

VOLATILIZAÇÃO DE AMÔNIA DA UREIA ALTERADA POR SISTEMAS DE PREPARO DE SOLO E PLANTAS DE COBERTURA INVERNAIS NO CENTRO-SUL DO PARANÁ⁽¹⁾

Carlos Andrés Leguizamón Rojas⁽²⁾, Cimélio Bayer⁽³⁾, Sandra Mara
Vieira Fontoura⁽⁴⁾, Mirla Andrade Weber⁽⁵⁾ & Fernando Vieiro⁽⁵⁾

RESUMO

O sistema plantio direto (PD) intensifica as perdas de N da ureia por volatilização, em comparação ao preparo convencional (PC). O objetivo deste estudo foi avaliar a magnitude desse efeito nas condições de temperatura amena e primavera chuvosa da região Centro-Sul do Paraná, bem como avaliar a influência de diferentes plantas de cobertura invernais (aveia-branca e ervilhaca comum) nas perdas de amônia (NH₃) em PD. O estudo sobre o efeito dos preparos de solo foi realizado em experimento de longa duração (28 anos), e a avaliação das plantas de cobertura foi feita em experimento implantado especificamente com esse fim em área em PD por longo período (> 15 anos). Em ambos os experimentos cultivou-se milho. A ureia foi aplicada nas doses de 0, 80 e 160 kg ha⁻¹ de N em apenas uma aplicação no experimento de preparos, e nas doses de 0, 100 e 200 kg ha⁻¹ de N, divididas em duas aplicações, no experimento de plantas de cobertura. A volatilização de amônia foi avaliada durante 20 dias após a aplicação da ureia, utilizando coletores semiabertos estáticos. A atividade da urease no solo foi avaliada em ambos os experimentos. As maiores taxas de perda de NH₃ ocorreram nos cinco dias que sucederam à aplicação de ureia. As perdas acumuladas atingiram 18 % da dose aplicada no PD e 3 % no PC, e as maiores perdas no PD podem ser parcialmente relacionadas à maior atividade da urease na camada superficial do solo. A volatilização de amônia não foi alterada

⁽¹⁾ Parte da Tese de Doutorado do primeiro autor apresentada ao PPG em Ciência do Solo da Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Recebido para publicação em 2 fevereiro de 2011 e aprovado em 13 de outubro de 2011.

⁽²⁾ Professor Adjunto do Departamento de Suelos y Ordenamiento Territorial, Facultad de Ciencias Agrarias, Universidad Nacional de Asunción. Caixa Postal 1618, Campus Universitario, San Lorenzo, Paraguai. E.mail: andresolos@hotmail.com

⁽³⁾ Professor Associado do Departamento de Solos e do PPG em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul – UFRGS. Av. Bento Gonçalves 7712, CEP 91540-000 Porto Alegre (RS). Bolsista CNPq. E.mail: cimelio.bayer@ufrgs.br

⁽⁴⁾ Pesquisadora da Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária – FAPA. Colônia Vitória, Guarapuava (PR). E.mail: sandrav@agraria.com.br

⁽⁵⁾ Doutoranda e Mestrando do PPG em Ciência do Solo, UFRGS. E.mail: alrimbr@yahoo.com.br; fvieiro@gmail.com

pelo tipo de planta de cobertura. O parcelamento da adubação nitrogenada em cobertura por si só não garante a diminuição das perdas de N por volatilização, a qual é relacionada à ocorrência de chuva no período imediatamente posterior à aplicação da ureia.

Termos de indexação: plantio direto, urease.

SUMMARY: AMMONIA VOLATILIZATION FROM UREA AS AFFECTED BY TILLAGE SYSTEMS AND WINTER COVER CROPS IN THE SOUTH-CENTRAL REGION OF PARANÁ

Nitrogen losses from urea by ammonia volatilization are higher from no-tillage than from conventional tillage. The objective of this study was to evaluate the magnitude of this process under cool and wet spring conditions in the South-Central region of the State of Paraná and to evaluate the influence of two winter cover crops (black oat and common vetch) on ammonia volatilization in no-tillage. The tillage systems were compared in a long-term tillage experiment (28 years) and the cover crops tested separately in a long-term (> 15 yr) no-tillage area. Maize was grown in both experiments. Urea was applied at rates of 0, 80 and 160 kg ha⁻¹ N in a single application in the tillage experiment and at rates of 0, 100 and 200 kg ha⁻¹ N, split in two applications, in the cover crop experiment. Volatilization of NH₃ was measured for 20 days after urea application in a semi-open static system. Urease activity was evaluated in both experiments. The NH₃ loss rates were highest 5 days after urea application. Cumulative ammonia losses reached 18% of the applied N in no-tillage and 3% in conventional tillage. The higher losses from no-tillage may be partially related to the greatest urease activity in the soil surface layer. Ammonia volatilization was not affected by cover crops. As an isolated practice, split surface N fertilization does not ensure a decrease of NH₃ losses, which are primarily related to rain events immediately after urea application.

Index terms: no-tillage, urease.

INTRODUÇÃO

A cultura do milho tem grande importância econômica no Brasil. Na safra de 2009/2010, ocupou uma área ao redor de 13 milhões de hectares no País, sendo responsável pela produção de aproximadamente 56 milhões de toneladas de grãos (Conab, 2010). A cultura do milho demanda elevada quantidade de N para alcançar altos rendimentos de grãos. Segundo Sangoi et al. (2007), ela absorve de 20 a 25 kg ha⁻¹ de N por tonelada de grãos. Nessa cultura, o fertilizante nitrogenado mais utilizado é a ureia, sendo comercializadas anualmente mais de 700 mil toneladas desse fertilizante no Brasil (Malavolta & Moraes, 2006).

A aplicação de ureia pode resultar em grandes perdas de N por meio do processo de volatilização de amônia quando da sua aplicação na superfície do solo (Lara Cabezas et al., 1997a; Cantarella et al., 2003), embora a magnitude das perdas seja altamente dependente do clima regional e das condições meteorológicas (Fontoura & Bayer, 2010).

