

MATEUS DE PAULA GOMES

**ADUBAÇÃO NITROGENADA EM PRÉ-SEMEADURA DO MILHO COM
FERTILIZANTE FLUIDO COM INIBIDORES DE UREASE E DE NITRIFICAÇÃO**

Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

Orientador: Reinaldo Bertola Cantarutti

Coorientadores: Edson Marcio Mattiello
Leonardus Vergütz

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2019**

**Ficha catalográfica preparada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Câmpus Viçosa**

T

G633a
2019
Gomes, Mateus de Paula, 1988-
Adubação nitrogenada em pré-semeadura do milho com
fertilizante fluido com inibidores de urease e de nitrificação /
Mateus de Paula Gomes. – Viçosa, MG, 2019.
62 f. : il. (algumas color.) ; 29 cm.

Inclui anexo.

Orientador: Reinaldo Bertola Cantarutti.

Tese (doutorado) - Universidade Federal de Viçosa.

Referências bibliográficas: f. 52-57.

1. Milho - Época de adubação. 2. Fertilizantes nitrogenados. 3. Ureia como fertilizante. 4. N-(N-butil) tiofosfórico triamida. 5. Dicianodiamida. I. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Solos. Programa de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas. II. Título.

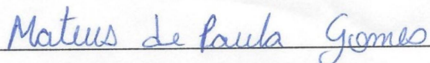
CDD 22. ed. 633.15894

MATEUS DE PAULA GOMES

**ADUBAÇÃO NITROGENADA EM PRÉ-SEMEADURA DO MILHO COM
FERTILIZANTE FLUIDO COM INIBIDORES DE UREASE E DE NITRIFICAÇÃO**

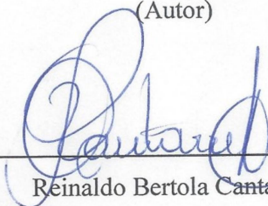
Tese apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Solos e Nutrição de Plantas, para obtenção do título de *Doctor Scientiae*.

APROVADA: 30 de agosto de 2019.



Mateus de Paula Gomes

(Autor)



Reinaldo Bertola Cantarutti

(Orientador)

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus pela vida.

Aos meus pais, João Lúcio Gomes e Rita de Cássia Paulo Gomes, pelos sacrifícios que tornaram essa realização possível.

À minha irmã, Débora de Paula Gomes, por todo apoio e amizade.

A todos os meus familiares, que sempre me apoiaram.

À minha namorada, Ariana, pelo companheirismo.

Aos meus amigos, que sempre estiveram ao meu lado.

Ao meu orientador, Reinaldo Bertola Cantarutti, por todo suporte, ensinamentos e amizade.

Aos meus coorientadores, professores Edson Marcio Mattiello e Leonardus Vergütz, pelo apoio.

Aos professores que participaram da banca, Igor Rodrigues de Assis, Juliano Bahiense Stafanato, Leonardus Vergütz e Paulo Cezar Rezende Fontes, pelas contribuições.

Ao Departamento de Solos e à Universidade Federal de Viçosa.

Ao CNPq e à Capes, pelo suporte.

A todos que contribuíram para a realização desta obra, meu sincero MUITO OBRIGADO.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	7
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	9
CAPÍTULO I - DINÂMICA DO NITROGÊNIO EM SOLOS ADUBADOS COM UAN COM INIBIDORES DE UREASE E DE NITRIFICAÇÃO	10
1 INTRODUÇÃO	12
2 MATERIAL E MÉTODOS	13
2.1 Dinâmica do N no solo.....	14
2.2 Volatilização de NH ₃	15
3 RESULTADOS.....	16
3.1 Dinâmica do N no solo.....	16
3.2 Volatilização de NH ₃	20
4 DISCUSSÃO	22
5 CONCLUSÕES	25
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	26
CAPÍTULO II - UAN COM INIBIDORES DE UREASE E DE NITRIFICAÇÃO: UMA ALTERNATIVA PARA A ADUBAÇÃO NITROGENADA EM PRÉ- SEMEADURA NA CULTURA DO MILHO	29
1 INTRODUÇÃO	31
2 MATERIAL E MÉTODOS	32
2.1 Emissões de gases e lixiviação.....	34
3 RESULTADOS.....	38
3.1 Emissões de gases e lixiviação.....	41
4 DISCUSSÃO	48
5 CONCLUSÕES	51
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	52
CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	58
CONCLUSÕES GERAIS	59
ANEXOS	60

RESUMO

GOMES, Mateus de Paula, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2019. **Adubação nitrogenada em pré-semeadura do milho com fertilizante fluido com inibidores de urease e de nitrificação.** Orientador: Reinaldo Bertola Cantarutti. Coorientadores: Edson Marcio Mattiello e Leonardus Vergütz.

A adubação nitrogenada em pré-semeadura com o fertilizante fluido UAN (ureia – nitrato de amônio) possui vantagens operacionais em relação à adubação em cobertura, contudo, as perdas de N podem comprometer a sua eficiência. A combinação do UAN com inibidores de urease e de nitrificação pode contribuir para redução destas perdas. Assim, dois experimentos foram desenvolvidos para avaliar o potencial do UAN com inibidores de urease e de nitrificação na adubação nitrogenada em pré-semeadura. O primeiro experimento avaliou a dinâmica do N e a volatilização de NH_3 em amostras de dois solos previamente caracterizados como de baixa e alta atividade de urease, adubados com elevadas doses de UAN sem e com N-(n-butil) tiofosfórico triamida (NBPT) e, ou dicianodiamida (DCD). O segundo experimento avaliou o N acumulado nas plantas até o estágio de V10, a produtividade de grãos, as emissões de NH_3 , N_2O e CO_2 e a lixiviação de NO_3^- e NH_4^+ do UAN com NBPT e, ou DCD na adubação nitrogenada em pré-semeadura do milho. No primeiro experimento, o UAN perdeu até 62 % menos N- NH_3 que a ureia e a adição de NBPT ao UAN retardou a ocorrência do pico de volatilização e reduziu em até 52 % a volatilização acumulada. A nitrificação foi baixa em todos os tratamentos, mas houve acúmulo de nitrito em ambos os solos. No segundo experimento, a adubação em pré-semeadura com UAN com NBPT e DCD resultou em produtividade de milho similar à adubação em cobertura com UAN ou ureia sem inibidores. A adição tanto do NBPT como do DCD reduziu as emissões de N_2O do UAN. O NBPT também favoreceu menor emissão de CO_2 . De modo geral, a lixiviação de NO_3^- não diferiu entre os tratamentos, mas o UAN sem os inibidores apresentou maior lixiviação acumulada de NH_4^+ , que correspondeu a apenas 1,4 % do N adicionado. Conclui-se que: o UAN perde menos N- NH_3 que a ureia e o NBPT reduz as perdas de NH_3 do UAN; a adubação com UAN é viável para aplicação em pré-semeadura do milho; o DCD reduz as emissões de N_2O e o NBPT reduz as emissões de N_2O e CO_2 na adubação com UAN em pré-semeadura.

Palavras-chave: Época de adubação. N-(N-butil) tiofosfórico triamida. Dicianodiamida.

ABSTRACT

GOMES, Mateus de Paula, D.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August, 2019. **Pre-sowing nitrogen fertilization of maize with liquid fertilizer with urease and nitrification inhibitors.** Adviser: Reinaldo Bertola Cantarutti. Co-Advisers: Edson Marcio Mattiello and Leonardus Vergütz.

