras 2011/12 e 2012/13). Em cada safra, colunas com letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey (*p*≤0,05). Os coeficientes de variação para as safras 2011/12 e 2012/13 foram de 14 e 17 %, respectivamente

Como o N do fertilizante apresenta grande interação com o N orgânico do solo (POWLSON; BARRACLOUGH, 1993; SCIVITTARO et al., 2003), é possível que a eficiência do fertilizante seja maior que sua recuperação pela planta ao final do ciclo. Nessa interação, conhecida como "pool substitution", parte do N do fertilizante é imobilizada pela biomassa microbiana do solo e, em contrapartida, parte do N orgânico do solo é mineralizada, podendo então, ser absorvida pelas plantas (RAO et al., 1992). Outro fato que também pode subestimar a eficiência de uso do fertilizante pelas plantas é a possibilidade de trocas gasosas (absorção e perdas) de N via foliar, principalmente após o florescimento. Nesse caso, o N do fertilizante absorvido pelas raízes é assimilado e participa de diversas reações na planta e, posteriormente, é perdido para a atmosfera através das folhas. Assim, devido às perdas foliares que, em alguns casos podem ser elevadas, levanta-se a hipótese de que a necessidade de N pela cultura seja maior do que aquela estimada pelo acúmulo final.

2.3.4 Produtividade de grãos e índice de colheita

A produtividade de grãos não diferiu entre os tratamentos nas safras 2011/12 e 2012/13 (Figura 11), embora tenha sido observada maior variação entre os tratamentos na safra 2011/12. Na média de todos os tratamentos, a produtividade de grãos foi de 8334 e 10848 kg ha⁻¹, respectivamente, nas safras 2011/12 e 2012/13. A menor produtividade na

primeira safra, provavelmente foi resultado da elevada incidência de doenças na cultura (Apêndice D), principalmente a diplodia (*Stenocarpella maydis* e *Stenocarpella macrospora*). A incidência de doenças também proporcionou elevada variação não controlada (erro experimental), impossibilitando a ocorrência de diferenças significativas mesmo entre a menor (7120 kg ha⁻¹) e a maior produtividade de grãos (9862 kg ha⁻¹). A diplodia pode atacar tanto as folhas da cultura (apenas *Stenocarpella macrospora*) como também causar a podridão branca da espiga (*Stenocarpella maydis* e *Stenocarpella macrospora*), e nesse último caso, as espigas se tornam mais leves, podendo em casos severos, tornarem-se totalmente apodrecidas (COSTA; CASELA; COTA, 2009) e comprometer expressivamente a produtividade. Na segunda safra, o controle fitossanitário realizado (Apêndice B) foi eficiente no controle de doenças, não sendo observados sintomas severos como na primeira safra.



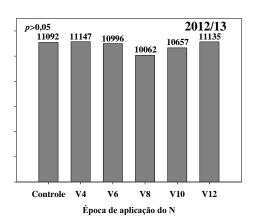


Figura 11 - Produtividade de grãos em função da época de aplicação (estádios fenológicos) de ureia em cobertura na cultura do milho (safras 2011/12 e 2012/13). Controle indica ausência de realização de fertilização de cobertura com nitrogênio. *p*>0,05 = não houve efeito significativo dos tratamentos. Os coeficientes de variação para as safras 2011/12 e 2012/13 foram de 17 e 6 %, respectivamente

Ausência de aumento na produtividade de grãos com a aplicação de N como a verificada neste trabalho, também foi relatada por González Villalba (2014), no mesmo local experimental, avaliando misturas de ureia revestida com polímeros e ureia convencional para aplicação no momento da semeadura do milho. O autor constatou na safra 2012/13 que a produtividade do tratamento controle (10100 kg ha¹) foi semelhante à produtividade obtida quando aplicados 180 kg ha¹ de N na forma de ureia recoberta por polímeros (10750 kg ha¹) ou ureia convencional (9840 kg ha¹), propondo a hipótese de que o solo apresentava alto potencial de mineralização de N. Considerando a possibilidade do alto potencial, é provável que, no presente trabalho, o solo tenha sido um bom fornecedor de N à cultura, e que, embora tenha sido observado menor acúmulo inicial de N na parte aérea do milho, no tratamento controle, a disponibilidade do nutriente não limitou a produtividade de grãos. Como o potencial de mineralização de N está relacionado com a oxidação da matéria orgânica e, segundo Muzilli (1983), essa é maior em preparo convencional do solo em comparação ao plantio direto, é provável que o revolvimento do solo no local dos experimentos nas duas safras, também possa ter contribuído para aumentar a disponibilidade N às plantas.

Apesar de serem comuns trabalhos que obtiveram aumento na produtividade de grãos com a aplicação de N em milho (AMADO et al., 2013; AMARAL FILHO et al., 2005; ARAÚJO; FERREIRA; CRUZ, 2004; ARGENTA et al., 2003; OHLAND et al., 2005; PAULETTI; COSTA, 2000; PÖTTKER; WIETHÖLTER, 2004; RAMBO et al., 2007; SANGOI; ERNANI; SILVA, 2007; SANTOS et al., 2010; 2013a; 2013b; SILVA et al., 2005c; 2007; 2011; SILVA; LIBARDI; FERNANDES, 2009; SOUZA et al., 2001; VILLAS BÔAS et al., 1999), também são encontrados relatos em condições brasileiras em que o incremento na produtividade em resposta à adubação nitrogenada é baixo (AMARAL FILHO et al., 2005; GOES et al., 2013; GOMES et al., 2007; OHLAND et al., 2005; PAULETTI; COSTA, 2000; SORATTO et al., 2010), ou até mesmo insignificante (CASAGRANDE; FORNASIERI FILHO, 2002; CAVALLET et al., 2000; GOES et al., 2012; LANGE; LARA CABEZAS; TRIVELIN, 2009; SOUZA et al., 2003).

A falta de resposta da cultura à aplicação de N ocorre quando o fator limitante à produtividade não é a disponibilidade de N, mas outro fator qualquer. Amado et al. (2013) avaliaram doses de N na semeadura do milho em duas safras com condições climáticas distintas e observaram, na safra em que a pluviosidade atendeu as necessidades da cultura, que a resposta às doses de N foi mais acentuada (aumento de 4241 kg ha⁻¹ com aplicação de 180 kg ha⁻¹ de N em relação ao tratamento sem aplicação de N, que havia produzido 8657 kg ha⁻¹). Entretanto, na safra em que houve déficit hídrico, o ganho máximo em produtividade

com a aplicação de N foi de 1885 kg ha⁻¹, tendo o tratamento sem aplicação de N produzido 3226 kg ha⁻¹. Assim, de acordo com esses mesmos autores, a obtenção de elevadas produtividades de grãos e maiores probabilidades de reposta da cultura às doses de N está associada com a disponibilidade de água no solo e aos índices pluviométricos (intensidade e distribuição de chuvas). A restrição hídrica também foi citada como possível fator limitante na resposta do milho à adubação nitrogenada por Casagrande e Fornasieri Filho (2002), Goes et al. (2012) e Soratto et al. (2010), que obtiveram produtividades máximas de 5292, 7683 e 4904 kg ha⁻¹, respectivamente, demonstrando a limitação da produção de grãos, mesmo com o fornecimento de N via fertilizantes. Contudo, considerando-se a elevada capacidade de armazenamento de água do solo da área experimental (solo com 53 % de argila) e a distribuição pluviométrica durante o cultivo do milho em ambas as safras (Figura 1), pode-se verificar que não houve restrição hídrica a ponto de limitar a produção de grãos no presente estudo. A boa disponibilidade hídrica pode ser comprovada pelas elevadas produtividades nas safras 2011/12 e 2012/13 (8334 e 10848 kg ha⁻¹, respectivamente), superiores à média do estado de São Paulo (6100 e 6500 kg ha⁻¹, respectivamente), de acordo com levantamento realizado pela CONAB (2013). A unidade federativa com maior produtividade média nestas safras foi o Distrito Federal com 8969 e 9222 kg ha⁻¹, e a média nacional foi de 4481 e 5054 kg ha⁻¹, respectivamente (CONAB, 2013). É valido ressaltar que essas médias consideram apenas o milho de primeira safra (maior potencial produtivo), incluindo lavouras irrigadas ou não.

De modo semelhante a este estudo, trabalhos realizados por Amado et al. (2013), Amaral Filho et al. (2005), Araújo, Ferreira e Cruz (2004), Argenta et al. (2003), Lange, Lara Cabezas e Trivelin (2009), Ohland et al. (2005), Pauletti e Costa (2000) e Sangoi, Ernani e Silva (2007) também obtiveram altas produtividades de grãos (> 8000 kg ha⁻¹) nos tratamentos sem aplicação de N, ou quando este foi aplicado em doses baixas no momento da semeadura (no máximo 42 kg ha⁻¹ de N), sem complementação em cobertura. Cabe ressaltar que esses trabalhos foram desenvolvidos em condições edafoclimáticas distintas: altitudes de 19 a 950 m, textura do solo variando de média (28 % de argila) a muito argilosa (71 % de argila), teores de matéria orgânica de 16 a 54 g kg⁻¹ (na camada de 0-20 cm), em sistemas de plantio convencional ou direto. As variações nas características de solo e clima dificultam a previsão de resposta da cultura do milho à adubação nitrogenada, quando não é possível o acesso ao histórico de cultivo anterior da área.

Contudo, a obtenção de alta produtividade de grãos sem a aplicação de N observada numa determinada safra, pode não ocorrer em outra (AMADO et al., 2013), pois a

disponibilidade de N do solo para a cultura é muito dependente das condições climáticas (pincipalmente pluviosidade e temperatura). Sangoi, Ernani e Silva (2007) conduziram um experimento em solo com alto teor de matéria orgânica (54 g kg⁻¹) durante três safras, mantendo as parcelas com e sem aplicação de N no mesmo local. Estes observaram que a produtividade de grãos do tratamento sem N (controle) diminuiu a cada safra, com valores de 9480, 7480 e 6040 kg ha⁻¹, enquanto a produtividade dos tratamentos com aplicação de N foi 18, 40 e 47% superior ao controle, respectivamente. Desses resultados, concluíram que a resposta da cultura à adubação nitrogenada aumentou, principalmente, devido à diminuição da produtividade do tratamento controle, em reposta ao limitado fornecimento de N pelo solo após cada cultivo. Em adendo, no presente estudo, a localização das parcelas experimentais não foi a mesma nas duas safras, devido ao uso de fertilizante enriquecido com ¹⁵N, que poderia alterar o valores de recuperação do N, devido ao efeito residual.

Como não houve incremento na produtividade com a aplicação de N, também não foi possível identificar a época de realização da adubação nitrogenada que proporcionasse maior produtividade de grãos. Entretanto, como foram verificadas diferenças entre as épocas de aplicação do N em relação à recuperação do fertilizante, é provável, que em condições de baixa disponibilidade de N no solo, a produtividade de grãos se correlacione com a quantidade recuperada do N-fertilizante pela planta, conforme observado por Duete et al. (2008), Fernandes e Libardi (2007), Lange, Lara Cabezas e Trivelin (2010). Assim posto, as aplicações de N nos estádios V4 ou V6 poderiam resultar em maior produtividade de grãos, caso houvesse resposta da cultura a adubação nitrogenada no estudo em questão.

Experimentos realizados com milho de primeira e segunda safra, irrigados ou não, mostram ampla variedade de resultados quanto à melhor época de aplicação do N. Casagrande e Fornasieri Filho (2002) não observaram diferenças na produtividade de grãos quando todo o N (90 kg ha⁻¹) foi aplicado no momento de semeadura ou no estádio de 5-6 folhas, em solo argiloso. De modo semelhante, Escosteguy, Rizzardi e Argenta (1997) aplicaram doses de 80 e 160 kg ha⁻¹ de N em solo argiloso, em única aplicação nos estádios de 4-5, 6-7 ou 8-9 folhas e não observaram diferenças na produtividade de grãos. Pöttker e Wiethölter (2004), ao avaliarem o parcelamento da aplicação de N em cinco safras, relataram diferenças na produtividade de grãos entre a aplicação de 100 kg ha⁻¹ de N no momento da semeadura e o parcelamento (30 kg ha⁻¹ de N na semeadura + 70 kg ha⁻¹ de N em cobertura, 45 dias após a semeadura) apenas em duas safras, nas quais a pluviosidade no período entre a semeadura e a cobertura foi muito elevada. Para as safras com pluviosidades normais para a região, esses mesmo autores observaram produtividades semelhantes com a aplicação da dose integral de N

na semeadura ou com o parcelamento. Esta diferença entre a aplicação de todo o N na semeadura ou em cobertura (estádios de 4 a 8 folhas) também foi relatada por Silva e Silva (2002) em solo franco-arenoso, e Meira et al. (2009), Rozas, Echeverría e Barbieri (2004) e Silva et al. (2005a) em solo argiloso, principalmente em doses menores, sempre com vantagem para a cobertura. Por outro lado, trabalhos como os de Casagrande e Fornasieri Filho (2002), Santos et al. (2010), Silva et al. (2005b) não relataram diferentes produtividades aplicando todo o N na semeadura (doses de 90, 150 e 120 kg ha⁻¹ de N, respectivamente) ou em única cobertura nos estádios V5-6, V4 e V4, respectivamente.

É consenso que a melhor época de aplicação do N na cultura do milho depende de diversos fatores de solo (por exemplo, textura, potencial de imobilização e mineralização de N, umidade), pluviosidade, fonte e doses de N empregadas, dentre outros. Porém, a aplicação do N em cobertura entre os estádios V4 e V8, na maioria das condições edafoclimáticas, parece ser uma boa estratégia de fornecimento de N à cultura, com ressalvas às aplicações mais tardias devido à possibilidade de danos (quebramento) às plantas durante a operação mecanizada de adubação, principalmente com espaçamento entre linhas reduzido (0,5 m, por exemplo). A aplicação de N nesses estádios é interessante, principalmente em condições de limitado fornecimento de N pelo solo, pois situa-se no início do período de grande absorção de N (Figura 5) e, segundo Fancelli e Dourado Neto (2004), é neste estádio que o milho define seu potencial produtivo (número de óvulos por espiga), que será confirmado nos estádios posteriores caso não haja limitações, sejam climáticas, nutricionais ou fitossanitárias.