A ureia aplicada ao solo hidrolisa-se pela ação da enzima urease, produzindo amônio, gás carbônico e íons hidroxila (Bolan & Hedley, 2003). Essa reação resulta na elevação temporal do pH na zona de aplicação (Overrein & Moe, 1967), o que altera o equilíbrio entre NH₃ e NH₄⁺ no solo (NH₄⁺ + OH⁻ ↔ NH₃ + H₂O); quanto maior o valor do pH alcançado na zona de aplicação, menor é a proporção de N-NH₄⁺ e maior é o potencial de volatilização de NH₃ (Kissel et al., 1988). Várias características do solo – como atividade da urease, capacidade-tampão do solo, biomassa microbiana, teor de matéria orgânica na camada superficial do solo, dinâmica da água e temperatura do solo – também podem alterar a volatilização de amônia (Bremner & Mulvaney, 1978; Roscoe et al., 2000).

A mudança do preparo convencional (PC) para o plantio direto (PD) promove alterações a longo prazo nas características químicas, biológicas e físicas do solo. O uso do sistema PD promove aumento da matéria orgânica do solo (Bayer et al., 2000) e da biomassa microbiana (Vargas et al., 2005),

principalmente na camada superficial, o que pode aumentar a atividade da urease em relação ao solo em PC, potencializando o processo de volatilização da amônia. Por outro lado, o maior estoque de matéria orgânica em superfície aumentaria a adsorção de $N-NH_4^+$ e a capacidade-tampão do solo, limitando o processo de volatilização neste sistema. A maior temperatura na camada superficial do solo em PC do que em PD (Bragagnolo & Mielniczuk, 1990) aumentaria a taxa de hidrólise da ureia e a evaporação da água do solo, potencializando a volatilização do N-ureia. No entanto, a formação de uma camada seca na superfície do solo revolvido pode atuar como barreira à difusão do vapor e à ascensão capilar da água, reduzindo a evaporação a longo prazo (Linden, 1982; Jalota & Prihar, 1990; Mwendera & Feyen, 1994), o que pode, nesse caso, limitar a volatilização. A dinâmica da água na camada superficial do solo é muito influenciada por variáveis meteorológicas, como vento, umidade relativa do ar e temperatura do ar, podendo ser geradas múltiplas condições distintas, que alteram diferentemente os processos de volatilização de amônia (Bouwmeester et al., 1985).

Os resíduos culturais de diferentes plantas de cobertura também podem alterar a temperatura, a umidade, o processo de evaporação e a atividade da urease na camada superficial do solo. A maior taxa de decomposição de leguminosas pode aumentar a atividade da urease em comparação a gramíneas, e a diferente permanência da camada de resíduos também pode alterar o contato dos grânulos da ureia com o solo, o que limita sua difusão no solo (Rodrigues & Kiehl, 1986), influenciando a magnitude do processo de volatilização (Lara Cabezas et al., 1997a).

O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito dos sistemas de preparo de solo e de plantas de cobertura invernais sobre a magnitude das perdas de NH_3 por volatilização, quando da aplicação da ureia em cobertura na cultura do milho, na região Centro-Sul do Paraná.

MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi desenvolvido na área experimental da Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária - FAPA (25°33' S e 51°29' W), no município de Guarapuava, PR, em um Latossolo Bruno alumínico típico (Embrapa, 2006). O clima da região, segundo a classificação de Köppen, é subtropical úmido do tipo Cfb, sem estação seca durante o ano. A temperatura média anual é de 16,8 °C, com variação de 20,5 °C (janeiro) a 12,5 °C (julho) entre as temperaturas médias mensais. A precipitação pluvial média anual é de 1.955 mm.

O estudo foi realizado em dois experimentos. O efeito dos sistemas de preparo de solo (plantio direto-PD e preparo convencional-PC) na volatilização de NH_3 foi avaliado em experimento de longa duração (28 anos) instalado em 1978. O delineamento experimental foi de blocos ao acaso com três repetições. O plantio direto consistiu na semeadura das culturas de inverno e de verão com semeadora/adubadora adaptada com discos de corte por meio dos resíduos culturais das culturas anteriores, promovendo mobilização do solo apenas na linha de semeadura. No preparo convencional, o preparo do solo consistiu na realização de uma lavração com arado de discos até a profundidade de 25 cm e de uma gradagem com grade niveladora anterior à semeadura das culturas no inverno e no verão (Jaster et al., 1993). Durante a condução do experimento, desde sua implantação, foram cultivados no verão milho e soja e, no inverno, trigo, cevada, aveia-branca, ervilhaca e nabo forrageiro.

Na safra 2006/07 foi cultivado nabo forrageiro (*Raphanus sativus*) como planta de cobertura de inverno, o qual foi manejado com rolo-faca em 4/9/2006 em ambos os sistemas de preparo. A lavração e gradagem no PC foram realizadas em 12/9/2006, e o milho foi semeado em 27/9/2006. As parcelas foram subdivididas em três subparcelas de 12 x 8 m, as quais receberam doses de N (0, 80 e 160 kg ha⁻¹) na forma de ureia como adubação de cobertura do milho, em uma única aplicação a lanço, no estádio V6 (9/11/2006).

Para avaliar o efeito das plantas de cobertura no sistema plantio direto, foi instalado um segundo experimento, o qual seguiu o delineamento de blocos casualizados com parcelas subdivididas. Nas parcelas principais, foram cultivadas duas culturas de cobertura de inverno [aveia-branca (*Avena sativa*) e ervilhaca (*Vicia sativa*)] anteriormente ao milho. Nas subparcelas, foram aplicadas três doses de N na cultura do milho (0, 100 e 200 kg ha⁻¹), na forma de ureia. As culturas de cobertura foram manejadas com rolo-faca em 12/9/2006, e o milho foi semeado em 26/9/2006. As doses de N foram divididas em duas aplicações iguais, realizadas a lanço, nos estádios V4 e V8 da cultura do milho.