Pre-sowing nitrogen fertilization with UAN (urea - ammonium nitrate) fertilizer has operational advantages over topdressing. However, N losses may compromise its efficiency. The combination of UAN with urease and nitrification inhibitors can contribute to reducing these losses. Thus, two experiments were developed to evaluate the potential of UAN with urease and nitrification inhibitors in pre-sowing nitrogen fertilization. The first experiment evaluated N dynamics and NH_3 volatilization in two soil samples previously characterized as low and high urease activity, fertilized with high doses of UAN without and with N-(N-butyl) thiophosphoric triamide (NBPT) and, or dicyandiamide (DCD). The second experiment evaluated the accumulated N up to the V10 stage, grain yield, NH_3 , N_2O , and CO_2 emissions and NO_3^- and NH_4^+ leaching of UAN with NBPT and, or DCD in pre-sowing nitrogen fertilization in maize crop. In the first experiment, the difference in urease activity between soils was determinant in the intensity of urea hydrolysis and ammonia volatilization among fertilizers. UAN lost up to 62% less N- NH_3 than urea and the addition of NBPT to UAN delayed the occurrence of peak volatilization and reduced accumulated volatilization by up to 52%. Nitrification was low in all treatments, but there was an accumulation of nitrite in both soils. In the second experiment, pre-sowing fertilization with UAN with NBPT and DCD resulted in corn yield similar to topdressing fertilizer with UAN or urea without inhibitors. The addition of both NBPT and DCD reduced UAN N_2O emissions. NBPT also favored lower CO_2 emissions. Overall, NO_3^- leaching did not differ between treatments, but UAN without inhibitors showed higher cumulative NH_4^+ leaching, which corresponded to only 1.4% of added N. It was concluded that: UAN loses less N- NH_3 than urea and NBPT reduces NH_3 losses of UAN; UAN fertilization is feasible for application in maize pre-sowing; DCD reduces N_2O emissions and NBPT reduces N_2O and CO_2 emissions in pre-sowing UAN fertilization.

Keywords: Fertilization time. N-(N-butyl) Thiophosphoric triamide. Dicyandiamide.

INTRODUÇÃO GERAL

O crescimento da agricultura elevará a demanda mundial por fertilizantes nitrogenados durante a próxima década (Heffer e Prud'homme, 2016). Para que o desenvolvimento agrícola seja sustentável é necessário aumentar a eficiência da adubação nitrogenada, reduzindo as perdas de N, que além de prejuízos econômicos, causam sérios danos ambientais (Fowler et al., 2013; Pan et al., 2016).

A dinâmica das reações do N no solo que circunda os grânulos (granosfera), ou local de deposição dos fertilizantes, influencia na disponibilidade do N para as plantas e no potencial de perdas. Hidrólise da ureia, nitrificação e desnitrificação são processos que ocorrem próximos ao local em que os fertilizantes são depositados no solo e que potencializam as perdas por volatilização de NH_3 , lixiviação de NO_3^- e emissões de N_2O .

O parcelamento das doses de N é recomendado para reduzir as perdas e aumentar o sincronismo entre a adubação e o período de maior demanda pelas plantas. No entanto, o parcelamento pode se tornar inviável devido à logística operacional das grandes fazendas, além de aumentar os custos com operações com máquinas. A adubação nitrogenada em pré-semeadura, como alternativa ao parcelamento, apresenta vantagens operacionais (Coelho et al., 2002), contudo, pode potencializar as perdas de N, resultando em menor absorção pelas plantas e conseqüentemente, menor produtividade (Bortolini et al., 2002).

A adição de inibidores de urease e de nitrificação aos fertilizantes nitrogenados reduz as perdas do N (Zaman et al., 2013; Abalos et al., 2014), podendo viabilizar a adubação nitrogenada em pré-semeadura. Dentre os inibidores disponíveis, destacam-se o inibidor de urease N-(n-butyl) tiofosfórico triamida – NBPT e o inibidor de nitrificação dicianodiamida – DCD.

O UAN é um fertilizante fluido composto por ureia e nitrato de amônio que possui como vantagens a facilidade e uniformidade de aplicação, menor custo com mão de obra e versatilidade nas formulações, possibilitando combinar diferentes nutrientes e insumos agrícolas, como pesticidas, inibidores de urease e de nitrificação (INPI, 2010; Melgar et al., 2014). O UAN tratado com NBPT e DCD perde menos N, tornando a adubação nitrogenada mais eficiente (Abalos et al., 2014; Drury et al., 2017). No entanto pouco se sabe sobre o potencial do UAN com NBPT e DCD em pré-semeadura.

Esta tese está dividida em dois capítulos, sendo que no primeiro capítulo avaliou-se a dinâmica do N no solo adubado com elevadas doses de UAN com NBPT e, ou DCD. No segundo capítulo avaliou-se o UAN com NBPT e, ou DCD na adubação em pré-semeadura do milho.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Abalos D, Jeffery S, Sanz-Cobena A, Guardia G, Vallejo A. Meta-analysis of the effect of urease and nitrification inhibitors on crop productivity and nitrogen use efficiency. *Agr Ecosyst Environ.* 2014; 189: 136–144. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2014.03.036>
- Bortolini CG, Silva PRF, Argenta G, Forsthofer EL. Sistemas de aplicação de nitrogênio e seus efeitos sobre o acúmulo de N na planta de milho. *Rev Bras Cienc Solo.* 2002; 26: 361-366. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832002000200009>
- Coelho AM, Cruz JC, Filho IAP. Rendimento do milho no Brasil: Chegamos ao máximo. In: III Simpósio de Rotação Soja/Milho no Plantio Direto; 10/07/2002; Piracicaba, Brasil. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz; 2002. p. 1-12.
- Drury CF, Yang X, Reynolds WD, Calder W, Oloya TO, Woodley AL. Combining urease and nitrification inhibitors with incorporation reduces ammonia and nitrous oxide emissions and increases corn yields. *J Environ Qual.* 2017; 46: 939–949. <https://doi.org/10.2134/jeq2017.03.0106>
- Fowler D, Coyle M, Skiba U, Sutton MA, Cape N, Reis S, Sheppard LJ, Jenkins A, Grizzetti B, Galloway JN, Vitousek P, Leach A, Bouwman AF, Butterbach-Bahl K, Dentener F, Stevenson D, Amann M, Voss M. The global nitrogen cycle in the twentyfirst-century. *Philos T R Soc B.* 2013; 368: 1-13. <http://dx.doi.org/10.1098/rstb.2013.0164>
- Heffer P, Prud'homme M. Global nitrogen fertiliser demand and supply: trend, current level and outlook. Paris: International Fertilizer Association (IFA), 2016.
- International Plant Nutrition Institute – INPI. Nutrient Source Specifics: Urea-Ammonium Nitrate; 2010 [cited 2019 July 12]. Available from: [https://www.ipni.net/publication/nss.nsf/0/5BB8639163BB14E3852579AF0075540B/\\$FILE/NSS-07%20Urea%20Ammonium%20Nitrate.pdf](https://www.ipni.net/publication/nss.nsf/0/5BB8639163BB14E3852579AF0075540B/$FILE/NSS-07%20Urea%20Ammonium%20Nitrate.pdf)
- Melgar R, Duggan MT, Raggio JB, Poklepovic P, Matorras OL, Octtinger CA. Manual de fertilizantes fluidos: ¿Cómo optimizar el uso de fertilizantes fluidos en Argentina y agro-sistemas sudamericanos. Buenos Aires: Buenos Aires; 2014.
- Pan B, Lam SK, Mosier A, Luo Y, Chen D. Ammonia volatilization from synthetic fertilizers and its mitigation strategies: A global synthesis. *Agr Ecosyst Environ.* 2016; 232: 283–289. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.08.019>
- Zaman M, Zaman S, Adhinarayanan C, Nguyen ML, Nawaz S, Dawar KM. Effects of urease and nitrification inhibitors on the efficient use of urea for pastoral systems. *Soil Sci Plant Nutr.* 2013; 59: 649-659. <https://doi.org/10.1080/00380768.2013.812940>