De maneira geral, os índices de colheita tanto de grãos (ICG) como de N (ICN) foram menores na safra 2011/12 em comparação com a safra 2012/13 (Figura 9). Na primeira safra os ICG e ICN foram, em média, de 42 e 56 %, enquanto na segunda foram de 53 e 68 %, respectivamente. Isto se deveu à menor produtividade de grãos na safra 2011/12, devido à incidência de doenças, como discutido anteriormente, principalmente após o florescimento, causando redução na produção de grãos, porém sem alterar significativamente a massa seca de folhas, colmo, e sabugo.

Na safra 2011/12 não houve diferença entre os tratamentos para ICG e ICN, embora as variações entre tratamentos tenham sido maiores que as da safra 2012/13, na qual houve efeitos significativos das épocas de aplicação de N (Figura 9). A falta de diferenciação entre os tratamentos deu-se devido à elevada variação não controlada (coeficiente de variação de 12 % para ICG e de 11 % para ICN), assim como ocorrido para a produtividade de grãos.

Como na safra 2012/13 os coeficientes de variação para ICG e ICN foram, respectivamente, de 2 e 3 %, a diferença entre alguns tratamentos, mesmo que pequena, foi significativa. Assim, o ICG foi maior quando o N foi aplicado no estádio V12 e menor quando aplicado nos estádios V4 e V6. Embora apresentando diferença estatística, os valores de ICG foram muito próximos para todos os tratamentos, com diferença máxima de 3,6 % entre o maior e o menor valor. Valores semelhantes de ICG foram encontrados por Coelho et al. (1991) – 46%, Gava et al. (2010) – 48 %, Lange (2006) – 45 % e Lara Cabezas et al. (2000) – 54 %.

Na segunda safra, o maior ICN foi observado no tratamento controle (71 %), e os menores quando o N foi aplicado nos estádios V4 (65 %), V6 (66 %) ou V8 (66 %), evidenciado que a fração "grãos" é o principal dreno de N na planta. Ciampitti e Vyn (2013), em revisão elaborada sobre as fontes de N para os grãos de milho (remobilização ou absorção após florescimento) observaram que o ICN variou de 9,6 a 83,9 %, com média de 63,4 %, próxima aos valores do presente estudo, quando realizada a adubação nitrogenada. Geralmente, os baixos valores de IC, seja de grãos ou de N, estão relacionados a fatores bióticos ou abióticos que reduzem o número e a massa dos grãos (CIAMPITTI; VYN, 2013; TRIBOI; TRIBOI-BLONDEL, 2002), como a incidência de doenças na primeira safra no presente estudo. Por outro lado, elevados valores de IC estão associados às altas produtividades de grãos (CIAMPITTI; VYN, 2012).

2.4 Conclusões

- 1. Não houve incremento na produtividade de grãos com a aplicação de N em cobertura em diferentes estádios fenológicos, devido às condições edáficas do local do estudo.
- 2. A aplicação de N nos estádios mais precoces (V4 ou V6) proporcionou maior recuperação do N da ureia aplicada em cobertura, chegando a valores de 53 %.
- 3. A recuperação do N da ureia aplicada em cobertura decresceu quando a adubação foi realizada nos estádios fenológicos mais tardios.

3 ÉPOCAS DE APLICAÇÃO DE UREIA EM COBERTURA NO MILHO: ABSORÇÃO FOLIAR DA AMÔNIA VOLATILIZADA DO FERTILIZANTE

Resumo

As plantas podem absorver amônia da atmosfera pelas folhas, podendo então recuperar parte do N volatilizado da ureia aplicada na superfície do solo. Assim, o objetivo deste trabalho foi mensurar a absorção foliar de NH₃ oriunda da ureia aplicada na superfície em diversos estádios fenológicos da cultura do milho e verificar a correlação entre a quantidade de NH₃ absorvida e a área foliar da cultura. O estudo foi desenvolvido em campo, no bairro rural de Tanquinho, município de Piracicaba, SP, nas safras 2011/12 e 2012/13. Utilizou-se o delineamento experimental de blocos ao acaso, com quatro repetições. O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico, manejado em sistema convencional de preparo do solo. Os tratamentos constaram de cinco épocas de aplicação de ureia (com abundância aproximada de 12 % em átomos ¹⁵N) em cobertura, correspondentes aos estádios fenológicos V4, V6, V8, V10 e V12. Realizou-se a aplicação do fertilizante em bandejas contendo o mesmo solo da área experimental para que não fosse exposto ao sistema radicular de plantas de milho; sete dias após a aplicação do fertilizante, o solo das bandejas foi seco para determinação da concentração de N-total e abundância de ¹⁵N. No mesmo dia, a parte aérea das plantas próximas à bandeja foi coletada, seca, com posterior determinação da concentração total de N e abundância de 15N. Em cada época de aplicação também foi determinada a área foliar da cultura. Com base nas concentrações totais de N e nos valores de abundância de ¹⁵N no solo e nas plantas, calcularam-se a porcentagem de N volatilizado (PNV) e a porcentagem do N volatilizado que foi recuperado pelas plantas (NVRP). A PNV variou de 23 a 68 % do aplicado, estando estas diferenças relacionadas às condições climáticas. Na média das duas safras, o NVRP apresentou valores de 3,4, 5,5, 6,2, 9,0 e 14,8 %, respectivamente, nos estádios V4, V6, V8, V10 e V12; aproximadamente 90 % do N absorvido pela folhagem foram acumulados nas folhas e apenas 10 % nos colmos. Houve alta correlação entre a área foliar e a porcentagem de amônia absorvida pelas folhas (r = 0,93, $p \le 0.05$). Isto ocorreu porque a área foliar representa a superfície de contato da planta com a amônia da atmosfera, confirmando a hipótese de que a maior área foliar reflete em maior absorção foliar percentual de amônia.

Palavras-chave: Volatilização de amônia. Ponto de compensação de amônia. Adubação nitrogenada. *Zea mays* L.

Abstract

UREA SIDEDRESS TIMING IN CORN CROP: FOLIAR UPTAKE OF AMMONIA VOLATILIZED FROM FERTILIZER

Plants can uptake ammonia from the atmosphere by the leaves, and to recover part of the N volatilized from urea applied on the soil surface. This work aimed to measure the foliar uptake of NH₃ volatilized from urea applied on the surface at different corn growth stages, and to evaluate the correlation between the amount of NH₃ absorbed and corn leaf area. The study was performed under field conditions in Piracicaba, State of São Paulo, during the growth seasons of 2011/12 and 2012/13, in experimental design of randomized blocks with four replications. The soil of experimental area is classified as Rhodic Haplustox, cultivated under conventional tillage system. Treatments consisted of five urea sidedress timing (labeled to approximately 12 atom % of ¹⁵N), represented by growth stages V4, V6, V8, V10 and V12. Urea application was performed in trays containing the same soil of the experimental area, to avoid that N were exposed to the corn root system; seven days after urea application, soil of the travs was dried to determine total N concentration and ¹⁵N abundance. On the same day, shoots of the plants near the tray were collected and dried, to determine total N concentration and ¹⁵N abundance. In each application time, the leaf area of the crop was also determined. Based on total N concentrations and ¹⁵N abundance in soils and plants, the percentage of N volatilized (PNV) and the percentage of N volatilized that was recovered by plants (NVRP) were calculated. The PNV varied from 23 to 68 % of the applied, and these differences are related to climatic conditions. In average, the NVRP had values of 3.4, 5.5, 6.2, 9.0 and 14.8 %, respectively, in V4, V6, V8, V10 and V12; approximately 90 % of N absorbed by foliage was retained in the leaves and only 10 % in the stalks. There was a high correlation between leaf area and the percentage of ammonia absorbed by the leaves (r = 0.93, $p \le 0.05$). This occurred because the leaf area is the contact surface of the plant with atmospheric ammonia, confirming the hypothesis that a greater leaf area reflects in greater percentage of foliar ammonia absorption.

Keywords: Ammonia volatilization. Ammonia compensation point. Nitrogen fertilization. Zea mays L.

3.1 Introdução

A adubação nitrogenada do milho é realizada, de maneira geral, de forma parcelada, aplicando-se parte do N na semeadura e o restante da dose recomendada em cobertura (CANTARELLA; DUARTE, 2004). Dentre inúmeras fontes sólidas de N disponíveis no mercado, a ureia é a mais utilizada, pois apresenta menor custo por unidade do nutriente. Quando esta é aplicada sobre a superfície do solo, sem posterior incorporação, podem ocorrer perdas significativas de N por volatilização de amônia, chegando a 78 % da dose aplicada (LARA CABEZAS et al., 2000). Além dos impactos econômicos relacionados à perda de parte do N aplicado, a amônia também é considerada um importante poluente atmosférico. Quando depositada por meio de precipitação pluviométrica, o NH₃ pode causar acidificação e eutrofização de ecossistemas naturais (SCHULZE et al., 1989).

Entretanto, enquanto difunde da superfície do solo até a atmosfera, parte da amônia pode ser absorvida pelas folhas de diversas culturas (BOARETTO et al., 2013; FALLER, 1972; FENILLI et al., 2007; HUTCHINSON; MILLINGTON; PETERS, 1972; LOCKYER; WHITEHEAD, 1986; MARTHA JÚNIOR; TRIVELIN; CORSI, 2009; PING; BREMER; JANZEN, 2000; ROGERS; ANEJA, 1980; WHITEHEAD; LOCKYER, 1987). Essa absorção foi mensurada, com o auxílio da técnica de diluição isotópica do ¹⁵N, em cultivos de trigo (PING; BREMER; JANZEN, 2000), cafeeiro (FENILLI et al., 2007), capim tanzânia (MARTHA JÚNIOR; TRIVELIN; CORSI, 2009) e laranjeira (BOARETTO et al., 2013), obtendo-se, respectivamente, valores de até 15, 43, 16 e 7 % do N volatilizado.

Além de absorver amônia, as plantas também podem liberar este gás para a atmosfera através das folhas (FARQUHAR et al., 1980; FARQUAR; WETSELAAR; FIRTH, 1979; FRANCIS; SCHEPERS; SIMS, 1997; FRANCIS; SCHEPERS; VIGIL, 1993; HOLTAN-HARTWING; BOCKMAN, 1994; STUTTE; WEILAND, 1978; TA; WEILAND, 1992; WEILAND; OMHOLT, 1985). Como as trocas gasosas de NH₃ pelas folhas ocorre por difusão, a intensidade e o sentido (absorção ou emissão) dessas trocas dependem da concentração de amônia na atmosfera (ASMAN; SUTTON; SCHJOERRING, 1998; GESSLER; RIENKS; RENNEBERG, 2000; 2002; PARTON et al., 1988; WHITEHEAD; LOCKYER, 1987) e do ponto de compensação de amônia (PCA) da planta (FARQUHAR et al., 1980). O PCA é definido como a concentração de amônia no interior da folha em que a absorção e a perda do gás se equivalem (FARQUHAR et al., 1980; HUSTED; MATTSSON; SCHJOERRING, 1996), e é dependente de inúmeros fatores como temperatura, concentração interna de CO₂, nutrição nitrogenada e condição hídrica da planta, intensidade luminosa,

fotoperíodo, espécie vegetal, estádio fenológico, dentre outros (HOLTAN-HARTWIG; BOCKMAN, 1994; HUSTED; MATTSSON; SCHJOERRING, 1996; MATTSSON et al., 1997; MATTSSON; SCHJOERRING, 1996; SCHJOERRING; HUSTED; MATTSSON, 1998). Quando o PCA é menor do que a concentração de NH₃ na atmosfera ocorre absorção deste gás e, quando o PCA é maior, sua emissão pelas folhas (FARQUHAR et al., 1980; HOLTAN-HARTWIG; BOCKMAN, 1994; SCHJOERRING; HUSTED; MATTSSON, 1998). De maneira geral, a concentração de amônia na atmosfera em áreas agrícolas varia de 1 a 14 μg m⁻³ (HOLTAN-HARTWIG; BOCKMAN, 1994; SCHLESINGER; HARTLEY, 1992), enquanto o PCA médio de culturas agrícolas é de 0,7 a 4,2 μg m⁻³ de NH₃ (DABNEY; BOULDIN, 1990; SCHJOERRING et al., 1993; SUTTON; SCHJOERRING; WYERS, 1995; YAMULKI; HARRISON; GOULDING, 1996). No entanto, após a aplicação superficial de ureia, por exemplo, as concentrações de NH₃ na atmosfera próxima a fonte emissora (ureia sobre o solo) podem ser elevadas, favorecendo a absorção foliar.

A entrada de amônia nas folhas ocorre quase exclusivamente através dos estômatos, para então ser dissolvida no filme de água das células do mesófilo e formar NH₄⁺ (VAN HOVE et al., 1987). Logo, observa-se a importância da condutância estomática no processo de absorção/emissão de NH₃ pelas folhas (ROGERS; ANEJA, 1980; VAN HOVE; VREDENBERG; ADEMA, 1990). Aliada à condutância individual de cada estômato, para uma mesma cultura, o número de estômatos também é importante nesse processo de troca gasosa. Como, de maneira geral, o número de estômatos é maior com o aumento da área foliar, observa-se a importância desse atributo na absorção de amônia pelas folhas, conforme relatado por Martha Júnior, Trivelin e Corsi (2009). Assim, o aumento na área foliar pode refletir em maior absorção de amônia, aliado ao fato de que maior área foliar também pode proporcionar maior tempo de residência da amônia no dossel da cultura, devido à limitação da movimentação do ar (redução na velocidade do vento) que de outra forma auxiliaria na dispersão do NH₃ na atmosfera.