A caracterização química, o teor de C orgânico e N total e a granulometria do solo do experimento de preparos de solo, bem como a caracterização química e o teor de argila do solo no experimento de plantas de cobertura, constam no quadro 1.

Para avaliação da volatilização de NH_3 , previamente à aplicação da ureia, foram instaladas cinco bases de cloro polivinil (PVC) por subparcela, as quais foram inseridas a 2,5 cm de profundidade no solo e localizadas nas entrelinhas do milho. A área das bases foi isolada com filme plástico quando da aplicação do fertilizante nitrogenado nas parcelas. Imediatamente após a aplicação, os filmes plásticos

Quadro 1. Atributos químicos e granulometria do solo nos sistemas de plantio direto e preparo convencional (experimento de sistemas de preparo) e atributos químicos e teor de argila na média dos sistemas de cultura em plantio direto (experimento de plantas de cobertura)

Profundidade m	pH H ₂ O	Índice SMP	cmol _c kg ⁻¹				g kg ⁻¹				
			Al ³⁺ (1)	Ca ²⁺ (1)	Mg ²⁺ (1)	K ⁺ (1)	C ⁽²⁾	N ⁽³⁾	Argila ⁽⁴⁾	Silte	Areia
Experimento de preparos de solo											
Preparo convencional											
0-0,05	4,8	5,3	1,6	3,9	0,44	0,26	37,3	2,6	539	394	67
0,05-0,10	4,8	5,2	1,3	4,4	0,74	0,27	38,3	2,7	538	399	64
Plantio direto											
0-0,05	5,3	5,6	0,2	11,2	3,33	0,57	55,7	4,91	542	384	74
0,05-0,10	5,0	5,3	1,0	5,3	1,14	0,50	38,0	2,90	578	367	55
Experimento de plantas de cobertura											
0-0,10	5,3	5,5	0,2	9,3	3,00	0,95	-	-	560	-	-

(1) Teores trocáveis (Tedesco et al., 1995). (2) Carbono orgânico total determinado por combustão seca em equipamento SHIMADZU TOC-V CSH. (3) Nitrogênio total determinado por digestão sulfúrica e destilação (Tedesco et al., 1995). (4) Granulometria segundo Costa (2001).

foram removidos e a quantidade exata de fertilizante foi aplicada na área de cada base. O isolamento com filme plástico e posterior aplicação da ureia na área das bases visaram reduzir a variabilidade dos resultados de volatilização de NH₃.

A avaliação da volatilização de N-NH₃ foi realizada com coletor do tipo semiaberto estático (Lara Cabezas & Trivelin, 1990), o qual consistiu de uma câmara de acrílico transparente (Ø = 0,15 m e h = 0,35 m) instalada sobre as bases, sucessivamente nos dias 0, 1, 3, 5 e 11 após a aplicação da ureia. No total, a avaliação de volatilização foi realizada por 20 dias e, portanto, abrangeu os períodos de 0–1 dia, 1–3 dias, 3–5 dias, 5–11 dias e 11–20 dias. Dessa forma, a cada período a câmara foi transferida para uma base subsequente, de modo que a medição de um período refletisse as condições ambientais (chuva, vento, temperatura) do período anterior, sem as interferências causadas pela presença da câmara (Cantarella et al., 1999). No topo de cada câmara foi instalado um suporte plástico tipo “guarda-chuva”, para evitar a incidência de chuva no seu interior (Da Ros et al., 2005).

Em seu interior, a câmara foi composta de dois discos absorvedores de esponja (2,0 cm de espessura, embebidos em solução de ácido sulfúrico 0,05 mol L⁻¹ + glicerina 2 %). O primeiro disco foi disposto na parte inferior da câmara, a uma altura de 14 cm do solo, e teve o objetivo de captar a NH₃ que foi volatilizada na área de solo sob a base na qual a câmara estava instalada. O segundo disco foi disposto 8 cm abaixo do topo do cilindro e teve a função de evitar a entrada de NH₃ do ambiente externo à câmara, evitando que houvesse contaminação na esponja inferior.

O NH₄⁺ foi extraído do disco absorvedor por cinco lavagens sucessivas com solução de KCl 1 mol L⁻¹,

coletada em balão volumétrico, cujo volume foi completado a 500 mL. Em uma alíquota de 20 mL, adicionou-se 0,2 g de MgO e submeteu-se à destilação com arraste a vapor em semimicro Kjeldahl, sendo a NH₃ retida em solução de H₃BO₃ como NH₄⁺, o qual foi quantificado por titulação com solução de ácido sulfúrico padronizado (Tedesco et al., 1995). A quantidade de N-NH₃ volatilizada foi calculada com base no volume total da solução utilizada para lavagem da esponja (500 mL), e os resultados, expressos em taxas diárias de volatilização de N-NH₃ (kg ha⁻¹ dia⁻¹). Descontada a volatilização de N do tratamento controle (sem adubação N), calculou-se a volatilização acumulada de N-NH₃ (kg ha⁻¹) em cada tratamento, a qual foi expressa, também, como percentual da dose de N aplicada.

Como avaliação complementar, a atividade da urease do solo foi avaliada no experimento de sistemas de preparo nas subparcelas sem aplicação de N-ureia em 22/9/2006, 10/10/2006 e 27/10/2006 e nas subparcelas com aplicação de 160 kg ha⁻¹ de N em 30/11/2006. Esta avaliação foi realizada em amostras de solo coletadas em ambos os sistemas de preparo nas profundidades de 0–0,05 e 0,05–0,10 m. No experimento de plantas de cobertura, a atividade da urease do solo foi avaliada em amostras de solo coletadas em duas datas durante o ciclo do milho (20/10/2006 e 13/11/2006) e na profundidade de 0–0,05 m. Após a coleta, as amostras de solo foram armazenadas em umidade de campo sem peneiramento a 4 °C; antes da análise, elas foram peneiradas a 2 mm e armazenadas em sacolas fechadas, até adquirir temperatura ambiente. Foi retirada uma subamostra de solo, para determinação da umidade. A atividade da urease do solo foi determinada conforme método descrito por Dick et al. (1996) e Schimtz (2003). O amônio produzido foi

determinado por destilação de arraste de vapor em semimicro Kjeldhal, conforme método descrito por Tedesco et al. (1995).