CAPÍTULO I - DINÂMICA DO NITROGÊNIO EM SOLOS ADUBADOS COM UAN COM INIBIDORES DE UREASE E DE NITRIFICAÇÃO

Resumo

A disponibilidade e as perdas de N são reguladas pelas reações de transformação das formas do N em interação com um restrito volume do solo que circunda os grânulos dos fertilizantes (granosfera), ou seja, afetado pela deposição dos fertilizantes. Simulando esta condição, neste trabalho, amostras de solo receberam elevada dose de UAN (ureia – nitrato de amônio) sem e com N-(n-butil) tiofosfórico triamida (NBPT) e, ou dicianodiamida (DCD), com o objetivo de avaliar as transformações do N e a volatilização de NH_3 . A ureia granulada também foi utilizada como o fertilizante de referência. Trabalhou-se com amostras de um Latossolo Vermelho, muito argiloso, cultivado com milho (Solo_milho) e um Argissolo Vermelho-Amarelo, franco argilo-arenoso, de pastagem (Solo_pasto), caracterizados previamente como de baixa e alta atividade de urease, respectivamente. Em um experimento de incubação de amostras de solo com a dose de 10 g dm^{-3} de N, avaliou-se a hidrólise da ureia, a produção de NH_4^+ , NO_2^- e NO_3^- em um intervalo de 120 h. Em outro experimento avaliou-se, em um sistema com fluxo contínuo de ar, a volatilização de NH_3 a partir de amostras de solo com a dose de 500 mg dm^{-3} de N durante 312 h. A diferença na atividade da urease entre os solos foi determinante na intensidade da hidrólise da ureia e na volatilização de amônia entre os fertilizantes. A hidrólise da ureia resultou em elevação dos teores de NH_4^+ e pH dos solos, mas quando os solos foram adubados com UAN com NBPT o aumento dos teores de amônio e pH foram menos intensos. A nitrificação foi baixa em todos os tratamentos, não resultando em aumento dos teores de NO_3^- ao longo do tempo, contudo, houve acúmulo de nitrito em ambos os solos. A hidrólise da ureia, os teores de NH_4^+ e pH mantiveram resultados similares ao longo do tempo entre o UAN e UAN com DCD. O UAN perdeu 62 e 47 % menos N por volatilização de NH_3 que a ureia, para o Solo_milho e Solo_pasto, respectivamente. A adição de NBPT ao UAN retardou a ocorrência do pico de volatilização em ambos os solos e reduziu em 52 e 25 % a volatilização acumulada no Solo_milho e Solo_pasto, respectivamente. A adição de DCD juntamente com o NBPT não reduziu a eficiência do inibidor de urease.

Palavras chave: Atividade da urease, DCD, NBPT, NO_2^- , UAN.

Abstract

N availability and losses are regulated by N-form transformation reactions in interaction with a restricted volume of soil surrounding the fertilizer granules, that is, affected by fertilizer deposition. Simulating this condition, this work evaluated N transformations and NH₃ volatilization in soil samples that received high dose UAN (urea - ammonium nitrate) without and with N-(n-butyl) thiophosphoric triamide (NBPT) and, or dicyandiamide (DCD). Granulated urea was also used as the reference fertilizer. Samples of a very clayey Red Latosol cultivated with maize (Maize_soil) and a Red-Yellow Argisol, of pasture (Pasture_soil), previously characterized as low and high urease activity, respectively, was incubated with 10 g dm⁻³ N, and was evaluated urea hydrolysis and accumulation of NH₄⁺, NO₂⁻ and NO₃⁻ at a 120 h interval. In another experiment, it was evaluated, in a continuous airflow system, of NH₃ volatilization from soil samples with a dose of 500 mg dm⁻³ incubated for 312 h. The difference in urease activity between soils was determinant in the intensity of urea hydrolysis and ammonia volatilization among fertilizers. Urea hydrolysis resulted in increased soil NH₄⁺ and pH, but when the soils were fertilized with UAN with NBPT the increase in ammonium and pH levels were less intense. Nitrification was low in all treatments, not increase NO₃⁻ levels over time, however, nitrite accumulated in both soils. Urea hydrolysis, NH₄⁺ contents and pH maintained similar results over time between UAN and UAN with DCD. UAN lost 62 and 47% less N by NH₃ volatilization than urea to Maize_soil and Pasture_soil, respectively. The addition of NBPT to UAN delayed the occurrence of the volatilization peak in both soils and reduced the accumulated volatilization in Maize_soil and Pasture_soil by 52 and 25%. The addition of DCD together with NBPT did not reduce the efficiency of the urease inhibitor.

Keywords: Urease activity, DCD, NBPT, NO₂⁻, UAN.

1 INTRODUÇÃO

O aumento da produtividade agrícola está intrinsecamente relacionado ao uso de fertilizantes, sobretudo os nitrogenados. Estima-se que em 2020 a demanda mundial será de 118,7 milhões de toneladas de N (FAO, 2017). A ureia é o adubo nitrogenado mais usado no mundo, devido ao elevado teor de N, o que define o menor custo por unidade de N, e às características físico-químicas, que facilitam o seu manejo. No entanto, com inadequado manejo da adubação, a ureia é suscetível a intensas perdas de N pela volatilização de NH_3 (Pan et al., 2016).

A volatilização de NH_3 além de acarretar perda econômica, contribui para significativos impactos ambientais. A NH_3 é precursora da matéria fina particulada ($\text{PM}_{2,5}$) que compromete a qualidade do ar (Behera et al., 2013), está envolvida na emissão indireta de N_2O (VanderZaag et al., 2011) e nos processos de eutrofização de cursos d'água, por deposição atmosférica (Aneja et al., 2001). Estima-se que entre 11,2 – 15,7 milhões de toneladas de N-fertilizante foram perdidos como N- NH_3 globalmente, no ano de 2014 (Pan et al., 2016). Além do custo financeiro, essa perda equivale a 0,1 – 0,16 milhões de t de emissão indireta de N- N_2O , que correspondem a 52,4 – 73,5 milhões de t de CO_2 equivalente (Pan et al., 2016).

Estratégias tais como, o uso de inibidores de urease e nitrificação (Abalos et al., 2014) e fertilizante nitrogenado com menor fator de emissão de NH_3 (Pan et al., 2016) têm sido testadas como formas de reduzir as perdas de N e aumentar a eficiência da adubação nitrogenada.