Portanto, como a área foliar do milho é dependente do estádio fenológico, plantas em estádios mais avançados poderão absorver maiores quantidades de NH₃, desde que o ponto de compensação de amônia médio do dossel do vegetal não se eleve com a idade fisiológica. Nesse sentido, o objetivo deste trabalho foi quantificar a absorção foliar de amônia pela cultura do milho com diferentes índices de área foliar (estádios fenológicos).

3.2 Material e Métodos

Foram conduzidos dois experimentos em campo nas safras 2011/12 e 2012/13, no bairro rural de Tanquinho, munícipio de Piracicaba, SP. As análises laboratoriais foram realizadas no Centro de Energia Nuclear na Agricultura, da Universidade de São Paulo (CENA/USP), no mesmo município. O solo da área experimental é classificado como Latossolo Vermelho Distrófico, e havia sido cultivado com milho nas três últimas safras que antecederam a implantação deste experimento, durante o verão, e mantido em pousio na entressafra. Os tratamentos foram representados por cinco épocas de aplicação da ureia em cobertura no milho, correspondentes aos estádios fenológicos V4, V6, V8, V10 e V12. Utilizou-se o delineamento experimental de blocos ao acaso com quatro repetições. As parcelas foram compostas por dez linhas de milho com 5 m de comprimento, e espaçamento das entrelinhas de 0,5 m, totalizando uma área de 25 m². Na safra 2011/12, as condições climáticas (excesso de chuvas) que prevaleceram nos dias em que a cultura estava no estádio V8 impediram a avaliação da absorção foliar de amônia pelo milho.

Antes da semeadura do milho, nos meses de outubro de 2011 e novembro de 2012, o solo da área experimental recebeu a aplicação de calcário visando à elevação da saturação por bases para 70 %, com posterior incorporação por meio de duas gradagens. Em 11 de dezembro de 2011 e 19 de dezembro de 2012 foi realizada a semeadura manual do milho (híbrido 30F35 HR, da Pioneer®), colocando-se sementes aos pares a cada 0,33 m no sulco de semeadura, com posterior raleio no estádio V4 (deixando-se apenas uma planta a cada 0,33 m), visando à distribuição uniforme das plantas (homogeneidade de estande) e a população final de 60.000 plantas por hectare. Em ambas as safras, a adubação foi realizada com a aplicação de 750 kg ha⁻¹ do formulado 04-14-08 em todas as parcelas, resultando na dose de 30, 105 e 60 kg ha⁻¹, respectivamente, de N, P₂O₅ e K₂O. No estádio V4 foram aplicados, na entrelinha e sem incorporação, 60 kg ha⁻¹ de K₂O na forma de cloreto de potássio. Essas doses de fertilizante foram definidas objetivando-se alta produtividade de grãos (10 - 12 Mg ha⁻¹), conforme recomendado por Cantarella, Raij e Camargo (1997). Os tratos culturais no milho foram realizados conforme as necessidades da cultura.

O método utilizado para estimar a absorção foliar de amônia foi baseado na proposta descrita por Ping, Bremer e Janzen (2000) e Fenilli et al. (2007), com a finalidade de assegurar que o N-fertilizante transformado em NH₃ gasoso fosse absorvido apenas via foliar e não por via radicular. Nesse sentido, foram utilizadas bandejas (30 cm de largura, 20 cm de comprimento e 7 cm de altura) preenchidas com o mesmo solo da área experimental

(Apêndice C). Para favorecer o processo de volatilização de amônia, o pH em água do solo das bandejas foi elevado para 7,0, por meio da aplicação de CaCO₃ e incubação por 20 dias. Em cada parcela, um conjunto de quatro linhas de milho com quatro plantas em cada linha foi isolado nas laterais, com a utilização de lona plástica transparente (miniparcela), com a finalidade de impedir uma possível interferência pelo vento na dispersão do NH₃ volatilizado da ureia (Apêndice C). Cada parcela recebeu uma bandeja com a aplicação de ureia marcada (com abundância de 12,0 e 11,58 % de átomos ¹⁵N, nas safras 2011/12 e 2012/13 respectivamente) na época correspondente ao seu tratamento, que foi alocada na entrelinha das duas linhas centrais de milho na miniparcela. A ureia foi aplicada na superfície do solo da bandeja, sem incorporação, na dose de 1,12 g de N por parcela, equivalente a 140 kg ha⁻¹ de N. A umidade do solo foi mantida próximo a capacidade de campo por meio de correções diárias da umidade.

As bandejas permaneceram no campo durante sete dias. Nos estádios V4 e V6, na safra 2011/12, as bandejas foram cobertas por tampas durante a noite ou mesmo durante o dia quando ocorreram chuvas, para evitar perda de solo e/ou do fertilizante marcado da bandeja. Tendo em vista as condições climáticas (chuvas a qualquer hora) que prevaleceram quando as plantas estavam nos estádios V10 e V12 na primeira safra, foram confeccionados "telhados" de acrílico para as bandejas (Apêndice C), não sendo mais necessária a colocação de tampas para impedir a perda de solo. Na segunda safra, utilizaram-se os "telhados" de acrílico em todas as épocas de aplicação da ureia. Após o período de 7 dias de exposição no campo, as bandejas foram recolhidas para então proceder-se a acidificação do solo com a aplicação de 100 mL de ácido clorídrico 2 mol L⁻¹. Após a acidificação, o solo de cada bandeja foi seco em estufa de circulação de ar forçada durante 72 h a 40°C. Esses procedimentos de acidificação e secagem tiveram o objetivo de paralisar, rapidamente, o processo de volatilização de NH₃ do solo das bandejas (PING; BREMER; JANZEN, 2000).

No dia anterior a colocação das bandejas nas miniparcelas, foram coletadas todas as folhas expandidas de quatro plantas escolhidas ao acaso nas parcelas (excluindo-se as plantas isoladas pelo plástico) para posterior mensuração da área foliar em laboratório, por meio de integrador de área foliar LI-COR[®], modelo LI/3100. Estas amostras de folhas foram secas em estufa a 65°C, trituradas em moinho tipo Wiley, homogeneizadas, subamostradas e submetidas à determinação da concentração total de N.

Após a coleta das bandejas, a parte aérea das plantas presentes nas miniparcelas foram cortadas rente ao solo, separadas em colmo e folhas, secas em estufa de circulação de ar forçada com temperatura de 65°C, para posterior mensuração da fitomassa seca. As amostras

de solo das bandejas e de plantas foram finamente moídas (<1 mm), para posterior determinação da concentração total de N e da abundância isotópica de ¹⁵N em espectrômetro de massa (BARRIE; PROSSER, 1996).

A quantidade de N no solo (g parcela⁻¹) após o período experimental (7 dias) proveniente da ureia aplicada (QNSPU) foi calculada por meio da equação 8.

$$(Eq. 8) QNSPU = {15 Ns \choose 15 Nu}. QNS$$

em que,

QNSPU é a quantidade de N no solo proveniente do fertilizante, em gramas por parcela;

¹⁵Ns é a abundância de ¹⁵N em excesso no solo após a exposição das bandejas no campo, em porcentagem;

¹⁵Nu é a abundância de ¹⁵N em excesso na ureia aplicada, em porcentagem;

QNS é a quantidade total de N no solo após a exposição das bandejas no campo, em gramas por parcela.

A quantidade de N volatilizado (QNV) a partir da ureia (g parcela⁻¹) foi calculada por meio da equação 9, a semelhança do realizado por Ping, Bremer e Janzen (2000) e Fenilli et al. (2007).

$$(Eq. 9) QNV = QNA - QNSPU$$

em que,

QNV é a quantidade de N volatilizado a partir da ureia, em gramas por parcela;

QNA é a quantidade de N aplicado por meio da ureia, em gramas por parcela;

QNSPU é a quantidade de N no solo proveniente da ureia após a exposição das bandejas no campo, em gramas por parcela.

A quantidade do N volatilizado que foi recuperado na planta (QNRP) foi calculada pela equação 10.

$$(Eq. 10) QNRP = \left(\frac{^{15}Np}{^{15}Nu}\right). QNP$$

em que,

QNRP é a quantidade de N volatilizado que foi recuperado pela planta, em gramas por parcela.

¹⁵Np é a abundância de ¹⁵N em excesso na planta (folha e colmo) após a exposição das bandejas no campo, em porcentagem;

¹⁵Nu é a abundância de ¹⁵N em excesso na ureia aplicada, em porcentagem;

QNP é a quantidade total de N na planta, em gramas por parcela.

A porcentagem do N volatilizado recuperado pela planta (NRP), nas folhas e nos colmos, foi calculada de acordo com a equação 11.

(Eq. 11)
$$NRP \ (\%) = \left(\frac{QNRP}{QNV}\right). \ 100$$

em que,

NRP é a fração do N volatilizado que foi recuperado pela planta, em porcentagem;

QNRP é a quantidade do N volatilizado que foi recuperada na planta, em gramas por parcela;

QNV é a quantidade de N volatilizado a partir da ureia, em gramas por parcela.

Os resultados foram submetidos à análise de variância ($p \le 0.05$), e as médias comparadas pelo teste de Tukey ($p \le 0.05$). Também foi realizado o teste de correlação de Pearson entre as variáveis. Para a realização das análises estatísticas foi utilizado o programa SAS versão 9.2 (SAS INSTITUTE INC., 2009).

3.3 Resultados e Discussão

A aplicação de ureia na superfície do solo resultou em perdas de N por volatilização de amônia na safra 2011/12 de 56, 46, 23 e 38 % do N aplicado, respectivamente, nos estádios fenológicos V4, V6, V10 e V12, e 60, 58, 68, 66 e 60 % do N aplicado nos estádios V4, V6, V8, V10 e V12 respectivamente, na safra 2012/13 (Tabela 6). As diferenças observadas para a quantidade de amônia volatilizada entre as épocas de aplicação deveram-se, principalmente, às condições climáticas (temperatura, por exemplo) que predominaram em cada época de aplicação (Figura 12), tendo em vista que o método de aplicação da ureia nas bandejas, o tempo de exposição destas no campo e a umidade do solo foram os mesmos nos dois anos de experimentação. Diversos trabalhos relatam a influência das condições climáticas sobre o

processo de volatilização de NH₃ (BOARETTO et al., 2013; PEARSON; STEWART, 1993; SOMMER; JENSEN; SCHJOERRING, 1993; SOMMER; OLESEN; CHRISTENSEN, 1991; TRIVELIN et al., 2002; VITTI et al., 2007). Entretanto, fatores inerentes à planta, como a área foliar, também podem ter influenciado a volatilização da amônia, uma vez que maior área foliar pode proporcionar maior cobertura do solo, podendo diminuir a energia incidente, a temperatura ao nível do solo e a taxa de evaporação de água (DALMAGO et al., 2010), e consequentemente, reduzir a volatilização de amônia. Nesse sentido, seria esperada a diminuição na quantidade de N volatilizada quando da aplicação da ureia em estádios fenológicos mais avançados, conforme ocorrido na safra 2011/12 entre os estádios V4 e V10. Porém, no estádio V12 desta mesma safra, observou-se aumento na volatilização de amônia em relação ao estádio V10, provavelmente devido ao aumento nos valores de temperatura máxima, mínima e média durante a exposição das bandejas no campo no estádio V12 (Figura 12). Deste modo, é possível inferir que a quantidade de amônia volatilizada da ureia aplicada na superfície do solo é controlada tanto por condições climáticas como também por características da cultura nos dias subsequentes a aplicação. Embora diversos trabalhos citem a precipitação pluvial e a velocidade do vento como fatores determinantes nas taxas de volatilização (CANTARELLA et al., 2003b; FENILLI et al., 2007; JACOBS; BOXEL, 1991; SOMMER; JENSEN; SCHJOERRING, 1993; TRIVELIN et al., 2002), no presente estudo, estes fatores não variaram entre as épocas de aplicação da ureia, pois foram controlados pela reposição diária de água nas bandejas e pelo isolamento lateral das plantas com lona plástica.

Tabela 6 - Quantidade de N-amônia volatilizado (QNV) proveniente da ureia, área foliar (AF) e concentração total de N nas folhas (CTN) de milho em diferentes estádios fenológicos, nas safras 2011/12 e 2012/13

	QNV		AF		CTN	
Estádio	g (% do aplicado)		m² por planta		g kg ⁻¹	
fenológico Safra						
	2011/12	2012/13	2011/12	2012/13	2011/12	2012/13
V4	0,63 a (56)	0,68 b (60)	0,08 d	0,04 e	39,4 a	48,9 a
V6	0,52 b (46)	0,65 b (58)	0,13 c	0,11 d	39,2 a	43,5 b
V8	-	0,76 a (68)	-	0,25 c	-	28,6 с
V10	0,26 c (23)	0,74 a (66)	0,53 b	0,39 b	26,6 b	24,3 d
V12	0,43 d (38)	0,67 b (60)	0,80 a	0,62 a	23,4 b	25,7 d
Valor de F	166,2*	14,5*	465,3*	362,1*	42,5*	489,8*
C.V. (%)	5	4	8	9	8	3

Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \le 0.05$).

^{*} significativo pelo teste F com $p \le 0.05$.