Os rendimentos de grãos do milho não foram apresentados devido à grande variação na população de plantas da cultura em ambos os experimentos, o que foi ocasionado por problemas na semeadora-adubadora de plantio direto quando da implantação da cultura.

Os resultados foram submetidos à análise de variância, sendo as médias dos tratamentos comparadas pelo teste de Tukey ($p > 0,05$) e, ou, ajustadas à regressão linear quando o efeito das doses de N foi significativo. As análises estatísticas foram feitas utilizando o software SISVAR versão 4.6 (Ferreira, 2000).

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Efeito dos preparos do solo na volatilização de N-NH₃ da ureia

O sistema PD apresentou maior perda acumulada de N-NH₃ do que o PC (Quadro 2). Neste, as perdas de N-NH₃ por volatilização variaram de 1 a 3 % do N aplicado, não apresentando variação significativa em função da dose de N. Por sua vez, no sistema PD, as perdas de N-NH₃ por volatilização variaram entre 14 e 18 % do N aplicado, o que foi equivalente a 0,18 kg ha⁻¹ de N-NH₃ volatilizado por kg de N-ureia aplicado ($\hat{y} = 0,47 + 0,18x$, $R^2 = 0,99$, $p > 0,01$). Na mesma região deste estudo, Fontoura & Bayer (2010) determinaram perdas similares de NH₃ por volatilização em PD, as quais variaram de 3 a 25 % do N aplicado e foram inversamente relacionadas com o volume de chuvas logo após a aplicação. Por sua vez, Lara Cabezas et al. (1997a) observaram perdas de 78 % do N aplicado no sistema PD e de 31 % em PC, perdas essas muito superiores às observadas no presente estudo (Quadro 2), o que possivelmente esteja relacionado às maiores temperaturas e à baixa frequência de chuva na região.

Rochette et al. (2009), avaliando a volatilização de N-NH₃ pela aplicação de N-ureia (140 kg ha⁻¹) em laboratório, em amostras de solo indeformadas coletadas em experimentos de longa duração, também encontraram volatilização de 21 % do N aplicado nas amostras de PD e de 3,7 % nas amostras de PC. Esses resultados possivelmente se devam às diferentes características do solo, pois, como o estudo foi desenvolvido sob condições controladas, diferenças em temperatura e umidade do solo foram minimizadas e deixaram de ser fatores que influenciavam a volatilização de NH₃. Entre as variáveis de solo determinantes da maior volatilização de NH₃ em solos em PD, pode-se destacar a maior atividade da urease (Barreto & Westerman, 1989), a qual promove maior taxa de hidrólise da ureia, com conseqüente elevação do pH, o que potencializa a volatilização de NH₃ (Cantarella, 2007).

No presente estudo, desenvolvido em experimento de 28 anos, verificou-se maior atividade da urease na camada superficial (0–0,1 m) do solo em PD do que em PC (Quadro 3), a qual pode constituir-se num dos fatores determinantes da maior volatilização de NH₃ (Barreto & Westerman, 1989; Rochette et al., 2009). A atividade da urease foi significativamente maior no PD nas quatro datas de avaliação (Quadro 3). Roscoe et al. (2000) também observaram maior atividade da urease em PD em relação a sistemas de preparo com revolvimento do solo. A maior atividade da urease em PD deve-se às maiores concentrações de C orgânico e N total nesse sistema, sobretudo na camada de 0–0,05 m (Quadro 1), e à presença de resíduos vegetais na superfície do solo (Rochette et al., 2009). Entretanto, segundo estes autores, a maior atividade da urease não explica totalmente a maior volatilização de NH₃ no solo em PD em comparação ao PC, sendo a cobertura do solo por resíduos vegetais um fator que contribui expressivamente para a volatilização de NH₃.

A presença de palha na superfície do solo em PD pode limitar o contato da ureia com o solo, restringindo sua dissolução e potencializando a volatilização (Rodrigues & Kiehl, 1986). Segundo

Quadro 2. Volatilização acumulada de N-NH₃ pela aplicação de doses de ureia na cultura do milho nos sistemas de preparo convencional e plantio direto

Dose N-ureia	Volatilização acumulada de N-NH ₃				
	Preparo convencional		Plantio direto		Média ⁽²⁾
kg ha ⁻¹		% ⁽¹⁾	kg ha ⁻¹	%	kg ha ⁻¹
0	0,7 ns ⁽³⁾	-	1,1 c	-	0,9
80	1,3	1	13,5 b	14	7,4
160	5,6	3	29,8 a	18	17,7
Média	2,5 B ⁽³⁾		14,8 A		

⁽¹⁾ Percentual de N volatilizado da dose aplicada. ⁽²⁾ Houve interação entre sistemas de preparo e doses de N. ⁽³⁾ Letras minúsculas comparam médias na coluna, e letras maiúsculas, na linha (teste de Tukey $p > 0,05$).

Quadro 3. Atividade da urease no solo em preparo convencional e em plantio direto em diferentes datas e profundidades

Profundidade	Atividade da urease		Média
	Preparo convencional	Plantio direto	
m	mg N-NH ₃ ⁺ kg ⁻¹ Solo 2 h ⁻¹		
	10 Dap ⁽¹⁾ (22/09/06)		
0-0,05	32 ns	120 a ⁽⁴⁾	76 ⁽²⁾
0,05-0,10	31	83 b	57
0-0,10	31 B ⁽⁴⁾	102 A	
	28 DAP (10/10/06)		
0-0,05	27 ns	109 a	68 ⁽²⁾
0,05-0,10	24	47 b	36
0-0,10	25 B	78 A	
	45 DAP (27/10/06)		
0-0,05	19	49	34 ^{(3)ns}
0,05-0,10	19	46	33
0-0,10	19 B	47 A	
	79 DAP (30/11/06)		
0-0,05	14 ns	67 a	41 ⁽²⁾
0,05-0,10	17	31 b	24
0-0,10	16 B	49 A	

⁽¹⁾ Dias após o preparo do solo. ⁽²⁾ Houve interação entre tratamentos e profundidades. ⁽³⁾ Não houve interação entre tratamentos e profundidades. ⁽⁴⁾ Letras minúsculas comparam médias na coluna, e letras maiúsculas, na linha (teste de Tukey, $p > 0,05$).