Dentre os inibidores em uso destacam-se, o N-(n-butil) tiofosfórico triamida (NBPT) como inibidor da urease e o dicianodiamida (DCD) como inibidor da nitrificação. Contudo, algumas limitações, como a influência de fatores ambientais no tempo de vida útil dos inibidores, estimulam o desenvolvimento de mais pesquisas (Abalos et al., 2014; Cantarella, et al., 2018). Além disso, apesar dos inibidores de nitrificação reduzirem as emissões de N_2O e a lixiviação de NO_3^- , eles podem favorecer a volatilização de NH_3 porque prolongam as concentrações mais elevadas de NH_4^+ no solo e o pico de pH resultante da hidrólise da ureia (Fox e Bandel, 1989).

O uso de fertilizantes alternativos à ureia com menores potenciais de emissões reduz a perda de N- NH_3 (Pan et al., 2016). O UAN, fertilizante fluido à base de ureia-nitrato de amônio com 32 % de N é uma alternativa à ureia. Esse

fertilizante possui menor teor de N-amídico (14 %) e por isso é menos susceptível a grandes perdas por volatilização de NH_3 (Lara Cabeza et al., 1997; Costa et al., 2003). Além disso, por ser um adubo fluido, o UAN proporciona melhor distribuição, menor custo de aplicação e pode ser misturado com outros insumos agrícolas (INPI, 2010; Melgar et al., 2014). A formulação do UAN com inibidores de urease e de nitrificação pode aumentar a eficiência da adubação nitrogenada, reduzindo as emissões de NH_3 para a atmosfera (Drury et al., 2017).

A dinâmica das reações do N no solo do entorno dos grânulos (granosfera) ou local de deposição dos fertilizantes influencia na disponibilidade do N para as plantas e no potencial de perdas. Hidrólise da ureia, nitrificação e desnitrificação são mais intensos próximos ao local em que os fertilizantes são depositados no solo, o que potencializa as emissões de NH_3 e N_2O e a lixiviação de NO_3^- .

O objetivo desse estudo foi avaliar o efeito do NBPT e DCD nas transformações do N e na volatilização de NH_3 em solos adubados com UAN.

2 MATERIAL E MÉTODOS

Os experimentos foram realizados com amostras secas ao ar e granulometria menor que 2 mm, da camada de 0-0,05 m de um Latossolo Vermelho, muito argiloso, cultivado com milho (Solo_milho) e de um Argissolo Vermelho-Amarelo, franco argilo-arenoso, de pastagem (Solo_pasto), cuja caracterização química e física é apresentada na Tabela 1. Os solos receberam quantidades de uma mistura de CaCO_3 e MgCO_3 (relação Ca:Mg de 4:1) suficiente para elevar a saturação por bases para 70 %.

Os fertilizantes avaliados foram UAN e Ureia (Ur) sem inibidores e UAN com NBPT e, ou DCD: UANnbpt, UANdcd e UANnbpt.dcd. A dose, tanto do NBPT (UBYFOL®) como do DCD (90 %) foi de 2 g kg^{-1} de fertilizante. Os teores de N total nos fertilizantes foram determinados pelo método da digestão ácida na presença da liga de Raney e destilação Kjeldahl, com dosagem por titulometria ácido-base. Os teores de N obtidos foram: Ur (46,0 %), UAN (30,1 %), UANnbpt (29,8 %), UANdcd (28,9 %) e UANnbpt.dcd (30,8 %).

Tabela 1. Características químicas e físicas dos solos

Solo	pH (H ₂ O)	P	SB	H+Al	CTC (pH 7)	CTC	MO	V	Argila	CC
		mg dm ⁻³	-----	cmol _c dm ⁻³	-----	dag kg ⁻¹	%	kg kg ⁻¹	m ³ m ⁻³	
Solo_milho	4,97	2,97	5,60	5,10	10,70	5,60	5,55	52	80	0,39
Solo_pasto	5,20	4,56	3,98	4,63	8,62	3,98	5,77	46	31	0,27

SB – soma de bases, MO – matéria orgânica, V – saturação por bases, CC – capacidade de campo.

A determinação da atividade da urease nos solos foi realizada segundo Bremner (1982). Para isso, amostras de 2,5 g de cada solo foram transferidas para tubos de centrífuga e umedecidas para atingir 70 % da capacidade de campo. Após 24 horas foram adicionados 5 mg de ureia, por meio de 0,5 mL de uma solução contendo 10 g L⁻¹. Isto ocorreu de forma escalonada de modo que permitiu 6 medições entre duas e 48 h de incubação a 25 °C. Para determinar a ureia remanescente adicionaram-se às amostras 25 mL de uma solução de KCl 1 mol L⁻¹ contendo 5 mg L⁻¹ de acetato de fenilmercúrio (PMA). O extrato foi filtrado e a ureia foi quantificada por espectrofotometria de absorção molecular, no comprimento de onda de 527 nm, com uso de diacetil monoxime (DAM) e thiosemicarbazide (TSC) em meio ácido. A ureia hidrolisada em cada tempo de incubação foi estimada em relação à ureia adicionada ao solo.

A avaliação da atividade da urease foi realizada segundo o arranjo fatorial (2x6) + 2, sendo: dois solos, seis tempos de incubação e os dois solos sem adição de ureia (controles). O delineamento experimental foi inteiramente casualizado, com quatro repetições.

Os resultados foram submetidos à análise de variância e foram ajustados modelos de regressão para a variação da quantidade de ureia hidrolisada de acordo com o tempo.

2.1 Dinâmica do N no solo

As unidades experimentais consistiram de tubos de centrífuga de 50 mL contendo 10 cm³ dos respectivos solos umedecidos a 80 % da capacidade de campo, incubadas a 25 °C. Vinte e quatro horas após o umedecimento do solo, foram adicionadas quantidades dos fertilizantes suficientes para fornecer 100 mg de N por tubo (10 g dm⁻³), visando simular a localização do fertilizante quando aplicado no

solo, em que, os grânulos ou gotas interagem com um restrito volume de solo que os circunda.

As avaliações ocorreram imediatamente após a aplicação dos fertilizantes (tempo zero) e continuaram até 120 horas. A cada avaliação 35 mL de KCl 1 mol L⁻¹ contendo 5 mg L⁻¹ de acetato de fenilmercúrio (PMA) foram adicionados aos respectivos tubos. Após 60 min de agitação o extrato foi obtido por filtração. No extrato determinou-se o pH-KCl, N-Ureia (Mulvaney e Bremner, 1979), o N-NH₄⁺ (Kempers e Zewers, 1986), o N-NO₃⁻ (Yang et al. 1998) e N-NO₂⁻ (Keeney e Nelson, 1982).

O experimento foi realizado de acordo com a combinação fatorial (2 × (5 + 1)) × 9, sendo dois solos, cinco fertilizantes, um tratamento controle sem adição de N e nove avaliações. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado com medições repetidas no tempo, com quatro repetições. Os dados foram submetidos à análise de variância e foram ajustados modelos de regressão para o pH-KCl e os teores de N-ureia, N-NH₄⁺, N-NO₃⁻ e N-NO₂⁻ no solo ao longo do tempo.