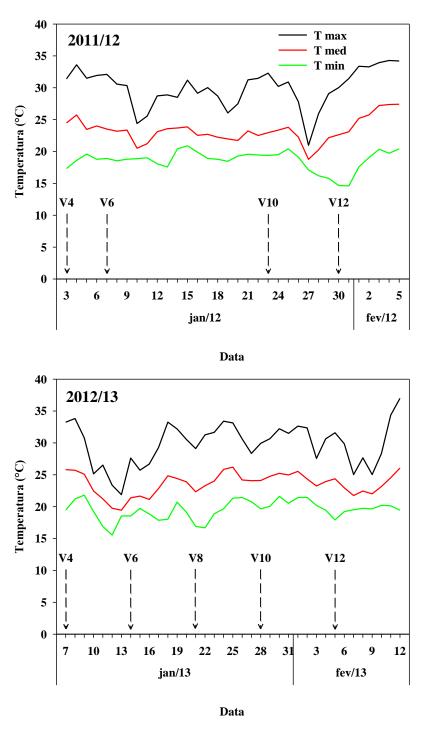


Figura 12 - Temperatura máxima (T max), média (T med) e mínima (T min) durante o período de aplicação dos tratamentos (ureia em superfície) na cultura do milho nas safras 2011/12 e 2012/13. Setas indicam a data de aplicação de cada tratamento, e os respectivos estádios fenológicos da cultura. Dados obtidos no Posto Meteorológico da ESALQ/USP (Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 2013), distante a aproximadamente 15 km da área experimental

A área foliar variou de 0,08 a 0,8 m² por planta na safra 2011/12 e 0,04 a 0,62 m² por planta na safra 2012/13 (Tabela 6) e, conforme esperado, os menores valores foram observados em plantas no estádio V4 e os maiores em plantas no estádio V12. A influência da área foliar sobre a capacidade da planta em absorver amônia da atmosfera também foi relatada por Sommer, Jensen e Schjoerring (1993), Martha Júnior, Trivelin e Corsi (2009) e Boaretto et al. (2013).

A concentração de N nas folhas diminuiu com o avanço na idade das plantas (Tabela 6). Strieder et al. (2006) e Argenta et al. (2003) também observaram diminuição nas concentrações foliares de N com o avanço do estádio fenológico da planta. Provavelmente, isso ocorre porque, com o desenvolvimento das plantas de milho, a taxa de acúmulo de N é menor do que a de outros nutrientes, como por exemplo, carbono, e por conseguinte, de fitomassa. Assim, ocorre um efeito de diluição do N no tecido da planta, diminuindo as concentrações foliares.

A quantidade do N volatilizado recuperado na planta aumentou com o avanço no estádio fenológico da cultura na safra 2012/13 (Tabela 7). Na safra 2011/12, embora a menor e a maior quantidade de N recuperada pela planta tenham sido observadas nos estádios V4 e V12, respectivamente, houve inversão nos valores entre os estádios V6 e V10, provavelmente devido à menor quantidade de amônia volatilizada no estádio V10, que proporcionou menor concentração de NH₃ na atmosfera e, consequentemente, menor difusão para o interior das folhas. Também convém lembrar que nesse estádio, o clima permaneceu praticamente nublado, restringindo a abertura estomática e a absorção de NH₃. Isto demonstra que a quantidade de N recuperado pela planta é dependente das características do clima, da planta e da quantidade de amônia volatilizada (ADRIAENSSENS et al., 2012; FENILLI et al., 2007; HUTCHINSON; MILLINGTON; PETERS, 1972; MARTHA JÚNIOR; TRIVELIN; CORSI, 2009; SOMMER; JENSEN; SCHJOERRING, 1993).

Calculando-se a capacidade de absorção de amônia pelo milho, por meio da divisão da quantidade de N recuperado nas plantas pela área foliar (considerando a área das 16 plantas) em cada estádio fenológico, utilizando-se apenas os dados da safra 2012/13 (para diminuir o efeito da quantidade de N volatilizado, tendo em vista a grande variação na volatilização de amônia entre as épocas de aplicação na safra 2011/12), obtém-se os valores de 34,4, 17,0, 11,5, 8,3 e 9,7 mg de N m⁻² de folha para os estádios V4, V6, V8, V10 e V12, respectivamente. Esses valores demonstram que a capacidade de absorção foliar de amônia ponderada pela área foliar diminui em plantas mais velhas. De acordo com Hutchinson, Millington e Peters (1972), essas diferenças na capacidade de absorção de amônia podem

estar relacionadas às diferenças na geometria interna da folha, a qual determina a resistência na difusão de amônia para o interior da folha.

Como no milho, a densidade de estômatos (quantidade por área foliar) em folhas mais velhas (décima segunda folhas, por exemplo) é maior que em folhas mais novas (quarta folha, por exemplo) (BALDO, 2007), seria esperada maior capacidade de absorção de amônia ponderada pela área foliar em estádios fenológicos mais tardios. Contudo, em plantas mais velhas parte das folhas é sombreada, havendo diminuição da incidência de luz e da atividade fotossintética e, consequentemente, restrição na abertura estomática (TAIZ; ZEIGER, 2010). Assim, estas apresentam reduzida capacidade de troca gasosa com a atmosfera e, como foram contabilizadas na área foliar da cultura, podem ter influenciado na diminuição da capacidade de absorção de amônia em estádios fenológicos mais avançados.

Tabela 7 - Quantidade de nitrogênio recuperado na planta (QNRP, em g parcela⁻¹) por meio da absorção foliar da amônia proveniente da ureia aplicada em diferentes estádios fenológicos do milho nas safras 2011/12 e 2012/13

	QN	IRP
Estádio fenológico	Sa	fra
	2011/12	2012/13
V4	0,022 d	0,022 d
V6	0,033 b	0,030 c
V8	-	0,046 b
V10	0,029 c	0,052 b
V12	0,065 a	0,096 a
Valor de F	202,7*	209,1*
C.V. (%)	7	8

Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \le 0.05$).

^{*} significativo pelo teste F com $p \le 0.05$

A porcentagem de N acumulado nas folhas e nos colmos proveniente da amônia volatilizada aumentou com o avanço da idade das plantas nas duas safras (Tabela 8), demonstrando que parte da amônia absorvida via foliar foi redistribuída das folhas para o colmo. Grundmann, Lensi e Chalament (1993) demonstraram que parte da amônia absorvida pelas folhas foi redistribuída até as raízes de milho, e parte foi exsudada na solução nutritiva onde as plantas se desenvolviam. Isto ocorre porque a amônia absorvida via foliar é uma forma de N prontamente utilizável pela planta (FALLER, 1972; HUTCHINSON; MILLINGTON; PETERS, 1972; LOCKYER; WHITEHEAD, 1986; ROGERS; ANEJA, 1980; WHITEHEAD; LOCKYER, 1987; ZHANG et al., 2011) desde que hajam esqueletos de carbono para incorporação desse N em formas orgânicas (ADRIAENSSENS et al., 2012). Entretanto, 89 % da amônia absorvida foram encontrados nas folhas, estando a preferência do tecido foliar pelo acúmulo do N absorvido na forma de amônia, relacionada, provavelmente, ao fato desse tecido ser forte dreno de N durante os estádios fenológicos, avaliados neste experimento, resultando em maior acúmulo de N total nas folhas do que em colmos.

Quando analisada a porcentagem de N acumulado na planta proveniente da amônia volatilizada (média das duas safras), se observa valores de 3,4 a 14,8 % entre os estádios V4 e V12, respectivamente (Tabela 8). Os valores mensurados nas duas safras foram semelhantes, demonstrando que a absorção foliar de amônia é mais dependente das características das plantas em cada estádio fenológico que das pequenas variações climáticas que tenham ocorrido entre as safras. Isto fica evidente na Figura 13, a qual demonstra a elevada correlação (r = 0,93) entre a amônia absorvida e a área foliar. Como a área foliar representa a superfície de contato da planta com amônia da atmosfera (ADRIAENSSENS et al., 2012; FENILLI et al., 2007; HUTCHINSON; MILLINGTON; PETERS, 1972; MARTHA JÚNIOR; TRIVELIN; CORSI, 2009; SOMMER; JENSEN; SCHJOERRING, 1993), confirma-se a hipótese de que o aumento na área foliar reflete em maior absorção foliar de amônia (MASSAD; NEMITZ; SUTTON, 2010), desde que não sejam alterados significativamente outros parâmetros como, por exemplo, ponto de compensação de amônia. Outrossim, é importante ressaltar que a maior área foliar representa maior resistência à difusão da amônia do solo em direção a atmosfera (MATTOS JÚNIOR et al., 2003), contribuindo, assim, para a absorção do NH₃ pelas folhas, devido a manutenção dessa forma de N por mais tempo no dossel da cultura. Boaretto et al. (2013) também atribuíram o aumento na absorção foliar de amônia à maior área foliar em laranjeira cultivada em plantio com alta densidade de plantas (617 plantas ha⁻¹) quando em comparação ao plantio tradicional (408 plantas ha⁻¹).

A maior área foliar, além de maximizar as trocas de NH₃ entre as folhas e a atmosfera (maior número de estômatos por área) e restringir a livre difusão deste gás para fora do dossel da cultura, também atua na incorporação do N absorvido via foliar em compostos orgânicos. Como esta incorporação do N é dependente da capacidade fotossintética, e esta, por sua vez, é maior com o aumento do índice de área foliar, é possível que as plantas de milho em estádios fenológicos mais avançados, neste experimento, tenham incorporado mais rapidamente a amônia absorvida pelas folhas, impedindo sua re-emissão (perda). A perda de parte do NH₃ após a absorção via foliar foi documentada por Rennenberg e Gessler (1999) e Gessler, Rienks e Renneberg (2002), e ocorre quando a concentração de NH₃ na atmosfera atinge valores menores do que o ponto de compensação do vegetal.

Na Figura 14 se observa a importância da distância entre a fonte de amônia e as plantas, principalmente quando a cultura apresentava pequena área foliar, como nos estádios V4 e V6. Nestes estádios as plantas mais próximas à bandeja absorveram mais amônia em relação às demais plantas. Conforme comentado anteriormente, isto ocorre porque plantas pequenas representam pequena resistência à difusão da amônia do solo em direção a atmosfera, facilitando a perda de NH₃, em detrimento da absorção dessa forma de N pelas plantas mais distantes. Fenilli et al. (2007) avaliando a absorção foliar de amônia por plantas de café também relataram que plantas mais próximas à fonte de emissão de NH₃ absorvem maior quantidade deste gás comparativamente às plantas mais distantes. De modo semelhante, Boaretto et al. (2013) também observaram efeitos da distância das plantas da fonte emissora de amônia sobre a quantidade de NH₃ absorvido, sendo os efeitos mais pronunciados em condições de menor área foliar da cultura.

Embora o teste de correlação de Pearson tenha se revelado significativo para correlação entre a porcentagem de amônia absorvida pela planta e a concentração total de N nas folhas (Figura 13), Rogers e Aneja (1980) e Hutchinson, Millington e Peters (1972) demonstraram que o "status" de N total nas folhas tem pouca influência sobre as taxas de absorção de amônia da atmosfera. Assim, a correlação existente entre essas variáveis pode ser resultado da mera diminuição da concentração de N nas folhas com o avanço da idade das plantas.

Tabela 8 - Amônia absorvida pelas folhas do milho (em % do volatilizado), expressa em nitrogênio recuperado nas folhas (NRF), nos colmos (NRC) e em toda a planta (NRP) nas safras 2011/12 e 2012/13, em função da época de aplicação da ureia (estádio fenológico)

T 44.11	NRF		NRC		NRP		
Estádio fenológico							
Tenologico	2011/12	2012/13	2011/12	2012/13	2011/12	2012/13	Média
V4	3,6 d	3,2 d	-	-	3,6 d	3,2 e	3,4
V6	5,9 c	4,3 c	0,4 c	0,3 d	6,3 c	4,6 d	5,5
V8	-	5,5 b	-	0,7 c	-	6,2 c	6,2
V10	9,4 b	6,0 b	1,5 b	1,0 b	10,9 b	7,0 b	9,0
V12	13,1 a	13,2 a	2,0 a	1,2 a	15,1 a	14,4 a	14,8
Valor de F	180,4*	227,6*	21,7*	96,0*	211,8*	268,9*	-
C.V. (%)	8	8	28	11	8	8	-

Médias seguidas por letras distintas diferem entre si pelo teste de Tukey ($p \le 0.05$).

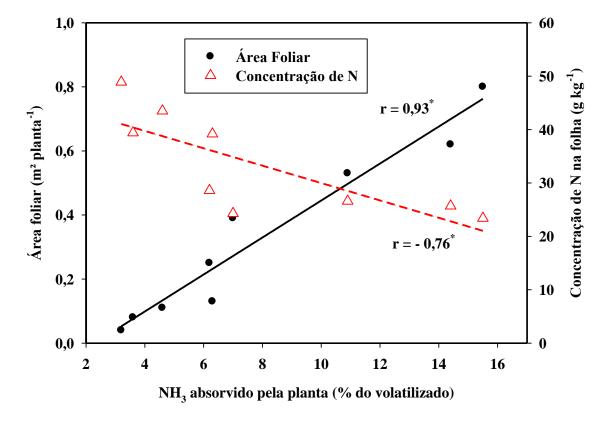


Figura 13 - Valores de NH₃ absorvido pela planta, área foliar e concentração de N na folha, e correlação de Pearson entre estas variáveis. * = significativo (*p*≤0,05)

^{*} significativo pelo teste F com $p \le 0.05$.

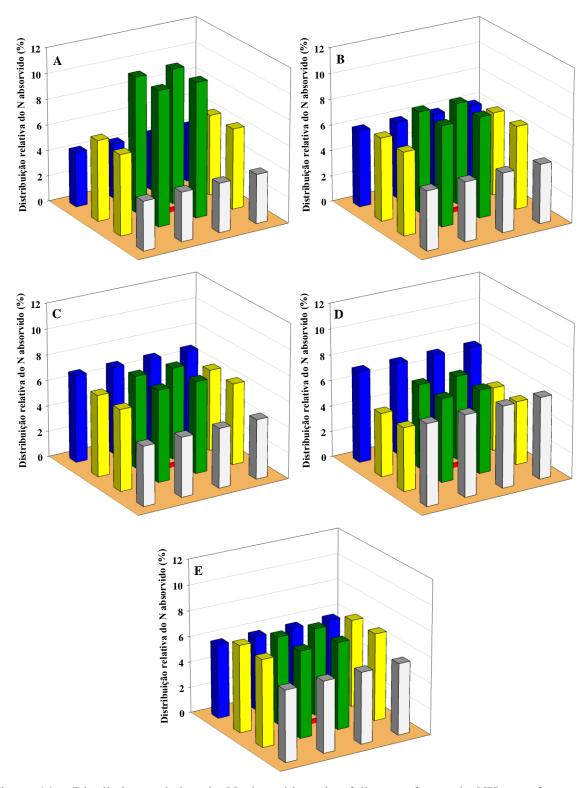


Figura 14 - Distribuição relativa do N absorvido pelas folhas na forma de NH₃ em função da disposição das plantas (colunas) e da fonte de amônia (bandeja – detalhe em vermelho) nas parcelas em campo, nos estádios fenológicos V4 (A), V6 (B), V8 (C), V10 (D) e V12 (E). Média de duas safras

3.4 Conclusões

- 1. As folhas de milho absorvem parte da amônia volatilizada da ureia aplicada na superfície do solo, chegando a valores da ordem de 15~% do N-NH $_3$ volatilizado.
- 2. A porcentagem de amônia absorvida relaciona-se positiva e diretamente com a área foliar da cultura.