Da Ros et al. (2005), a presença de resíduos culturais pode diminuir a volatilização de NH₃ somente quando os resíduos mantiverem maior umidade no solo em relação ao solo descoberto. Em estudo desenvolvido em laboratório por Sangoi et al. (2003) com dois solos, a presença de palha de aveia diminuiu a volatilização de NH₃ no Nitossolo Vermelho quando a ureia foi aplicada em superfície sem incorporação. Contudo, no Neossolo Quartzarênico, a manutenção dos resíduos na superfície aumentou a quantidade de NH₃ volatilizada. Esses autores acreditam que no Nitossolo a presença de resíduos foi benéfica na manutenção de maior umidade no solo, favorecendo a nitrificação e diminuindo a difusão ascendente de NH₃ que ocorre juntamente com a evaporação de água. Entretanto, neste estudo, a maior umidade do solo no dia da aplicação de N no PD (0,55 m³ m⁻³), em relação ao PC (0,34 m³ m⁻³), não determinou menores perdas de N por volatilização. A partir dos dados de umidade do solo, foi calculada uma evaporação teórica de 7,8 mm da camada de 0-0,05 m para o PD e de 5,5 mm para o PC, até o quinto dia depois da adubação. Essa maior evaporação ocorrida no PD pode ter contribuído no transporte de NH₃ até a superfície do solo, para sua posterior perda para a atmosfera, pois, segundo Stanley & Smith (1956), para esse processo ocorrer é necessário umidade no solo.

No que se refere às taxas de volatilização de N-NH₃, houve diferença significativa entre os preparos, na média das doses de N, aos 1, 3 e 20 dias após a aplicação de ureia (respectivamente, 1^a, 2^a e 5^a coletas), com as maiores taxas observadas no sistema PD. Na terceira e quarta coletas também foi observada tendência de maiores taxas no PD (Figura 1). Entre as doses aplicadas de N, verificou-se diferença na volatilização de N-NH₃ apenas no sistema PD (Figura 1), com as maiores taxas ocorrendo até o quinto dia após a aplicação. Assim, considerando as duas doses de N aplicadas, no PC aos cinco dias já havia ocorrido 37 % da perda total acumulada durante o período de avaliação (20 dias), a qual atingiu 74 % aos 10 dias após a aplicação. Até o 5^o dia as perdas de N-NH₃ por volatilização totalizaram 63 % no sistema PD, a qual atingiu 91 % aos 10 dias após a aplicação. Vários pesquisadores têm observado que as perdas de N-NH₃ ocorrem a partir das primeiras horas da aplicação da ureia e alcançam taxas máximas nos primeiros dias após a aplicação (Ernst & Massey, 1960; Sangoi et al., 2003; Da Ros et al., 2005; Fontoura & Bayer, 2010).

Considerando as condições meteorológicas ocorridas durante o período de estudo (Figura 1), observa-se que o primeiro evento de precipitação pluvial (18,2 mm) ocorreu apenas 10 dias após a aplicação de ureia, o que potencializou as perdas de N-NH₃ por volatilização, pela não ocorrência da incorporação ao solo do fertilizante, possivelmente retida sobre a camada de resíduos vegetais, diminuindo, portanto, o seu contato com o solo. Essa hipótese é corroborada pelos resultados de Bouwmeester et al. (1985), os quais não verificaram perdas de NH₃ por volatilização quando a ureia foi aplicada em solo seco e imediatamente após foi realizada uma irrigação de 24 mm num período de 15 min. Segundo Lara Cabezas et al. (1997b), o umedecimento do solo imediatamente após a aplicação de ureia é mais importante para diminuir as perdas por volatilização do que a umidade do solo no momento da aplicação. Nesse sentido, Fontoura & Bayer (2010), estudando a volatilização de NH₃ em quatro safras agrícolas, observaram decréscimo exponencial nas perdas cumulativas de N (% do total aplicado) com o aumento do volume de chuvas no período de até cinco dias depois da aplicação de N.

Efeito das plantas de cobertura invernais na volatilização de N-NH₃ da ureia em plantio direto

Em relação à utilização de diferentes plantas de cobertura de inverno (aveia-branca e ervilhaca comum) em sistema PD, não se verificou efeito na volatilização acumulada de N-NH₃ (Quadro 4), considerando a dose total aplicada e em cada aplicação, apesar de ter sido constatada maior atividade de urease no tratamento com aveia-