2.2 Volatilização de NH₃

A volatilização de NH₃ foi avaliada à temperatura de 25 °C, em um sistema constituído por câmaras de incubação de 1 dm³ conectadas à unidades coletoras da NH₃ (erlenmeyers contendo 40 mL de uma solução 20 g L⁻¹ de H₃BO₃ - pH 4,35). O sistema recebe um fluxo de aproximadamente 300 cm³ min⁻¹ de ar, previamente borbulhado em H₂SO₄ 1 mol L⁻¹ para remoção de NH₃ e em água deionizada para umedecimento. Foram colocados nas câmaras de incubação 200 cm³ dos respectivos solos, que foram umedecidos a 80 % da capacidade de campo 24 h antes da aplicação dos tratamentos. Visando simular a localização do fertilizante quando aplicado no solo, quantidades dos fertilizantes equivalentes a 100 mg de N (500 mg dm⁻³) foram aplicadas nas superfícies dos solos e as câmaras de incubação foram imediatamente vedadas e acionado o fluxo de ar, dando início ao período experimental. Foram realizadas 20 medições de volatilização de NH₃, entre três e 312 horas após a aplicação dos fertilizantes. Em cada medição as unidades coletoras de NH₃ foram removidas e trocadas por novas unidades. A amônia capturada foi dosada, indiretamente, por titulação potenciométrica com HCl 50 mmol L⁻¹ até o pH 4,35.

O experimento foi realizado de acordo com a combinação fatorial ($2 \times (5 + 1) \times 20$), sendo: dois solos, cinco fertilizantes, um controle sem fertilizante, e 20 medições. O delineamento experimental foi inteiramente casualizado com medições repetidas no tempo, com três repetições.

As quantidades N-NH₃ volatilizadas por coleta foram relacionadas com o tempo de amostragem por meio de regressões, a partir das quais foi estimada a quantidade máxima volatilizada e o tempo em que ela ocorreu. As quantidades acumuladas de N-NH₃ foram comparadas pelo teste de Tukey a 5 % de significância.

3 RESULTADOS

O Solo_pasto apresentou maior atividade de urease, sendo que, metade da ureia adicionada foi hidrolisada (T50) em até 8 h e estima-se que 90 % seria hidrolisada até 20 h de incubação (Tabela 2). No Solo_milho a quantidade de ureia hidrolisada aumentou linearmente, mas foi menos intensa, haja vista que o T50 foi alcançado apenas 27 h após a aplicação.

Tabela 2. Equações de regressão relacionando a quantidade de ureia hidrolisada (mg mg⁻¹) entre 2 e 48 h de incubação com os solos e o tempo em que 50 (T50) e 90 (T90) % da ureia foi hidrolisada

Solo	Equação	R ²	T50	T90
				(h)
Solo_milho	$\hat{y}=0,27+0,0085^{**} x$	0,94	27	74,2
Solo_pasto	$\hat{y}=0,043+0,082^{**} x-0,0087^{**} x^{1,5}$	0,98	7,9	19,8

** significativo a 5 %.

3.1 Dinâmica do N no solo

Metade da ureia adicionada (Ur) foi hidrolisada em 37,7 e 24,3 h no Solo_milho e Solo_pasto, respectivamente (Figuras 2a e 2b), mas em ambos os solos foi integralmente hidrolisada em cerca de 80 h. Concomitante com a redução dos teores de ureia ocorreu a elevação do pH e do teor de N-NH₄⁺ (Figura 2).

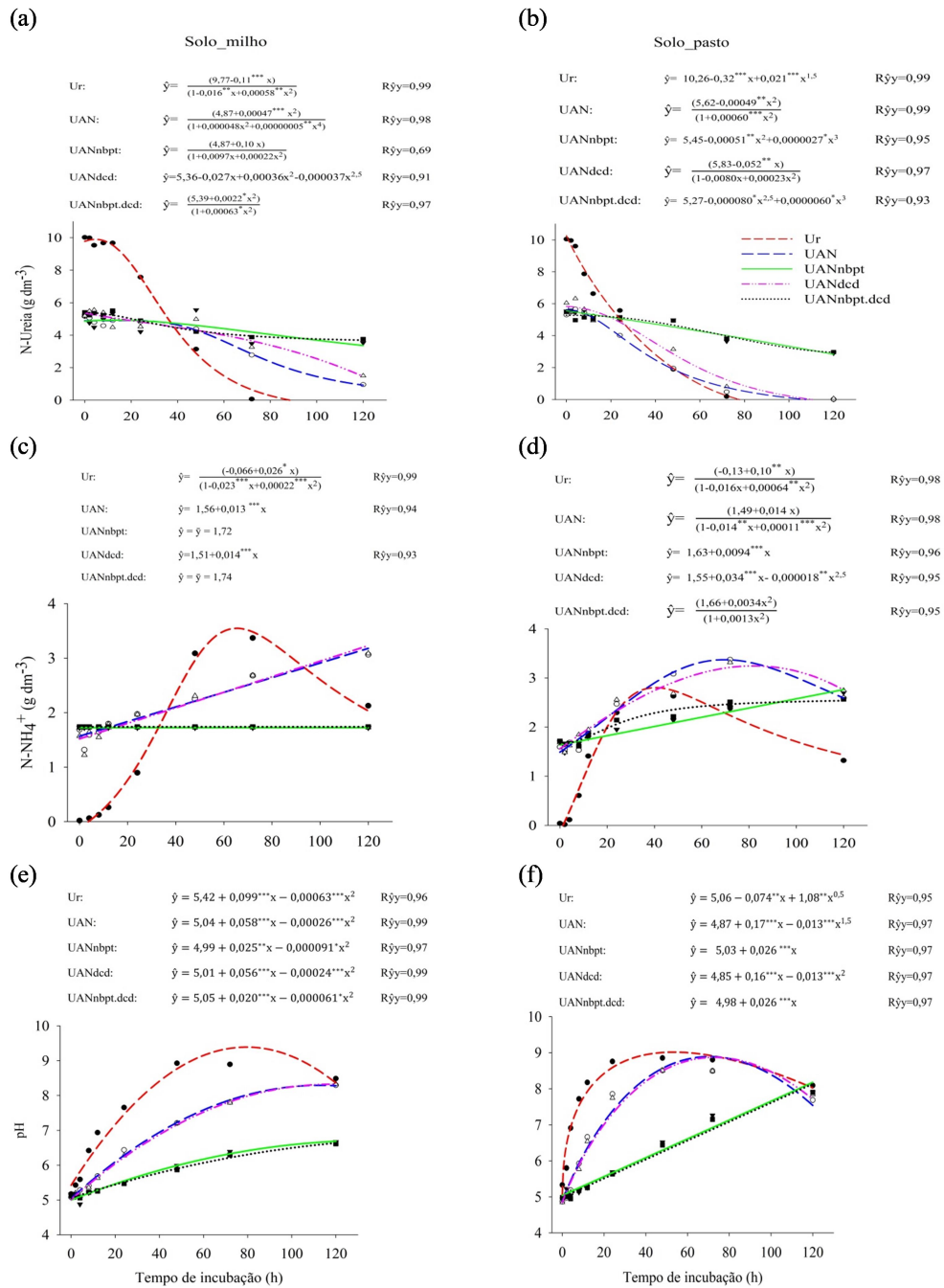


Figura 2. Variação no teor de N-ureia (a, b), de N-NH₄⁺ (c, d) e pH-KCl (e, f) em solo cultivado com milho e pastagem, de acordo com o tempo desde a aplicação dos fertilizantes nitrogenados. *, **, *** = significativo a 5, 1 e 0,1 %, respectivamente. O “R $\hat{y}y$ ” corresponde à correlação entre os dados observados e estimados pelas equações.