4 CONSIDERAÇÕES FINAIS

As maiores perdas de N por volatilização de amônia quando a ureia foi aplicada em estádios fenológicos mais tardios (V10 e/ou V12) sugere a influência da área foliar da cultura no processo de volatilização. Esta influência deve-se tanto a interceptação dos raios solares, que limita o aumento excessivo da temperatura do solo na camada mais superficial e altera o processo de evaporação de água do solo, bem como pela interceptação da chuva, que diminui a capacidade de incorporação da ureia (ou os produtos de sua hidrólise) ao solo, devido à diminuição da lâmina de água que atinge a superfície do solo e ao fluxo preferencial da água via escorrimento pelo colmo. Com base nesses resultados, surge a necessidade de estudos específicos da influência da cobertura viva do solo (plantas em crescimento) sobre o processo de volatilização de amônia da ureia aplicada em superfície, objetivando maior eficiência de recuperação do N do fertilizante.

A ocorrência de elevadas taxas de acúmulo de N pelo milho entre os estádios fenológicos V10 e V12 indica que a adubação nitrogenada de cobertura deve ser realizada antes desses estádios, garantindo o bom suprimento do nutriente à cultura. Esta indicação corrobora com a maior eficiência de recuperação do N do fertilizante pela cultura relatada neste trabalho. Como o solo da área experimental foi bom fornecedor do nutriente ao milho, a aplicação mais tardia de N não comprometeu a produtividade de grãos. Contudo, em condições de restrita disponibilização de N pelo solo, é possível que as aplicações, por exemplo, em V10 ou V12, poderiam limitar a produtividade, tendo em vista a significativa relação entre a eficiência de recuperação do fertilizante e a produção de grãos nessas condições. Há de se considerar também que o solo argiloso deste estudo evitou perdas excessivas de N por lixiviação, que poderia reduzir a eficiência de recuperação do N do fertilizante, principalmente quando aplicado muito antes (estádio V4, por exemplo) do período de alta demanda pela cultura, em condições com elevada precipitação pluviométrica. Por outro lado, em condições propícias a perdas por lixiviação (solos arenosos, por exemplo), a adubação nitrogenada de cobertura realizada em uma única época pode não ser eficiente para suprir a demanda da cultura quando utilizadas fontes convencionais de N. Assim, a utilização de fontes de liberação controlada que, além de disponibilizar N nos estádios iniciais da cultura (definição do potencial produtivo) controlam a disponibilização de N para estádios mais avançados (após o florescimento), pode ser uma estratégia viável, tendo em vista a possibilidade de única aplicação de N em cobertura, mesmo em solos arenosos.

O não incremento na produtividade de grãos com a aplicação de N em cobertura, em condições edafoclimáticas específicas, indicada pela elevada produtividade do tratamento controle (sem N em cobertura) neste estudo, sugere a necessidade de mais pesquisas visando à predição de resposta da cultura do milho à aplicação de fertilizantes nitrogenados, ou seja, a definição, por exemplo, de um índice de disponibilização de N do solo, tendo em vista aos problemas econômicos e ambientais decorrentes dessa prática, quando realizada sem necessidade ou com doses de N superiores às necessidades da cultura.

A comprovação da absorção foliar de amônia pelo milho em valores significativos (até 15 % do N volatilizado) indica que nem todo o N do fertilizante que foi volatilizado na forma de amônia pode ser considerado perdido do sistema solo-planta. Por outro lado, sabendo-se da possibilidade de volatilização de amônia pelas folhas da cultura, surge a necessidade de estudos que objetivem avaliar a real contribuição do fertilizante no desenvolvimento da cultura, e não apenas a recuperação do N pelas plantas ao final do ciclo. Cita-se isto, porque parte do N do fertilizante pode ser absorvido pela cultura, participar de processos metabólicos e posteriormente ser emitido pelas folhas para a atmosfera, principalmente, durante a remobilização. Ademais, como as perdas de N pela parte aérea das culturas geralmente não são consideradas em estudos de balanço de N, os valores não recuperados pela planta e pelo solo são associados às perdas por volatilização direta do solo, lixiviação e desnitrificação, podendo, na verdade, estarem superestimados.

REFERÊNCIAS

- ABBASI, M.K.; TAHIR, M.M.; RAHIM, N. Effect of N fertilizer source and timing on yield and N use efficiency of rainfed maize (*Zea mays* L.) in Kashmir-Pakistan. **Geoderma**, Amsterdam, v. 195, p. 87-93, 2013.
- ABBASI, M.K.; TAHIR, M.M.; SADIQ, A.; IQBAL, M.; ZAFAR, M. Yield and nitrogen use efficiency of rainfed maize response to splitting and nitrogen rates in Kashmir, Pakistan. **Agronomy Journal**, Madison, v. 104, p. 448-457, 2012.
- ADRIAENSSENS, S.; STAELENS, J.; WUYTS, K.; WITTENBERGHE, S.V.; WUYTACK, T.; VERHEYEN, K.; BOECKX, P.; SAMSON, R. Canopy uptake of ¹⁵NH₃ by four temperate tree species and the interaction with leaf properties. **Water, Air, & Soil Pollution**, Dordrecht, v. 223, p. 5643-5657, 2012.
- AL-KANANI, T.; MACKENZIE, A.F.; BARTHAKUR, N.N. Soil water and ammonia volatilization relationships with surface-applied nitrogen fertilizer solutions. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 55, p. 1761-1766, 1991.
- ALVES, D.R.B.; FRIZZONE, J.A.; DOURADO NETO, D. Repartição da lâmina de irrigação, aplicada via pivô central, na cultura do milho. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 5, p. 67-70, 2001.
- AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J.; AITA, C. Recomendação de adubação nitrogenada para o milho no RS e SC adaptada ao uso de culturas de cobertura do solo, sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, p. 241-248, 2002.
- AMADO, T.J.C.; VILLALBA, E.O.H.; BORTOLOTTO, R.P.; SANTI, A.L.; LEÓN, E.A.B.; MENEFEE, D.; KUNZ, J. Efficiency of nitrogen fertilizer applied at corn sowing in contrasting growing seasons in Paraguay. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, p. 1641-1650, 2013.
- AMARAL FILHO, J.P.R.; FONASIERI FILHO, D.; FARINELLI, R.; BARBOSA, J.C. Espaçamento, densidade populacional e adubação nitrogenada na cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, p. 467-473, 2005.
- ARAÚJO, L.A.N.; FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P. Adubação nitrogenada na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 39, p. 771-777, 2004.
- ARGENTA, G.; SILVA, P.R.F.; FOSTHOFER, E.L.; STRIEDER, M.L.; SUHRE, E.; TEICHMANN, L.L. Adubação nitrogenada em milho pelo monitoramento do nível de nitrogênio na planta por meio do clorofilômetro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, p. 109-119, 2003.
- ASMAN, W.A.H.; SUTTON, M.A.; SCHJOERRING, J.K. Ammonia: emission, atmospheric transport and deposition. **New Phytologist**, Lancaster, v. 139, p. 27-48, 1998.

- BALDO, M.N. Comportamento anatômico, fisiológico e agronômico do milho (*Zea mays* L.) submetido a estresses de ambiente em diferentes estádios fenológicos. 2007. 91 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.
- BARRIE, A.; PROSSER, S.J. Automated analysis of light-element stable isotopes by isotope ratio mass spectrometry. In: BOUTTON, T.W.; YAMASAKI, S. (Ed.). **Mass spectrometry of soils**. New York: Marcel Dekker, 1996. p. 1-46.
- BENDER, R.R.; HAEGELE, J.W.; RUFFO, M.L.; BELOW, F.E. Nutrient uptake, partitioning, and remobilization in modern, transgenic insect-protected maize hybrids. **Agronomy Journal**, Madison, v. 105, p. 161-170, 2013.
- BLACK, A.S.; SHERLOCK, R.R.; SMITH, N.P. Effect of timing of simulated rainfall on ammonia volatilization from urea, applied to soil of varying moisture content. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 38, p. 679-687, 1987.
- BOARETTO, R.M.; MATTOS JÚNIOR, D.; QUAGGIO, J.A.; CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P.C.O. Absorption of ¹⁵NH₃ volatilized from urea by *Citrus* trees. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 365, p. 283-290, 2013.
- BORRELL, A.K.; HAMMER, G.L.; OOSTEROM, E.V. Stay-green: a consequence of the balance between supply and demand for nitrogen during grain filling. **Annals of Applied Biology**, London, v. 138, p. 91-95, 2001.
- BREMNER, J.M. Sources of nitrous oxide in soils. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 49, p. 7-16, 1997.
- BROADBENT, F.E.; HILL, G.N.; TYLER, K.B. Transformations and movement of urea in soils. **Soil Science Society of America Journal**. Madison, v. 22, p. 303-307, 1958.
- CANTARELLA, H.; DUARTE, A.P. Manejo da fertilidade do solo para a cultura do milho. In: GALVÃO, J.C.C.; MIRANDA, G.V. (Ed.). **Tecnologia de produção de milho**. Viçosa: UFV, 2004. p. 109-182.
- CANTARELLA, H.; LERA, F.I.; BOLONHEZI, D.; LARA CABEZAS, W.A.R.; TRIVELIN, P.C.O. Antecipação de N em milho em sistema de plantio direto usando ¹⁵N-ureia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DE SOLO, 24., 2003, Ribeirão Preto. **Anais...** Ribeirão Preto: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2003a. CD-ROM.
- CANTARELLA, H.; MATTOS JÚNIOR, D.; QUAGGIO, J.A.; RIGOLIN, A.T. Fruit yield of Valencia sweet orange fertilized with different N sources and the loss of applied N. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 67, p. 215-223, 2003b.
- CANTARELLA, H.; RAIJ, B. van; CAMARGO, C.E.O. Cereais. In: RAIJ, B. van; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. (Ed.). **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2. ed. rev. Campinas: IAC. 1997. p. 45-71. (Boletim Técnico, 100).

- CASAGRANDE, J.R.R.; FORNASIERI FILHO, D. Adubação nitrogenada na cultura do milho safrinha. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 37, p. 33-40, 2002.
- CAVALLET, L.E.; PESSOA, A.C.S.; HELMICH, J.J.; HELMICH, P.R.; OST, C.F. Produtividade do milho em resposta à aplicação de nitrogênio e inoculação das sementes com Azospirillum spp. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 4, p. 129-132, 2000.
- CIAMPITTI, I.A.; CAMBERATO, J.J.; MURREL, S.T.; VYN, T.J. Maize nutrient accumulation and partitioning in response to plant density and nitrogen rate: I. macronutrients. **Agronomy Journal**, Madison, v. 105, p. 783-795, 2013a.
- CIAMPITTI, I.A.; MURREL, S.T.; CAMBERATO, J.J.; TUINSTRA, M.; XIA, Y.; FRIEDEMANN, P.; VYN, T.J. Physiological dynamics of maize nitrogen uptake and partitioning in response to plant density and nitrogen stress factors: II. reproductive phase. **Crop Science**, Madison, v. 53, p. 1-15, 2013b.
- CIAMPITTI, I.A.; VYN, T.J. Grain nitrogen source changes over time in maize: a review. **Crop Science**, Madison, v. 53, p. 366-377, 2013.
- _____. 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.
- COELHO, A.M.; FRANÇA, G.C.; BAHIA, A.F.C.; GUEDES, G.A. Balanço de nitrogênio ¹⁵N em Latossolo Vermelho-Escuro, sob vegetação de cerrado, cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 95, p. 187-193, 1991.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira**: grãos. 4 Levantamento. Brasília, DF: Conab, 2014. 72 p.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO CONAB. **Acompanhamento da safra brasileira**: grãos. 9 Levantamento. Brasília, DF: Conab, 2013. 29 p.
- CONTE, M.L.; LEOPOLDO, P.R. Estimativa da retenção de água de chuva pela cultura do milho. **Engenharia Agrícola**, Botucatu, v. 10, p. 47-55, 1986.
- COQUE, M.; GALLAIS, A. Genetic variation for nitrogen remobilization and postsilking nitrogen uptake in maize recombinant inbred lines: Heritabilities and correlations among traits. **Crop Science**, Madison, v. 47, p. 1787-1796, 2007.
- COSTA, R.V.; CASELA, C.R.; COTA, L.V. Doenças. In: EMBRAPA. **Sistemas de Produção**: cultivo do milho. 5. ed. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2009. Disponível em:_http://www.cnpms.embrapa.br/publicacoes/milho_5_ed/doencas.htm. Acesso em: 20 fev. 2014.
- DA ROS, C.O.; AITA, C.; GIACOMINI, S.J. Volatilização de amônia com aplicação de uréia na superfície do solo, no sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, p. 799-805, 2005.