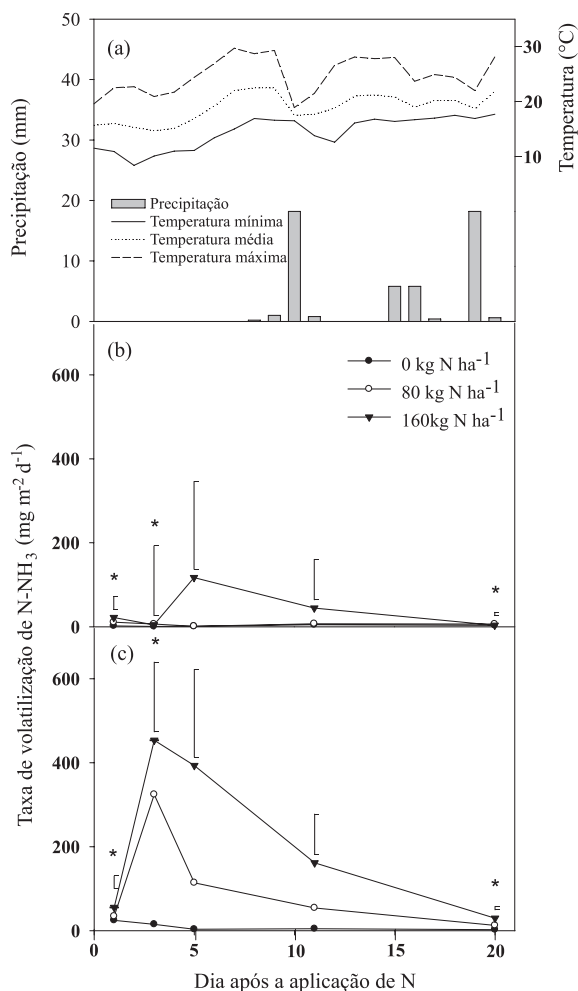


Figura 1. Temperatura do ar (máxima, média e mínima) e precipitação pluvial no período posterior à aplicação de N-ureia (a) e taxas de volatilização de N-NH₃ oriundo do N-ureia aplicado na cultura do milho sob preparo convencional (b) e plantio direto (c). As barras verticais indicam diferença mínima significativa pelo teste de Tukey, $p > 0,05$. * indica diferença significativa, na média das doses de N, entre preparo convencional e plantio direto (teste de Tukey, $p > 0,05$).

branca (Quadro 5). Esse resultado indica que outros fatores foram mais determinantes na volatilização de NH₃ que a atividade da enzima. A volatilização acumulada de N-NH₃ aumentou com a dose de N na ordem de 0,088 kg ha⁻¹ de N-NH₃ para cada kg ha⁻¹ de N aplicado ($\hat{y} = 3,464 + 0,088x$, $R^2=0,99$, $p > 0,01$).

A maior parte da volatilização acumulada ocorreu após a segunda aplicação de N, tendo correspondido a 75 % do total volatilizado. Esse comportamento corresponde às maiores taxas de volatilização ocorridas nesse período (Figura 2). Não foi encontrada diferença significativa entre as plantas de cobertura nas taxas de volatilização.

Os picos de volatilização ocorreram nos primeiros cinco dias após a aplicação de N, e as taxas de volatilização decresceram a valores próximos ao do tratamento sem aplicação de N após 10 dias da aplicação da ureia. Esses resultados, assim como os do experimento de preparo, confirmam que qualquer prática que vise ao controle da perda de N-NH₃ pela aplicação de ureia deve ser realizada logo após a aplicação de N, de maneira que diminua os picos de volatilização (Rodrigues & Kiehl, 1986).

As maiores taxas de volatilização ocorridas após a segunda aplicação de N devem-se à diferença no volume de chuvas entre as épocas; a temperatura do ar praticamente não se distinguiu entre os dois períodos (Figura 2). No mesmo dia após a primeira aplicação de N ocorreu uma precipitação pluvial de 19,6 mm; até o sexto dia após a aplicação a precipitação pluvial acumulada foi de 73,4 mm, o que pode ter contribuído para a dissolução da ureia, limitando a elevação do pH e a formação da amônia, no transporte em profundidade dos produtos da hidrólise da ureia e no favorecimento da adsorção de amônio no solo. Já a precipitação pluvial acumulada até três dias depois da segunda aplicação foi de 5,8 mm e, após cinco dias, de 12 mm – quantidades que não foram suficientes para diminuir a perda de N por volatilização aos níveis ocorridos após a primeira aplicação. Esses resultados são corroborados por Fontoura & Bayer (2010), os quais observaram que um volume de 15 mm de precipitação pluvial ocorrido nos primeiros cinco dias após a aplicação de N foi suficiente para diminuir as perdas por volatilização a níveis inferiores a 5 % do total de N aplicado.

O efeito das condições meteorológicas também pode ser observado no aumento da volatilização por meio do incremento da dose de N. Observou-se que a volatilização acumulada aumentou com a dose de N na ordem de 0,029 kg ha⁻¹ de N-NH₃ para cada kg ha⁻¹ de N aplicado após a primeira aplicação e na ordem de 0,146 kg ha⁻¹ de N-NH₃ após a segunda aplicação ($\hat{y} = 2,009 + 0,029x$, $R^2=0,84$, $p > 0,01$; $\hat{y} = 1,454 + 0,146x$, $R^2 = 0,99$, $p > 0,01$). Ao contrário do que foi observado no experimento de preparos, o percentual volatilizado da dose aplicada foi semelhante entre as duas doses de N (8 e 9 % para as doses de 100 e 200 kg ha⁻¹ N, respectivamente), o que contraria os resultados obtidos por Overrein & Moe (1967) e Rodrigues & Kiehl (1986), segundo os quais o potencial de perda de NH₃ por volatilização aumenta com o aumento da dose aplicada.

O parcelamento da adubação nitrogenada de cobertura do milho ocorrido no experimento de culturas contribuiu para diminuir as perdas por volatilização devido a uma condição meteorológica favorável para a incorporação do N-ureia ao solo na primeira aplicação. Entretanto, os percentuais volatilizados da segunda época de aplicação, 14 %

Quadro 4. Volatilização acumulada de N-NH₃ pela aplicação de doses de ureia na cultura do milho, em duas aplicações, cultivado em sucessão à aveia-branca e ervilhaca comum em plantio direto

Dose total N-ureia	Volatilização de N-NH ₃							
	Primeira aplicação ^{(1) (3)}		Segunda aplicação ⁽⁴⁾		Total ⁽⁴⁾			% ⁽²⁾
	Aveia	Ervilhaca	Aveia	Ervilhaca	Aveia	Ervilhaca	Média	
	kg ha ⁻¹							
0	2,0 c ⁽⁵⁾	2,8 b	1,5 b	1,5 b	3,5	4,2	3,9 b	-
100	3,2 b	2,3 b	10,4 ab	7,0 ab	13,5	9,3	11,4 b	7,5
200	4,8 a	5,9 a	16,5 a	15,7 a	21,2	21,6	21,4 a	8,7
Média	3,3 A ⁽⁵⁾	3,6 A	9,4 A	8,1 A	12,8 A	11,7 A		

⁽¹⁾ Em cada aplicação, o milho recebeu 50 % da dose total de N (0, 50 e 100 kg ha⁻¹). ⁽²⁾ Percentual de N volatilizado da dose aplicada. ⁽³⁾ Houve interação entre plantas de cobertura e doses de N. ⁽⁴⁾ Não houve interação entre plantas de cobertura e doses de N. ⁽⁵⁾ Letras minúsculas comparam médias na coluna, e letras maiúsculas, na linha dentro de cada aplicação (teste de Tukey, p > 0,05).