A dinâmica de hidrólise da ureia presente no UAN foi diferente (Figura 2a e 2b). No Solo_milho metade foi hidrolisada em 77,3 h e permaneceu um residual até

as 120 h, enquanto que no solo com maior atividade de urease metade foi hidrolisada até 24 h e foi integralmente hidrolisada até cerca de 100 h. Para o UANnbpt a redução dos teores de ureia ocorreu de forma menos intensa, sendo que, após 120 h de incubação ainda permaneceu 64 e 56 % do N-ureia no Solo_milho e Solo_pasto, respectivamente. Para o UANnbpt.dcd 74 e 60 % do N-ureia permaneceram no Solo_milho e Solo_pasto, respectivamente, após 120 h de incubação.

O pH final no Solo_milho foi menor nos tratamentos de UAN com NBPT (Figura 2e) enquanto no Solo_pasto o pH final foi similar entre os tratamentos, mas aumentou com menor intensidade ao longo do tempo no UANnbpt e UANnbpt.dcd (Figura 2f).

Os teores de N-ureia, $N-NH_4^+$ e o pH dos solos com adição de UANdcd variaram de forma similar àqueles com a adição do UAN nos dois solos (Figura 2). O DCD também não influenciou na dinâmica do N quando foi combinado com o NBPT (UANnbpt.dcd), tendo este tratamento apresentado teores de N-Ureia, $N-NH_4^+$ e pH similares ao UANnbpt, em ambos os solos.

Houve efeito significativo do tempo de incubação sobre os teores de NO_3^- para o UANnbpt.dcd no Solo_milho e UAN em ambos os solos. Contudo, os teores de NO_3^- apresentaram uma variação uniforme com o tempo (Figura 3), sem nenhuma relação com as variações no pH e nos teores de N-ureia, $N-NH_4^+$ e $N-NO_2^-$ (Figura 2). Nos solos fertilizados com Ur os teores de NO_3^- não variaram ao longo do tempo e permaneceram próximos àqueles dos tratamentos controles (Figura 3).

Os teores de $N-NO_2^-$ se elevaram em ambos os solos (Figura 3). No Solo_milho o UAN apresentou o maior teor de $N-NO_2^-$ ($15,3 \text{ mg dm}^{-3}$), seguido por UANdcd, Ur e UANnbpt, com 13,4, 12,9, 11,4 mg dm^{-3} , respectivamente, mas que não diferiram entre si, enquanto o UANnbpt.dcd apresentou a menor concentração de $N-NO_2^-$ ($5,6 \text{ mg dm}^{-3}$).

No Solo_pasto os maiores teores de $N-NO_2^-$, 12,8 e 12,2 mg dm^{-3} , ocorreram com o UANdcd e o UAN, respectivamente. Enquanto o UANnbpt, Ur e UANnbpt.dcd tiveram menor acúmulo de $N-NO_2^-$, 8,4, 7,7 e 7,6 mg dm^{-3} , respectivamente.

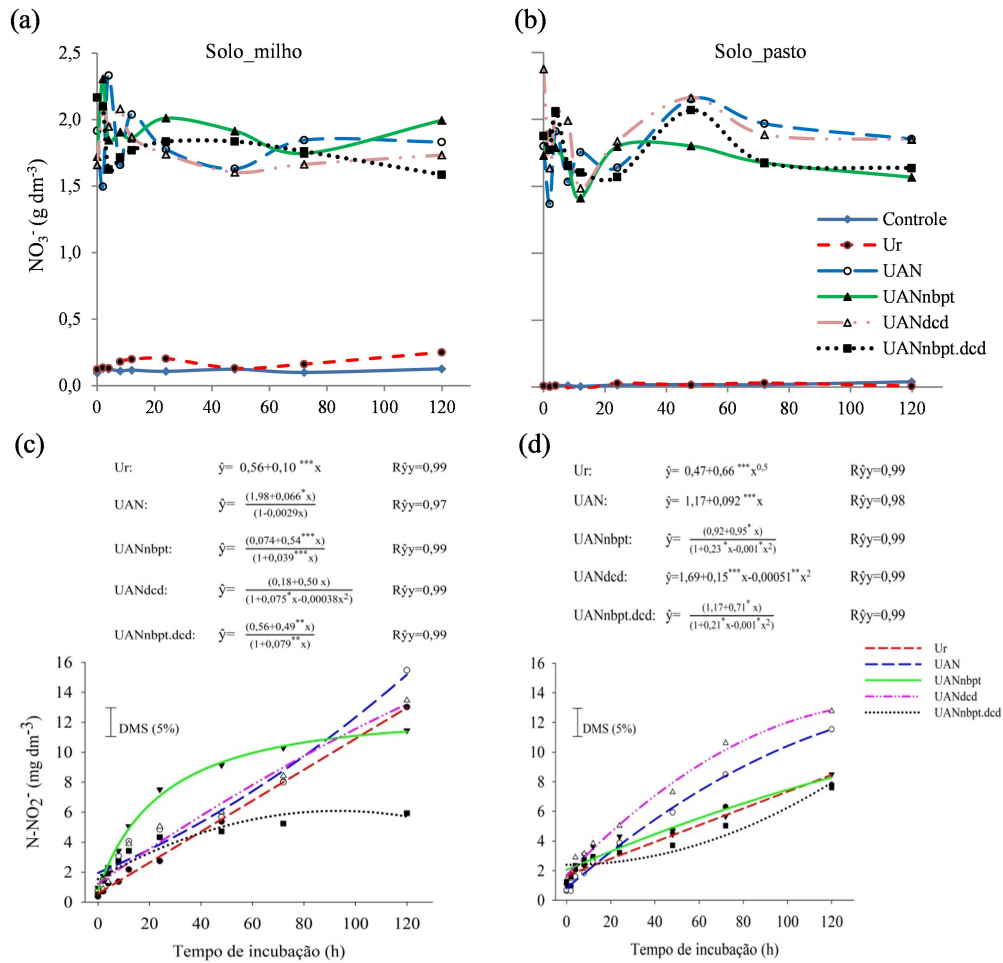


Figura 3. Variação no teor de $N\text{-NO}_3^-$ (a, b) e $N\text{-NO}_2^-$ (c, d) em solo cultivado com milho e pastagem, de acordo com o tempo desde a aplicação dos fertilizantes nitrogenados. Diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). *, **, *** = significativo a 5, 1 e 0,1 %, respectivamente. O “R²y” corresponde à correlação entre os dados observados e estimados pelas equações.

Em ambos os solos o inibidor de nitrificação isoladamente (UANdcd) não reduziu a produção de nitrito, contudo, constatou-se redução quando combinado com o NBPT (UANnbpt.dcd) (Figura 3). O teor acumulado de NO_2^- após 120 h foi significativamente menor para o UANnbpt.dcd aplicado ao Solo_milho (Figura 3c), enquanto no Solo_pasto, o UANnbpt, UANnbpt.dcd e a Ur apresentaram os menores teores de nitrito acumulado (Figura 3d).