- DABNEY, S.M.; BOULDIN, D.R. Apparent deposition velocity and compensation point of ammonia inferred from gradient measurements above and through alfalfa. **Atmospheric Environment**, Oxford, v. 24, p. 2655-2666, 1990.
- DALMAGO, G.A.; BERGAMASCHI, H.; BERGONCI, J.I.; KRÜGER, C.A.M.B.; COMIRAN, F.; HECKLER, B.M.M. Retenção e disponibilidade de água às plantas, em solo sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, p. 855-864, 2009.
- DALMAGO, G.A.; BERGAMASCHI, H.; KRÜGER, C.A.M.B.; BERGONCI, J.I.; COMIRAN, F.; HECKLER, B.M.M. Evaporação da água na superfície do solo em sistemas de plantio direto e preparo convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 45, p. 780-790, 2010.
- DAWAR, K.; ZAMAN, M.; ROWARTH, J.S.; BLENNERRHSSETT, J.; TUMBULL, M.H. Urea hydrolysis and lateral and vertical movement in the soil: effects of urease inhibitor and irrigation. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 47, p. 139-146, 2011.
- DEBRUIN, J.; MESSINA, C.D.; MUNARO, E.; THOMPSON, K.; CONLON-BECKNER, C.; FALLIS, L.; SEVENICH, D.M.; GUPTA, R.; DHUGGA, K.S. N distribution in maize plant as a marker for grain yield and limits on its remobilization after flowering. **Plant Breeding**, Berlin, v. 132, p. 500-505, 2013.
- DORDAS, C. Dry matter, nitrogen and phosphorus accumulation, partitioning and remobilization as affected by N and P fertilization and source—sink relations. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 30, p. 129-139, 2009.
- DUETE, R.R.C.; MURAOKA, T.; SILVA, E.C.; TRIVELIN, P.C.O.; AMBROSANO, E.J. Manejo da adubação nitrogenada e utilização do nitrogênio (¹⁵N) pelo milho em Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 161-171, 2008.
- ERNANI, P.R. **Química do solo e disponibilidade de nutrientes**. Lages: O Autor, 2008. 230 p.
- ESCOLA SUPERIOR DE AGRICULTURA "LUIZ DE QUEIROZ" ESALQ. **Série de dados climatológicos do campus Luiz de Queiroz de Piracicaba, SP**. Departamento de Engenharia de Biossistemas, ESALQ/USP, 2013. Disponível em: http://www.leb.esalq.usp.br/postocon.html. Acesso em: 14 set. 2013.
- ESCOSTEGUY, P.A.V.; RIZZARDI, M.A.; ARGENTA, G. Doses e épocas de aplicação de nitrogênio em cobertura na cultura do milho em duas épocas de semeadura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, p. 71-77, 1997.
- FALLER, V. N. Sulfur dioxide, hydrogen sulfide, nitrous gases, and ammonia as sole source of sulfur and nitrogen for higher plants. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Berlin, v. 131, p. 120-130, 1972.
- FANCELLI, A.L.; DOURADO NETO D. **Produção de milho**. 2. ed. Guaíba: Agropecuária, 2004. 360 p.

- FARQUHAR, G.D.; FIRTH, P.M.; WETSELAAR, R.; WEIR, B. On the gaseous exchange of ammonia between leaves and the environment: Determination of the ammonia compensation point. **Plant Physiology**, Waterbury, v. 66, p. 710-714, 1980.
- FARQUHAR, G.D.; WETSELAAR, R.; FIRTH, P.M.; Ammonia volatilization from senescing leaves of maize. **Science**, Washington, DC, v. 203, p. 1257-1258, 1979.
- FEDDES, R.A. Water, heat and crop growth. 1971. 184 p. Thesis (Ph.D.) Institute of Land and Water Management Research, Wageningen Agricultural University, Wageningen, Netherlands, 1971.
- FENILLI, T.A.B.; REICHARDT, K.; TRIVELIN, P.C.O.; FAVARIN, J.L. Volatilization of ammonia derived from fertilizer and its reabsorption by coffee plants. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 38, p. 1741-1751, 2007.
- FERGUSON, J.J.; DAVIES, F.S.; MATTHEWS, C.H.; DAVIS, R.M. Controlled release fertilizers and growth of young 'Hamlin' orange trees. **Proceedings of the Florida State Horticultural Society**, Tallahassee, v. 101, p. 17-20, 1988.
- FERNANDES, F.C.S.; LIBARDI, P.L. Percentagem de recuperação de nitrogênio pelo milho, para diferentes doses e parcelamentos do fertilizante nitrogenado. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 6, p. 285-296, 2007.
- FISCHER, K.S.; PALMER, A.F.E. Maize. In: SYMPOSIUM ON POTENTIAL PRODUCTIVITY OF FIELD CROPS UNDER DIFFERENT ENVIRONMENTS, Los Baños, 1980. **Proceedings...** Los Baños: IRRI, 1980. p. 22-26.
- FRANÇA, G.E.; COELHO, A.M.; RESENDE, M.; BAHIA FILHO, A.F.C. Parcelamento da adubação nitrogenada em cobertura na cultura do milho irrigado. In: EMBRAPA. **Relatório Técnico Anual do Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo**: 1992-1993. Sete Lagoas: EMBRAPA, CNPMS, 1994. p. 28-29.
- FRANCIS, D.D.; SCHEPERS, J.S.; SIMS, A.L. Ammonia exchange from corn foliage during reproductive growth. **Agronomy Journal**, Madison, v. 89, p. 941-946, 1997.
- FRANCIS, D.D.; SCHEPERS, J.S.; VIGIL, M.F. Post-anthesis nitrogen loss from corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 85, p. 659-663, 1993.
- FREITAS, P.S.L.; MANTOVANI, E.C.; SEDIYAMA, G.C.; COSTA, L.C. Influência da cobertura de resíduos de culturas nas fases da evaporação direta da água do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, p. 104-111, 2006.
- GAVA, G.J.C. Compartimentalização do nitrogênio no sistema solo-planta na implantação da semeadura direta no ciclo da cultura do milho. 2003. 125 p. Tese (Doutorado em Ciências) Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.
- GAVA, G.J.C.; TRIVELIN, P.C.O.; OLIVEIRA, M.W.; HEINRICHS, R.; SILVA, M.A. Balanço do nitrogênio da ureia (¹⁵N) no sistema solo-planta na implantação da semeadura direta na cultura do milho. **Bragantia**, Campinas, v. 65, p. 477-486, 2006.

- GAVA, G.J.C.; OLIVEIRA, M.W.; SILVA, M.A.; JERÔNIMO, E.M.; CRUZ, J.C.S.; TRIVELIN, P.C.O. Produção de fitomassa e acúmulo de nitrogênio em milho cultivado com diferentes doses de ¹⁵N-ureia. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 31, p. 851-862, 2010.
- GESSLER, A.; RIENKS, M.; RENNEBERG, H. NH₃ and NO₂ fluxes between beech trees and the atmosphere correlation with climatic and physiological parameters. **New Phytologist**, Lancaster, v. 147, p. 539-560, 2000.
- _____. Stomatal uptake and cuticular adsorption contribute to dry deposition of NH₃ and NO₂ to needles of adult spruce (*Picea abies*) trees. **New Phytologist**, Lancaster, v. 156, p. 179-194, 2002.
- GOES, R.J.; RODRIGUES, R.A.F.; TAKASU, A.T.; ARF, O. Características agronômicas e produtividade do milho sob fontes e doses de nitrogênio em cobertura no inverno. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 12, p. 250-259, 2013.
- GOES, R.J.; RODRIGUES, R.A.F.; ARF, O.; VILELA, R.G. Nitrogênio em cobertura para o milho (*Zea mays* L.) em sistema plantio direto na safrinha. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 11, p. 169-177, 2012.
- GOMES, R.F.; SILVA, A.G.; ASSIS, R.L.; PIRES, F.R. Efeito de doses e da época de aplicação de nitrogênio nos caracteres agronômicos da cultura do milho sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 931-938, 2007.
- GONZÁLEZ VILLALBA, H.A. **Misturas de ureia revestida com polímero e ureia convencional na adubação da cultura do milho**. 2014. 91 p. Dissertação (Mestrado em Ciências) Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2014.
- GRUNDMANN, G.L.; LENSI, R.; CHALAMET, A. Delayed NH₃ and N₂O uptake by maize leaves. **New Phytologist**, Lancaster, v. 124, p. 259-263, 1993.
- HARGROVE, W.L. Soil, environmental, and management factors influencing ammonia volatilization under field conditions. In: BOCK, B.R.; KISSEL, D.E. (Ed.). **Ammonia volatilization from urea fertilizers.** Muscle Shoals: Tenessee Valley Authority-National Fertilizer Development Center, 1988. p. 17-36. (Bulletin, Y-206).
- HARPER, L.A.; CATCHPOOLE, V.R.; DAVIS, R.; WEIR, K.L. Ammonia volatilization: Soil, plant and microclimate effects on diurnal and seasonal fluctuations. **Agronomy Journal**, Madison, v. 75, p. 212-218, 1983.
- HAUCK, R.D. Nitrogen tracers in nitrogen cycle studies-past use and future needs. **Journal of Environmental Quality**, Madison, v. 2, p. 317-327, 1973.
- HAY, R.E.; EATLEY, E.B.; DETURK, E.E. Concentration and translocation of nitrogen compounds in the corn plant (*Zea mays*) during grain development. **Plant Physiology**, Waterbury, v. 28, p. 606-621, 1953.
- HAYNES, J.L. Ground rainfall under vegetative canopy of crops. **Agronomy Journal**, Madison, v. 32, p. 176-184, 1940.

- HE, P.; ZHOU, W.; JIN, J. Carbon and nitrogen metabolism related to grain formation in two different senescent types of maize. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 27, p. 295-311, 2005.
- HIREL, B.; LEA, P.J. Ammonia assimilation. In: LEA, P.J.; MOROT-GAUDRY, J.F. (Ed.). **Plant nitrogen**, Berlin: Springer-Verlag, 2001. p. 79-99.
- HOLTAN-HARTWIG, L.; BOCKMAN, O.C. Ammonia exchange between crops and air. **Norwegian Journal of Agricultural Sciences**, Ås, Norway, v. 14, p. 1-41, 1994. Supplement.
- HUBER, D.M.; TSAI, C.Y.; STROMBERGER, J.A. Interaction of K with N and their influence on growth and yield potential of maize. In: ANNUAL CORN AND SORGHUM RESEARCH CONFERENCE, 48., 1994, Chicago. **Proceedings...** Chicago: American Seed Trade Association, 1994. p. 165-176.
- HUSTED, S.; MATTSSON, M.; SCHJOERRING, J.K. Ammonia compensation points in two cultivars of *Hordeum vulgare* L. during vegetative and generative growth. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 19, p. 1299-1306, 1996.
- HUTCHINSON, G.L.; MILLINGTON, R.J.; PETERS, D.B. Atmospheric ammonia: absorption by plant leaves. **Science**, Washington, DC, v. 175, p. 771-772, 1972.
- IDSO, S.B.; REGINATO, R.J.; JACKSON, R.D.; KIMBALL, K.B.; NAKAYAMA, F.S. The three stages of drying in a field soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 38, p. 831-837, 1974.
- JACOBS, A.F.G.; BOXEL, J.H. Horizontal and vertical distribution of wind speed in a vegetation canopy. **Netherlands Journal of Agricultural Science**, Wageningen, v. 39, p. 165-178, 1991.
- JENSEN, M.; BURMAN, R.D.; ALLEN, R.G. Evapotranspiration and irrigation water requirements. New York: ASCE, 1990. 332 p. (Manuals and reports on engineering practice, 70).
- JHONSON, J.W.; KURTZ, L.T. A technique for reducing ¹⁵N required for field experiments with labeled nitrogen fertilizer. **Soil Science**, Baltimore, v. 117, p. 315-317, 1974.
- KARLEN, D.L.; FLANNERY, R.L.; SADLER, E.J. Aerial accumulation and partitioning of nutrients by corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 80, p. 232-242, 1988.
- KELLER G.D.; MENGEL D.B. Ammonia volatilization from nitrogen fertilizers surface applied to non-till corn. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 50, p. 1060-1063, 1986.
- KHANIF, Y.M. Ammonia volatilization from Malaysian soils following application of urea. **Pertanika**, Selangor, v. 15, p. 115-120, 1992.
- KIEHL, J.C. Distribuição e retenção da amônia no solo após aplicação de ureia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 13, p. 75-80, 1989.

- LANGE, A. Manejo da adubação nitrogenada na cultura do milho após cultivo da soja em sistema de semeadura direta no Cerrado. 2006. 135 p. Tese (Doutorado em Ciências) Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.
- LANGE, A.; LARA CABEZAS, W.A.; TRIVELIN, P.C.O. Produtividade de palha e de milho no sistema semeadura direta, em função da época da aplicação do nitrogênio no milho. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 8, p. 57-68, 2009.
- _____. Sulfato de amônio e uréia em cobertura no milho em semeadura direta no Cerrado. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 57, p. 817-824, 2010.
- _____. Recuperação do nitrogênio das fontes sulfato e nitrato de amônio pelo milho em sistema semeadura direta. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 43, p. 123-130, 2008.
- LARA CABEZAS, W.A.R.; TRIVELIN, P.C.O. Eficiência de um coletor semi-aberto estático na quantificação de N-NH₃ volatilizado da uréia aplicada ao solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 14, p. 345-352, 1990.
- LARA CABEZAS, 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.
- LARA CABEZAS, W.A.R.; TRIVELIN, P.C.O.; BENDASSOLLI, J.A.; SANTANA, D.G.; GASHO, G.J. Calibration of a semi-open static collector for determination of ammonia volatilization from nitrogen fertilizers. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 30, p. 389-406, 1999.
- 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**, Viçosa, v. 24, p. 363-376, 2000.
- LARA CABEZAS, W.A.R.; ALVES, B.J.R.; CABALLERO, S.S.U.; SANTANA, D.G. Influência da cultura antecessora e da adubação nitrogenada na produtividade de milho em sistema plantio direto e solo preparado. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, p. 1005-1013, 2004.
- LARA CABEZAS, W.A.R.; ARRUDA, M.R.; CANTARELLA, H.; PAULETTI, V.; TRIVELIN, P.C.O.; BENDASSOLLI, J.A. Imobilização de nitrogênio da ureia 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, p. 215-226, 2005.
- LEMON, E.R. The potentialities for decreasing soil moisture evaporation loss. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 20, p. 120-125, 1956.
- LEOPOLDO, P.R.; SOUSA, A.P.; TUACEK FILHO, S. Interceptação da água de chuva em cultura da cana-de-açúcar. **Brasil Açucareiro**, Botucatu, v. 98, p. 9-16, 1981.