Quadro 5. Atividade da urease no solo na camada de 0–0,05 m 40 e 62 dias após o manejo das plantas de cobertura

Tratamento	Atividade da urease		
	40 Dam ⁽¹⁾	62 Dam	Média ⁽²⁾
	mg N-NH ₃ ⁺ kg ⁻¹ Solo 2 h ⁻¹		
Aveia-branca	125	117	121 a ⁽³⁾
Ervilhaca comum	107	89	98 b
Média	116 A ⁽³⁾	103 A	

⁽¹⁾ Dias após o manejo (Dam) das plantas de cobertura. ⁽²⁾ Não houve interação entre datas e plantas de cobertura. ⁽³⁾ Letras minúsculas comparam médias na coluna, e letras maiúsculas, na linha (teste de Tukey, p > 0,05).

para a dose de 50 kg ha⁻¹ e 15 % para a dose de 100 kg ha⁻¹, foram semelhantes aos obtidos em PD no experimento de preparos. Esses resultados indicam que o parcelamento da adubação nitrogenada de cobertura com ureia não garante diminuição na perda de N por volatilização, pois esta será dependente das condições meteorológicas na época de aplicação do N em cobertura no sistema PD.

CONCLUSÕES

1. As perdas de N por volatilização resultante da aplicação superficial de ureia são superiores no sistema plantio direto em comparação ao preparo convencional, o que pode ser apenas parcialmente relacionado à maior atividade da urease na camada superficial do solo.

2. As maiores taxas de volatilização no sistema plantio direto ocorrem nos primeiros cinco dias após

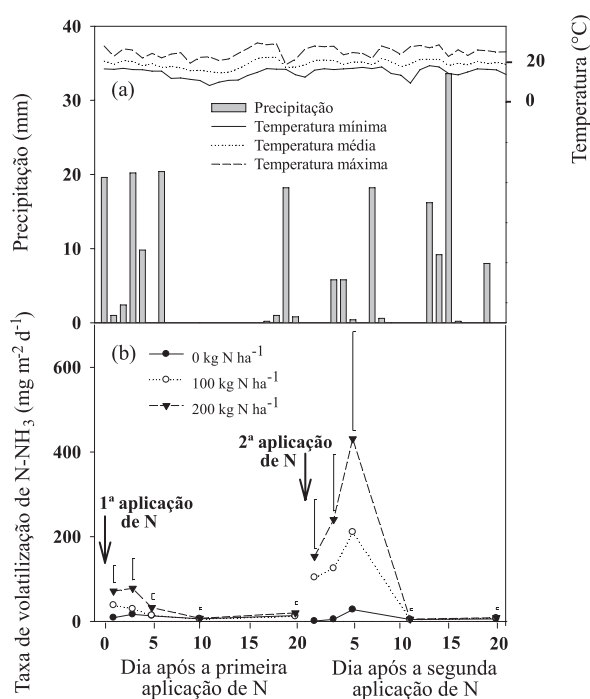


Figura 2. Temperatura do ar (máxima, média e mínima) e precipitação pluvial no período posterior à aplicação de N-ureia (a) e taxas de volatilização de N-NH₃ oriundo do N-ureia aplicado na cultura do milho, após a primeira e a segunda aplicação de N (b). Média dos tratamentos com aveia-branca e ervilhaca. As barras verticais indicam diferença mínima significativa (teste de Tukey, p > 0,05).

a aplicação da ureia e são altamente influenciadas pelo volume de chuvas nesse período.

3. A utilização de diferentes plantas de cobertura de solo antecedendo o milho não altera as perdas de N por volatilização no sistema plantio direto.