3.2 Volatilização de NH₃

A ureia (Ur) foi o fertilizante que apresentou maior volatilização de NH₃, com perdas totais de 29,2 e 28,6 mg de N-NH₃ para o Solo_milho e Solo_pasto, respectivamente (Tabela 3). O pico de volatilização ocorreu 48 h após a aplicação do fertilizante no solo que possui menor atividade da urease (Solo_milho), enquanto no solo com maior atividade (Solo_pasto) o pico de volatilização ocorreu após 24 h (Figura 4).

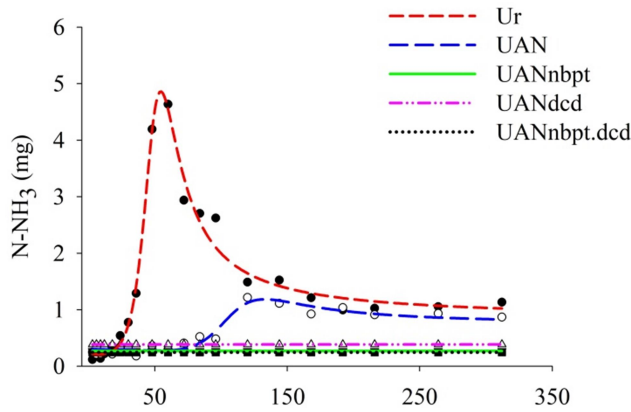
Tabela 3. Total de N-NH₃ volatilizada em solo cultivado com milho ou com pasto após 312 de incubação de 100 mg de N

Tratamento	Solo_milho	Solo_pasto
	----- (mg) -----	
Controle	2,4 ¹ D	2,8 ¹ D
Ur	29,2 A	28,6 A
UAN	11,1 B	15,2 B
UANnbpt	5,4 C	11,4 C
UANdcd	7,7 C	14,1 BC
UANnbpt.dcd	4,2 CD	15,2 B

¹ Estes valores referem-se à volatilização basal do solo, isto é sem a adição de fertilizantes, em 312 h. Letras diferentes dentro de cada solo indicam diferença na volatilização total pelo teste de Tukey (p < 0,05).

(a)

$$\begin{aligned} \text{Ur:} \quad \hat{y} &= \frac{(0,22 - 0,011^{**}x + 0,00032^{***}x^2)}{(1 - 0,037^{***}x + 0,00038^{***}x^2)} & R\hat{y}y=0,98 \\ \text{UAN:} \quad \hat{y} &= \frac{(0,33 - 0,000058^{**}x^2 + 0,000000005^{**}x^4)}{(1 - 0,00013^{***}x^2 + 0,0000000066^{**}x^4)} & R\hat{y}y=0,94 \\ \text{UANnbpt:} \quad \hat{y} &= \bar{y} = 0,27 \\ \text{UANdcd:} \quad \hat{y} &= \bar{y} = 0,38 \\ \text{UANnbpt.dcd:} \quad \hat{y} &= \bar{y} = 0,24 \end{aligned}$$



(b)

$$\begin{aligned} \text{Ur:} \quad \hat{y} &= \frac{(-0,33 + 0,13^{***}x^{0,5})}{(1 - 0,41^{***}x^{0,5} + 0,044^{***}x)} & R\hat{y}y=0,98 \\ \text{UAN:} \quad \hat{y} &= \frac{(0,20 - 0,0034x + 0,000081^{**}x^2)}{(1 - 0,032^{***}x + 0,00029^{***}x^2)} & R\hat{y}y=0,95 \\ \text{UANnbpt:} \quad \hat{y} &= \frac{(0,31 - 0,0054^{*}x + 0,000034^{*}x^2)}{(1 - 0,017^{***}x + 0,000077^{***}x^2)} & R\hat{y}y=0,78 \\ \text{UANdcd:} \quad \hat{y} &= \frac{(0,26 - 0,0045x + 0,000078^{**}x^2)}{(1 - 0,031^{***}x + 0,00028^{***}x^2)} & R\hat{y}y=0,95 \\ \text{UANnbpt.dcd:} \quad \hat{y} &= \frac{(0,31 - 0,0042x + 0,000027^{*}x^2)}{(1 - 0,014^{***}x + 0,000059^{***}x^2)} & R\hat{y}y=0,88 \end{aligned}$$

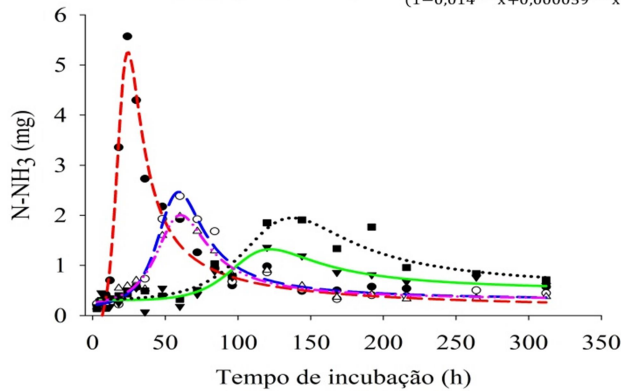


Figura 4 – Amônia volatilizada ao longo do tempo, com a aplicação de 100 mg de N como ureia e formulações com UAN no Solo_milho (a) e Solo_pasto (b). *, **, *** = significativo a 5, 1 e 0,1 %, respectivamente. O “R $\hat{y}y$ ” corresponde à correlação entre os dados observados e estimados pelas equações.

O UAN apresentou menor volatilização total de N-NH₃ que a Ur, com perdas de 11,1 e 15,2 mg de N no Solo_milho e Solo_pasto (Figura 4), respectivamente, representando reduções de 62 e 47 % na perda de N em relação à Ur.

O UANnbpt apresentou menor volatilização total e o pico de volatilização ocorreu 122 h após a aplicação no Solo_pasto (Tabela 3 e Figura 4), o que significa um retardamento de 63 e 98 h em relação ao pico de volatilização do UAN e Ur, respectivamente. No entanto, no solo com baixa atividade de urease (Solo_milho) o UANnbpt não apresentou um pico de volatilização, mantendo-se constante. Com a adição do NBPT a quantidade acumulada de N perdida foi de 5,4 mg no Solo_milho e 11,4 mg no Solo_pasto (Tabela 3), que correspondem a reduções de 52 e 25 % nas perdas verificadas com o UAN, respectivamente. Assim, o UANnbpt apresentou perdas de NH₃ 82 e 60 % menores que as verificadas com a Ur no Solo_milho e Solo_pasto, respectivamente.

No Solo_pasto a adição de DCD ao UAN não interferiu no tempo em que ocorreu o pico de volatilização, nem na perda total de N (Tabela 3 e Figura 4). No Solo_milho o UANdcd não apresentou um pico de volatilização e a perda total de N foi menor do que aquela obtida com o UAN.

Os efeitos da combinação do UAN com NBPT e DCD variaram de acordo com o solo. No solo com maior atividade de urease (Solo_pasto) o UANnbpt.dcd retardou o pico de volatilização, mas não interferiu na quantidade acumulada (Tabela 3). No Solo_milho a volatilização se manteve constante, sem um pico definido e a quantidade total volatilizada foi menor do que a do UAN, embora tenha sido similar às obtidas com UANnbpt e UANdcd.