- LIANG, B.C.; MACKENZIE, A.F. Corn yield, nitrogen uptake and nitrogen use efficiency as influenced by nitrogen fertilization. **Canadian Journal of Soil Science**, Manitoba, v. 74, p. 235-240, 1994.
- LIGHTNER, J.W.; MENGEL, D.B.; RHYKERD, C.L. Ammonia volatilization from nitrogen fertilizer surface applied to orchardgrass sod. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 54, p. 1478-1482, 1990.
- LOCKYER, D.R.; WHITEHEAD, D.C. The uptake of gaseous ammonia by the leaves of Italian ryegrass. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 37, p. 919-927, 1986.
- LÜ, P.; ZHANG, J.W.; JIN, L.B.; LIU, W.; DONG, S.T.; LIU, P. Effects of nitrogen application stage on grain yield and nitrogen use efficiency of high-yield summer maize. **Plant, Soil and Environment**, Prague, v. 58, p. 211-216, 2012.
- LUCCHESI, A.A. Utilização prática da análise de crescimento vegetal. **Anais da Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz"**, Piracicaba, v. 41, p. 181-201, 1984.
- MA, B.L.; DWYER, M.L. Nitrogen uptake and use in two contrasting maize hybrids differing in leaf senescence. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 199, p. 283-291, 1998.
- MARTHA JÚNIOR, G.B.; TRIVELIN, P.C.O.; CORSI, M. Absorção foliar pelo capimtanzânia da amônia volatilizada do ¹⁵N-ureia aplicado ao solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 103-108, 2009.
- MARTIN, J.P.; CHAPMAN, H.D. Volatilization of ammonia from surface-fertilized soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 71, p. 25-34, 1951.
- MARTORANO, L.G.; BERGAMASCHI, H.; DALMAGO, G.A.; FARIA, R.T.; MIELNICZUK, J.; COMIRAN, F. Indicadores da condição hídrica do solo com soja em plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 13, p. 397-405, 2009.
- MASSAD, R.S.; NEMITZ, E.; SUTTON, M.A. Review and parameterisation of bi-directional ammonia exchange between vegetation and the atmosphere. **Atmospheric Chemistry and Physics**, Munich, v. 10, p. 10359-10386, 2010.
- MATTOS JÚNIOR, D.; ALVA, A.K.; PARAMASIVAM, S.; GRAETZ, D.A. Nitrogen volatilization and mineralization in a sandy soil of Florida under citrus. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 34, p. 1803-1824, 2003.
- MATTSSON, M.; HAUSLER, R.E.; LEEGOOD, R.C.; SCHJOERRING, J.K. Leaf-atmosphere NH₃ exchange in barley mutants with reduced activities of glutamine synthetase. **Plant Physiology**, Waterbury, v. 114, p. 1307-1312, 1997.
- MATTSSON, M.; SCHJOERRING, J.K. Characteristics of ammonia emission from barley plants. **Plant Physiology and Biochemistry**, Amsterdam, v. 34, p. 691-695, 1996.

- MEIRA, F.A.; BUZETTI, S.; ANDREOTTI, M.; ARF, O.; SÁ, M.E.; ANDRADE, J.A.C. Fontes e épocas de aplicação do nitrogênio na cultura do milho irrigado. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 30, p. 275-284, 2009.
- MUZILLI, O. Influência do sistema de plantio direto, comparado ao convencional, sobre a fertilidade da camada arável do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 7, p. 95-102, 1983.
- NING, P.; LI, S.; YU, P.; ZHANG, Y.; LI, C. Post-silking accumulation and partitioning of dry matter, nitrogen, phosphorus and potassium in maize varieties differing in leaf longevity. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 144, p. 19-27, 2013.
- NÖMMIK, H. The effect of pellet size on the ammonia loss from urea applied to forest soil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 39, p. 308-318, 1973.
- OHLAND, R.A.A.; SOUZA, L.C.F.; HERNANI, L.C.; MARCHETTI, M.E.; GONÇALVES, M.C. Culturas de cobertura do solo e adubação nitrogenada no milho em plantio direto. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, p. 538-544, 2005.
- PAPONOV, I.A.; ENGELS, C. Effect of nitrogen supply on carbon and nitrogen partitioning after flowering in maize. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science**, Berlin, v. 168, p. 447-453, 2005.
- PARKIN, T.B.; CODLING, E.E. Rainfall distribution under a corn canopy: Implications for managing agrochemicals. **Agronomy Journal**, Madison, v. 82, p. 1166-1169, 1990.
- PARTON, W.J.; MORGAN, J.A.; ALTENHOFEN, J.M.; HARPER, L.A. Ammonia volatilization from spring wheat plants. **Agronomy Journal**, Madison, v. 80, p. 419-425, 1988.
- PAULETTI, V.; COSTA, L.C. Época de aplicação de nitrogênio no milho cultivado em sucessão à aveia preta no sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, p. 599-603, 2000.
- PEARSON, C.J.; JACOBS, B.C. Yield components and nitrogen partitioning of maize in response to nitrogen before and after anthesis. **Australian Journal of Agricultural Research**, Melbourne, v. 38, p. 1001-1009, 1987.
- PEARSON, J.; STEWART, G.R. The deposition of atmospheric ammonia and its effects on plants. **New Phytologist**, Lancaster, v. 125, p. 283-305, 1993.
- PEREIRA, H.S.; LEÃO, A.F.; VERGINASSI, A.; CARNEIRO, M.A.C. Ammonia volatilization of urea in the out-of-season corn. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, p. 1685-1694, 2009.
- PING, J.; BREMER, E.; JANZEN, H.H. Foliar uptake of volatilized ammonia from surface-applied urea by spring wheat. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 31, p. 165-172, 2000.

- PIONEER. **Híbridos de milho**: 30F35HR. Santa Cruz do Sul, RS, 2014. Disponível em: http://www.pioneersementes.com.br/Milho/Central-de-Produtos/Pages/Ficha-do-Produto.aspx?p=62. Acesso em: 15 fev. 2014.
- POMMEL, B.; GALLAIS, A.; COQUE, M.; QUILLERÉ, I.; HIREL, B.; PRIOUL, J.L.; ANDRIEU, B.; FLORIOT, M. Carbon and nitrogen allocation and grain filling in three maize hybrids differing in leaf senescence. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 24, p. 203-211, 2006.
- PÖTTKER, D.; WIETHÖLTER, S. Épocas e métodos de aplicação de nitrogênio em milho cultivado no sistema plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, p. 1015-1020, 2004.
- POWLSON, D.S.; BARRACLOUGH, D. Mineralization and assimilation in soil-plant system. In: KNOWLES, R.; BLACKBURN, T.H. (Ed.). **Nitrogen isotope techniques**. San Diego: Academic Press, 1993. p. 209-242.
- RAJCAN, I.; TOLLENAAR, M. Source:sink ratio and leaf senescence in maize. I. Dry matter accumulation and partitioning during grain filling. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 60, p. 245-253, 1999.
- RAMBO, L.; SILVA, P.R.F.; STRIEDER, M.L.; SANGOI, L.; BAYER, C.; ARGENTA, G. Monitoramento do nitrogênio na planta e no solo para predição da adubação nitrogenada em milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 42, p. 407-417, 2007.
- RANDALL, G.W.; VETSCH, J.A. Corn production on a subsurface drained mollisol as affected by fall versus spring application of nitrogen and nitrapyrin. **Agronomy Journal**, Madison, v. 97, p. 472-478, 2005.
- RANDALL, G.W.; VETSCH J.A.; HUFFMAN J.R. Corn production on a subsurface-drained mollisol as affected by time of nitrogen application and nitrapyrin. **Agronomy Journal**, Madison, v. 95, p. 1213-1219, 2003.
- 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**, Dordrecht, v. 33, p. 209-217, 1992.
- RAVEN, J.A. Acquisition of nitrogen by the shoots of land plants: its occurrence and implications for acid-base regulation. **New Phytologist**, Lancaster, v. 109, p. 1-20, 1988.
- RENNENBERG, H.; GESSLER, A. Consequences of N deposition to forest ecosystems recent results and future research needs. **Water, Air and Soil Pollution**, Dordrecht, v. 116, p. 47-64, 1999.
- RITCHIE, J.T. Model for predicting evaporation from a crop with incomplete cover. **Water Resources Research**, Washington, DC, v. 8, p. 1204-1213, 1972.
- RITCHIE, S.W.; HANWAY, J.J.; BENSON, G.O. **How a corn plant develops**. Ames: Iowa State University of Science and Technology, 1993. 21 p. (Cooperative Extension Service. Special Report, 48).

- ROGERS, H.H.; ANEJA, V.P. Uptake of atmospheric ammonia by selected plant species. **Environmental and Experimental Botany**, Amsterdam, v. 20, p. 251-257, 1980.
- ROZAS, H.R.S.; ECHEVERRÍA, H.E.; BARBIERI, P.A. Nitrogen balance as affected by application time and nitrogen fertilizer rate in irrigated no-tillage maize. **Agronomy Journal**, Madison, v. 96, p. 1622-1631, 2004.
- RUIZ-DIAZ, D.A.; SAWYER, J.E. Plant available nitrogen from poultry manure as affected by time of application. **Agronomy Journal**, Madison, v. 100, p. 1318-1326, 2008.
- SANCHEZ, C.A.; BLACKMER, A.M. Recovery of anhydrous ammonia-derived nitrogen-15 during three years of corn production in Iowa. **Agronomy Journal**, Madison, v. 80, p. 102-108, 1988.
- SANGOI, L.; ENDER, M.; GUIDOLIN, A.F.; KONFLANZ, V.A. Nitrogen fertilization impact on agronomic traits of maize hybrids released at different decades. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 36, p. 757-764, 2001.
- SANGOI, L.; ERNANI, P.R.; LECH, V.A.; RAMPAZZO, C. Volatilização de N-NH₃ em decorrência da forma de aplicação de ureia, manejo de resíduos e tipo de solo, em laboratório. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, p. 687-692, 2003.
- SANGOI, L.; ERNANI, P.R.; SILVA, P.R.F. Maize response to nitrogen fertilization timing in two tillage systems in a soil with high organic matter content. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 507-517, 2007.
- SANTOS, G.R.; GAMA, F.R.; GONÇALVES, C.G.; RODRIGUES, A.C.; LEÃO, E.U.; CARDON, C.H.; BONIFACIO, A. Severidade de doenças foliares e produtividade de genótipos de milho em resposta à adubação nitrogenada. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 60, p. 505-513, 2013a.
- SANTOS, L.P.D.; AQUINO, L.A.; NUNES, P.H.M.P.; XAVIER, F.O. Doses de nitrogênio na cultura do milho para altas produtividades de grãos. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 12, p. 270-279, 2013b.
- 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.
- SAS INSTITUTE INC. **SAS software Version 9.2**. Cary, NC, 2009.
- SCHJOERRING, J.K.; HUSTED, S.; MATTSSON, M. Physiological parameters controlling plant-atmosphere ammonia exchange. **Atmospheric Environment**, Oxford, v. 32, p. 491-498, 1998.
- SCHJOERRING, J.K.; KYLLINGSBAEK, A.; MORTENSEN, J.V.; BYSKOV-NIELSEN, S. Field investigations of ammonia exchange between barley and plants and the atmosphere. I. Concentration profiles and flux densities of ammonia. **Plant, Cell and Environment**, Oxford, v. 16, p. 161-167, 1993.

- SCHLESINGER, W.H.; HARTLEY, A.E. A global budget for atmospheric NH₃. **Biogeochemistry**, Dordrecht, v. 15, p. 191-211, 1992.
- SCHULZE, E.D.; DE VRIES, W.; HAUS, M.; ROSÉN, K.; RASMUSSEN, L.; TAMM, C.O.; NILSSON, J. Critical loads for nitrogen deposition on forest ecosystems. **Water, Air and Soil Pollution**, Dordrecht, v. 48, p. 451-456, 1989.
- SCIVITTARO, W.B.; MURAOKA, T.; BOARETTO, A.E.; TRIVELIN, P.C.O. Transformações do nitrogênio proveniente de mucuna-preta e uréia utilizados como adubo na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 38, p. 1427-1433, 2003.
- SCIVITTARO, W.B.; MURAOKA, T.; BOARETTO, A.E.; TRIVELIN, P.C.O. Utilização de nitrogênio de adubos verdes e mineral pelo milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 917-926, 2000.
- SILVA, C.L.; RAMOS, M.M.; FERREIRA, P.A.; SEDIYAMA, G.C.; LOUREIRO, B.T. Medição e simulação da interceptação foliar da água na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 29, p. 1735-1741, 1994.
- SILVA, D.R.G.; PEREIRA, A.F.; DOURADO, R.L.; SILVA, F.P.; ÁVILA, F.W.; FAQUIN, V. Productivity and efficiency of nitrogen fertilization in maize under different levels of urea and NBPT-treated urea. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, p. 516-523, 2011.
- 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**, Viçosa, 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**, Viçosa, v. 29, p. 725-733, 2005b.
- SILVA, E.C.; MURAOKA, T.; BUZETTI, S.; TRIVELIN, P.C.O. Manejo de nitrogênio no milho em Latossolo Vermelho sob plantio direto com diferentes plantas de cobertura. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, p. 477-486, 2006.
- SILVA, E.C.; MURAOKA, T.; MONTEIRO, R.O.C.; BUZETTI, S. Análise econômica da adubação nitrogenada no milho sob plantio direto em sucessão a plantas de cobertura em Latossolo Vermelho. **Acta Scientiarum: Agronomy**, Maringá, v. 29, p. 445-452, 2007.
- SILVA, M.M.; LIBARDI, P.L.; FERNANDES, F.C.S. Nitrogen doses and water balance components at phenological stages of corn. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 66, p. 515-521, 2009.
- SILVA, P.R.F.; STRIEDER, M.L.; COSER, R.P.S.; RAMBO, L.; SANGOI, L.; ARGENTA, G.; FORSTHOFER, E.L.; SILVA, A.A. Grain yield and kernel crude protein content increases of maize hybrids with late nitrogen side-dressing. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v. 62, p. 487-492, 2005c.