LITERATURA CITADA

- BARRETO, H.J. & WESTERMAN, R.L. Soil urease activity in winter wheat residue management systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 53:1455-1458, 1989.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; AMADO, T.J.C.; MARTIN-NETO, L. & FERNANDES, S.V. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. *Soil Tillage Res.*, 54:101-109, 2000.
- BOLAN, N.S. & HEDLEY, M.J. Role of carbon, nitrogen, and sulfur cycles in soil acidification. In: RENDEL, Z. *Handbook of soil acidity*. New York, Marcel Dekker, 2003. p.29-56.
- BRAGAGNOLO, N. & MIELNICZUK, J. Cobertura do solo por resíduos de oito seqüências de culturas e seu relacionamento com a temperatura e umidade do solo, germinação e crescimento inicial do milho. *R. Bras. Ci. Solo*, 14:91-98, 1990.
- BREMMER, J.M. & MULVANEY, R.L. Urease activity in soils. In: BURNS, R.G., ed. *Soil enzymes*. Londres, Academic press, 1978. p.149-196.
- BOUWMEESTER, R.J.B.; VLEK, P.L.G. & STUMPE, J.M. Effect of environmental factors on ammonia volatilization from a urea-fertilized soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 49:376-381, 1985.
- CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B. & NEVES, J.C.L., eds. *Fertilidade do solo*. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.375-470.
- CANTARELLA, H.; MATTOS JUNIOR, D.; QUAGGIO, J.A. & RIGOLIN, A.T. Fruit yield of Valencia sweet orange fertilized with different N sources and the loss of applied N. *Nutr. Cycl. Agroecosyst.*, 67:215-223, 2003.
- CANTARELLA, H.; ROSSETTO, R.; BARBOSA, W.; PENNA, M.J. & RESENDE, L.C.L. Perdas de nitrogênio por volatilização da amônia e resposta da cana-de-açúcar à adubação nitrogenada, em sistemas de colheita de cana sem queima prévia. In: CONGRESSO NACIONAL DA STAB, 7., Londrina, 1999. Anais. Londrina, 1999. p.82-87.
- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO – CONAB. 12º Levantamento de grãos Setembro 2010. Disponível em: < <http://www.conab.gov.br>>. Acesso em 18 jan. de 2011.
- DA ROS, C.O.; AITA, C. & GIACOMINI, S.J. Volatilização de amônia com aplicação de ureia na superfície do solo, no sistema plantio direto. *Ci. Rural*, 35:799-805, 2005.
- DICK, R.P.; BREACKWELL, D.P. & TURCO, R.F. Soil enzyme activities and biodiversity measurements as integrative microbiological indicators. In: DORAN, J.W. & JONES, A.J., eds. *Methods for assessing soil quality*. Madison, SSSA, 1996. p.247-271. (SSSA Special Publication, 49)
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA - EMBRAPA. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, 2006. 306p.
- ERNST, J.W. & MASSEY, H.F. The effects of several factors on volatilization of ammonia formed from urea in the soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 24:87-90, 1960.
- FERREIRA, D.F. Análises estatísticas por meio do SISVAR para Windows versão 4.0. In: REUNIÃO ANUAL DA REGIÃO BRASILEIRA DA SOCIEDADE INTERNACIONAL DE BIOMETRIA, 45., São Carlos, 2000. Programa e resumos... São Carlos, Região Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria, 2000. p.255-258.
- FONTOURA, S.M.V. & BAYER, C. Ammonia volatilization in no-till system in the South-Central region of the State of Paraná, Brazil. *R. Bras. Ci. Solo*, 34:1677-1684, 2010.
- JALOTA, S.K. & PRIHAR, S.S. Bare-soil evaporation in relation to tillage. In: STEWART, B.A., ed. *Advances in soil science*. New York, Springer-Verlag, 1990. v. 12. p.187-216.
- JASTER, F.; ELTZ, F.L.F.; FERNANDEZ, F.F.; MERTEN, G.H.; GAUDÊNCIO, C.A. & OLIVEIRA, M.C.N. Rendimento de grãos em diferentes sistemas de preparo e manejo de solos. Londrina, Embrapa-CNPSo, 1993. 37p. (Documentos, 61)
- KISSEL, D.E.; CABRERA, M.L. & FERGUSON, R.B. Reactions of ammonia and urea hydrolysis products with soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 52:1793-1796, 1988.
- LARA CABEZAS, W.A. & TRIVELIN, P.C.O. Eficiência de um coletor semi-aberto estático na quantificação de N-NH₃ volatilizado da ureia aplicada ao solo. *R. Bras. Ci. Solo*, 14:345-352, 1990.
- LARA CABEZAS, W.A.R.; KORNDORFER, G.H. & MOTTA, S.A. Volatilização de N-NH₃ na cultura de milho: I. Efeito da irrigação e substituição parcial da ureia por sulfato de amônio. *R. Bras. Ci. Solo*, 21:481-487, 1997b.
- LARA CABEZAS, W.A.R.; KORNDORFER, G.H. & MOTTA, S.A. Volatilização de N-NH₃ na cultura de milho: II. Avaliação de fontes sólidas e fluídas em sistema de plantio direto e convencional. *R. Bras. Ci. Solo*, 21:489-496, 1997a.
- LINDEN, D.R. Predicting tillage effects on evaporation from the soil. In: UNGER, P.W.; van DOREN, D.M.; MWENDERA, E.J. & FEYEN, J., eds. *Estimation of depression storage and manning's resistance coefficient from random roughness measurements*. *Geoderma*, 52:235-250, 1982.
- MALAVOLTA, E. & MORAES, M.F. O nitrogênio na agricultura brasileira. CETEM, MCT, 2006. 72p. (Série Estudos e Documentos)
- MWENDERA, E.J. & FEYEN, J. Effects of tillage and evaporative demand on the drying characteristics of a silt loam: An experimental study. *Soil Tillage Res.*, 32:61-69, 1994.
- OVERREIN, L.N. & MOE, P.G. Factors affecting urea hydrolysis and ammonia volatilization in soil. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 31:57-61, 1967.
- ROCHETTE, P.; ANGERS, D.A.; CHANTIGNY, M.H.; MACDONALD, D.; BISSONNETTE, N. & BERTRAND, N. Ammonia volatilization following surface application of urea to tilled and no-till soils: A laboratory comparison. *Soil Tillage Res.*, 103:310-315, 2009.
- RODRIGUES, M.B. & KIEHL, J.C. Volatilização de amônia após emprego de ureia em diferentes doses e modos de aplicação. *R. Bras. Ci. Solo*, 10:37-43, 1986.

- ROSCOE, R.; VASCONCELLOS, C.A.; FURTINI NETO, A.E.; GUEDES, G.A.A. & FERNANDES, L.A. Urease activity and its relation to soil organic matter, microbial biomass nitrogen and urea-nitrogen assimilation by maizes in a Brazilian Oxisol under no-till and tillage systems. *Biol. Fert. Soils*, 32:52-59, 2000.
- 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. *Ci. Rural*, 33:687-692, 2003.
- SANGOI, L.; SILVA, P.R.F.; ARGENTA, G. & RAMBO, L. Desenvolvimento e exigências climáticas da planta de milho para altos rendimentos. Lages, Graphel, 2007. 95p.
- SCHIMTZ, J.A.k. Indicadores biológicos de qualidade do solo. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2003. 234p. (Tese de Doutorado)
- STANLEY, F.A. & SMITH, G.E. Effect of soil moisture and depth of application on retention of anhydrous ammonia. *Soil Sci. Soc. Am. Proc.*, 20:557-561, 1956.
- TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; BOHNEN, H. & VOLKWEISS, S.J. *Análises de solo, plantas e outros materiais*. 2.ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p.
- VARGAS, L.K.; SELBACH, P.A. & SÁ, E.L.S. Imobilização de nitrogênio em solo cultivado com milho em sucessão à aveia preta nos sistemas plantio direto e convencional. *Ci. Rural*, 35:76-83, 2005.