- SILVA, P.S.L.; SILVA, P.I.B. Efeitos de épocas de aplicação de nitrogênio no rendimento de grãos do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 37, p. 1057-1064, 2002.
- SINGH, R.; NYE, P.H. The effect of soil pH and high urea concentrations on urease activity in soil. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 35, p. 519-527, 1984.
- SOMMER, S.G.; JENSEN, E.S.; SCHJOERRING, J.K. Leaf absorption of atmospheric ammonia emitted from pig slurry applied beneath the canopy of winter wheat. **Acta Agriculturae Scandinavica**, Copenhagen, v. 43, p. 21-24, 1993.
- SOMMER, S.G.; OLESEN, J.E.; CHRISTENSEN, B.T. Effects of temperature, wind speed and air humidity on ammonia volatilization from surface applied cattle slurry. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 117, p. 91-100, 1991.
- SOMMER, S.G.; SCHJOERRING, J.K.; DENMEAD, O.T. Ammonia emission from mineral fertilizers and fertilized crops. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 82, p. 557-622, 2004.
- SORATTO, R.P.; PEREIRA, M.; COSTA, T.A.M.; LAMPERT, V.N. Fontes alternativas e doses de nitrogênio no milho safrinha em sucessão à soja. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v. 41, p. 511-518, 2010.
- SOUZA, A.C.; CARVALHO, J.G.; VON PINHO, R.G.; CARVALHO, M.L.M. Parcelamento e época de aplicação de nitrogênio e seus efeitos em características agronômicas do milho. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 25, p. 321-329, 2001.
- SOUZA, L.C.F.; GONÇALVES, M.C.; ALVES SOBRINHO, T.; FEDATTO, E.; ZANON, G.D.; HASEGAWA, E.K.B. Culturas antecessoras e adubação nitrogenada na produtividade de milho em plantio direto irrigado. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 2, p. 55-62, 2003.
- STEWART, G.R.; SUMAR, N.; PATEL, M. Comparative aspects of inorganic nitrogen assimilation in higher plants. In: ULLRICH, W.R.; APARICIO, P.J.; SYRETT, P.J.; CASTILLO, F. (Ed.). **Inorganic nitrogen metabolism**. Berlin: Springer, 1987. p. 39-44.
- 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**, Viçosa, v. 30, p. 879-890, 2006.
- STUTTE, C.A.; WEILAND, R.T. Gaseous nitrogen loss and transpiration of several crop and weed species. **Crop Science**, Madison, v. 18, p. 887-889, 1978.
- SUTTON, M.A.; SCHJOERRING, J.K.; WYERS, G.P. Plant-atmosphere exchange of ammonia. **Philosophical Transactions: Physical Sciences and Engineering**, London, v. 351, p. 261-278, 1995.
- TA, C.T.; WEILAND, R.T. Nitrogen partitioning in maize during ear development. **Crop Science**, Madison, v. 32, p. 443-451, 1992.
- TAIZ, L.; ZEIGER, E. Plant physiology. 5. ed. New York: Sinauer, 2010. 782 p.

TERMAN, G.L. Volatilization losses of nitrogen as ammonia from surface applied fertilizers, organic amendments, and crop residues. **Advances in Agronomy**, San Diego, v. 31, p. 189-223, 1979.

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

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

TRIBOI, E.; TRIBOI-BLONDEL, A.M. Productivity and grain or seed composition: a new approach to an old problem - invited paper. **European Journal of Agronomy**, Amsterdam, v. 16, p. 163-186, 2002.

TRIVELIN, P.C.O.; OLIVEIRA, M.W.; VITTI, A.C.; GAVA, G.J.C.; BENDASSOLLI, J.A. Perdas do nitrogênio da ureia no sistema solo-planta em dois ciclos de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, DF, v. 37, p. 193-201, 2002.

UHART, S.A.; ANDRADE, F.H. Nitrogen and carbon accumulation and remobilization during grain filling in maize under different source/sink ratios. **Crop Science**, Madison, v. 35, p. 183-190, 1995.

VAN HOVE, L.W.A.; KOOPS, A.J.; ADEMA, E.H.; VREDENBERG, W.J.; PIETERS, G.A. Analysis of the uptake of atmospheric ammonia by leaves of *Phaseolus vulgaris* L. **Atmospheric Environment**, Oxford, v. 21, p. 1759-1763, 1987.

VAN HOVE, L.W.A.; VREDENBERG, W.J.; ADEMA, E.H. The effect of wind velocity, air temperature and humidity on NH₃ and SO₂ transfer into bean leaves (*Phaseolus vulgaris* L.). **Atmospheric Environment. Part A. General Topics**, Oxford, v. 24, p. 1263-1270, 1990.

VENTURA, F.; SNYDER, R.L.; BALI, K.M. Estimating evaporation from bare soil using soil moisture data. **Journal of Irrigation and Drainage Engineering**, Reston, v. 132, p. 153-158, 2006.

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

VITTI, A.C.; TRIVELIN, P.C.O.; GAVA, G.J.C.; FRANCO, H.C.J.; BOLOGNA, I.R.; FARONI, C.E. Produtividade da cana-de-açúcar relacionada à localização de adubos nitrogenados aplicados sobre os resíduos culturais em canavial sem queima. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 491-498, 2007.

WAGENET, R.J.; BIGGAR, J.W.; NIELSEN, D.R. Tracing the transformation of urea fertilizer during leaching. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 41, p. 896-902, 1977.

WAHHAB, A.; RANDHAWA, M.S.; ALAM, S.Q. Loss of ammonia from ammonium sulphate under different conditions when applied to soils. **Soil Science**, Baltimore, v. 84, p. 249-256, 1957.

WALTERS, D.T.; MALZER, G.L. Nitrogen management and nitrification inhibitor effects on nitrogen-15 urea: I. yield and fertilizer use efficiency. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, p. 115-122, 1990.

WEILAND, R.T.; OMHOLT, T.E. Method for monitoring nitrogen gas exchange from plant foliage. **Crop Science**, Madison, v. 25, p. 359-361, 1985.

WHITEHEAD, D.C.; LOCKYER, D.R. The influence of the concentration of gaseous ammonia on its uptake by the leaves of Italian ryegrass, with and without an adequate supply of nitrogen to the roots. **Journal of Experimental Botany**, Oxford, v. 38, p. 818-827, 1987.

WOLFE, D.W.; HENDERSON, D.W.; HSIAO, T.C.; ALVINO, A. Interactive water and nitrogen effects on senescence of maize. I. Leaf area duration, nitrogen distribution, and yield. **Agronomy Journal**, Madison, v. 80, p. 859-864, 1988.

YAMULKI, S.; HARRISON, R.M.; GOULDING, K.W.T. Ammonia surface-exchange above an agricultural field in southeast England. **Atmospheric Environment**, Oxford, v. 30, p. 109-118, 1996.

YUAN, C.P.; LEI, T.W.; MAO, L.L.; LIU, H.; WU, Y. Soil surface evaporation processes under mulches of different sized gravel. **Catena**, Amsterdam, v. 78, p. 117-121, 2009.

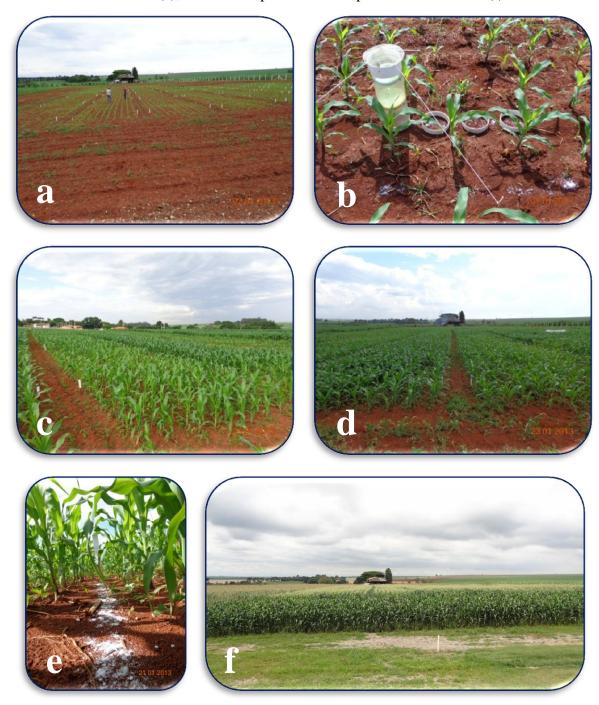
ZHANG, L.X.; QIANG, H.; LI, S.Q.; CHEN, X.L. Impact of atmospheric ammonia on growth, C and N accumulation and photosynthesis of two maize cultivars with different N root supply. **Plant, Soil and Environment**, Prague, v. 57, v. 11-18, 2011.

ZHANG, S.L.; CAI, G.X.; WANG, X.Z.; XU, Y.H.; ZHU, Z.L.; FRENEY, J.R. Losses of urea-nitrogen applied to maize grown on a calcareous fluvo-aquic soil in North China Plain. **Pedosphere**, Nanjing, v. 2, p. 171-178, 1992.

ZHENGPING, W.; CLEEMPUT, O.V.; BAERT, L. Movement of urea and its, hydrolysis products as influenced by moisture content and urease inhibitors. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 22, p. 101-108, 1996.

APÊNDICES

Apêndice A - Detalhes da área experimental (a), da instalação dos coletores de amônia semiaberto estáticos (b), das parcelas com diferentes tons de verde devido à aplicação ou não de N em cobertura (c, d), da miniparcela com aplicação de ¹⁵N-ureia (e), e da área experimental em pleno florescimento (f)

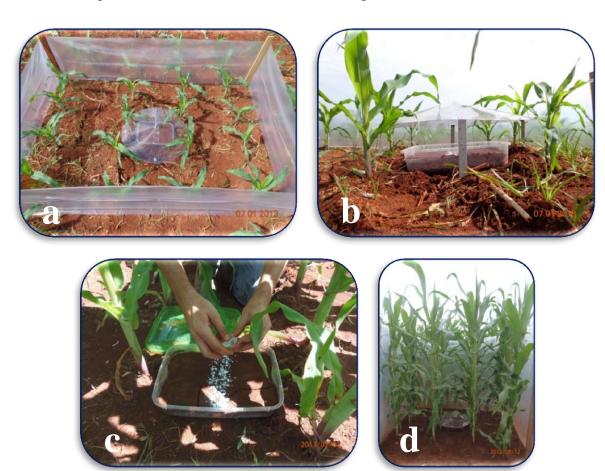


Apêndice B - Tratos culturais realizados no milho nas safras 2011/12 e 2012/13

Operação	Ingrediente ativo	Safra			
		2011/12		2012/13	
		Dose	Data	Dose	Data
Semeadura	-	-	08/12/2011	-	19/12/2012
Aplicação de herbicida Roundup WG	Glifosato (750 g kg ⁻¹ - equivalente ácido)	1,5 kg ha ⁻¹ do p.c.	20/12/2011	1,5 kg ha ⁻¹ do p.c.	28/12/2012
Aplicação de inseticida Acefato	Acefato (750 g kg ⁻¹)	-	-	0,7 L ha ⁻¹ do p.c.	28/12/2012
Aplicação de potássio (KCl)	-	60 kg ha ⁻¹ de K ₂ O	27/12/2011	60 kg ha ⁻¹ de K ₂ O	06/01/2013
Aplicação de herbicida Roundup WG	Glifosato (750 g kg ⁻¹ - equivalente ácido)	1 kg ha ⁻¹ do p.c.	02/01/2012	1 kg ha ⁻¹ do p.c.	21/01/2013
Aplicação de fungicida Priori xtra	Azoxistrobina (200 g L ⁻¹) Ciproconazol (80 g L ⁻¹)	-	-	0,45 L ha ⁻¹ do p.c.	24/01/2013
Aplicação de inseticida Engeo Pleno	Tiametoxam (141 g L ⁻¹) Lambda-cialotrina (106 g L ⁻¹)	-	-	0,25 L ha ⁻¹ do p.c.	24/01/2013
Aplicação de fungicida Priori xtra	Azoxistrobina (200 g L ⁻¹) Ciproconazol (80 g L ⁻¹)	-	1	0,35 L ha ⁻¹ do p.c.	11/02/2013
Aplicação de inseticida Engeo Pleno	Tiametoxam (141 g L ⁻¹) Lambda-cialotrina (106 g L ⁻¹)	-	-	0,25 L ha ⁻¹ do p.c.	11/02/2013
Aplicação de inseticida Brilhante	Metomil (215 g L ⁻¹)	-	-	1L ha ⁻¹ do p.c.	11/02/2013

p.c. = produto comercial.

Apêndice C - Detalhes do isolamento das plantas com lona plástica (miniparcela) e a localização da bandeja com solo e ureia com ¹⁵N (a), da cobertura das bandejas com PVC (b), da aplicação da ureia com ¹⁵N sobre o solo da bandeja (c), e da parcela imediatamente antes a coleta das plantas (d)



Apêndice D - Detalhe de espiga atacada por diplodia (a), de espigas atacadas por diplodia em meio a espigas saudáveis (b), de sintomas de diplodia em folhas (c), e da senescência precoce de folhas de milho (d)