4 DISCUSSÃO

Os dois solos diferiram de forma acentuada quanto à atividade da urease, atendendo as condições necessárias para avaliar os fluxos de transformações do N-NH₂ suprido pelos fertilizantes. A maior atividade da urease no Solo_pasto deve-se ao contínuo aporte de ureia por meio dos resíduos animais, o que estimula a atividade de microrganismos produtores de urease (Lloyd e Sheaffe, 1973; Martens et al., 1992).

Para o UAN, a diferença na hidrólise da ureia entre os solos pode ser atribuída ao seu menor teor de N-NH₂, haja vista que a velocidade da hidrólise

aumenta com maiores concentrações de ureia (Longo e Melo, 2005), desde que essa concentração não seja elevada o suficiente para saturar os sítios ativos da enzima (Cantarella, 2007), além disso, há menor estímulo à produção de urease. Isto é evidenciado pelo menor tempo necessário para que a ureia (Ur) fosse totalmente hidrolisada, em ambos os solos isso ocorreu após 80 h.

A menor velocidade na hidrólise da ureia do UAN com NBPT evidencia a eficácia do inibidor de urease em reduzir a velocidade da hidrólise, o que conseqüentemente, reduziu a intensidade da elevação dos teores de amônio e pH em ambos os solos.

A baixa nitrificação observada se deve à elevação concomitante do teor de NH_4^+ e do pH do solo, que favorece a formação de NH_3 que é tóxica para as bactérias nitrificantes (Anthonisen et al., 1976). As bactérias do gênero *Nitrobacter*, oxidantes do NO_2^- , são cerca de duas vezes mais sensíveis à NH_3 do que as *Nitrosomonas*, oxidantes do NH_4^+ (Smith et al., 1997). Assim, a elevação dos teores de NO_2^- , em ambos os solos, é explicada pelo efeito inibidor da NH_3 sobre as *Nitrobacter* (Breuillin-Sessoms, 2017; Tierling e Kuhlmann, 2018). A menor velocidade na hidrólise da ureia do UAN com NBPT e DCD implicou em menos NH_3 no Solo_milho, favorecendo a atividade das *Nitrobacter*, que ao oxidar o NO_2^- , reduziu o seu teor no solo. Em sistemas naturais, a oxidação do NO_2^- a NO_3^- ocorre mais rapidamente que a oxidação do NH_4^+ a NO_2^- , assim, as concentrações de NO_2^- no solo são, geralmente, menores que 1 mg kg^{-1} (Chalk e Smith, 1983).

A menor atividade da urease foi mais determinante para retardar o pico de volatilização de NH_3 do que para reduzir a quantidade total volatilizada, tanto para a ureia como o UAN. Mesmo que se considere que o UAN tenha apenas 75 % do N potencialmente volatilizável ($\text{N-NH}_2 + \text{N-NH}_4^+$), ainda assim as perdas com este fertilizante foram menores. A penetração do fertilizante fluido no solo favorece a adsorção do NH_4^+ , preservando-o da conversão à NH_3 e conseqüente volatilização (Lara Cabezas et al., 1997; Nyord et al., 2008; Dattamudi et al., 2016).

No solo com baixa atividade de urease o NBPT contribuiu para maior redução na volatilização do que no solo com alta atividade de urease, embora neste solo tenha retardado o pico de volatilização, indicando que em solos com intensa atividade da urease são necessárias maiores doses de NBPT. Além disso, o retardamento da hidrólise da ureia é fundamental para que o fertilizante seja

incorporado ao solo, pela chuva, por exemplo, e com isso minimizar a perda de NH_3 , conforme constataram Lara Cabezas et al. (1997) e Soares et al. (2012).

Há relatos de que os inibidores de nitrificação podem aumentar a volatilização de NH_3 por manterem elevados o teor de NH_4^+ e o pH do solo por maiores períodos de tempo (Banerjee et al., 2002; Tian et al., 2015; Frame, 2017). Soares et al., (2012) observaram que o DCD (70 g kg^{-1}) aumentou a volatilização de NH_3 da ureia após 10 dias de incubação, o que não foi observado no presente estudo, no entanto, a dose de DCD utilizada foi menor (2 g kg^{-1}).

5 CONCLUSÕES

O UAN perde menos NH_3 que a ureia, independentemente da intensidade da atividade da urease do solo.

O NBPT retarda a ocorrência do pico de volatilização do UAN e reduz a volatilização acumulada de NH_3 .

A adição de DCD combinado com o NBPT no UAN não reduz a eficiência do inibidor de urease.

Há acúmulo de NO_2^- no solo próximo ao local de deposição da ureia ou UAN.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Abalos D, Jeffery S, Sanz-Cobena A, Guardia G, Vallejo A. Meta-analysis of the effect of urease and nitrification inhibitors on crop productivity and nitrogen use efficiency. *Agr Ecosyst Environ.* 2014; 189: 136–144. <http://dx.doi.org/10.1016/j.agee.2014.03.036>

Aneja VP, Roelle PA, Murray GC, Southerland J, Erisman JW, Fowler D, Asman WAH, Patni N. Atmospheric nitrogen compounds II: emissions, transport, transformation, deposition and assessment. *Atmos Environ.* 2001; 35: 1903-1911. [https://doi.org/10.1016/S1352-2310\(00\)00543-4](https://doi.org/10.1016/S1352-2310(00)00543-4)

Anthonisen AC, Loehr RC, Prakasam TBS, Srinath EG. Inhibition of nitrification by ammonia and nitrous acid. *J Water Pollut Con F.* 1976; 48: 835-852.

Banerjee B, Pathak H, Aggarwal P. Effects of dicyandiamide, farmyard manure and irrigation on crop yields and ammonia volatilization from an alluvial soil under a rice (*Oryza sativa* L.)-wheat (*Triticum aestivum* L.) cropping system. *Biol Fert Soils.* 2002; 36: 207-214. <https://doi.org/10.1007/s00374-002-0528-7>

Behera SN, Sharma M, Aneja VP, Balasubramanian R. Ammonia in the atmosphere: a review on emission sources, atmospheric chemistry and deposition on terrestrial bodies. *Environ Sci Pollut R.* 2013; 20: 8092–8131. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2051-9>

Bremner JM. Nitrogen-Urea. In: Page AL, Miller RH, Keeney DR, editors. *Methods of soil analysis.* 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy/Soil Science Society of America; 1982. p. 699-709.

Breullin-Sessoms F, Venterea RT, Sadowsky MJ, Couter JA, Clough TJ, Wang P. Nitrification gene ratio and free ammonia explain nitrite and nitrous oxide production in urea-amended soils. *Soil Biol Biochem.* 2017; 111: 143-153. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2017.04.007>

Cantarella H. Nitrogênio. In: Novais RF, Alvarez V. VH, Cantarutti RB, Neves JCL, editors. *Fertilidade do solo.* Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2007. p.375-470.

Cantarella H, Otto R, Soares JR, Silva AGB. Agronomic efficiency of NBPT as a urease inhibitor: A review. *J Adv Res.* 2018; 13: 19–27. <https://doi.org/10.1016/j.jare.2018.05.008>

Chalk PM, Smith CJ. Chemodenitrification. In: Freney JR, Simpson JR, editors. *Gaseous Loss of Nitrogen From Plant-Soil Systems.* Amsterdam: Springer Press; 1983. p. 65-89.

Costa MCG, Vitti GC, Cantarella H. Volatilização de N-NH₃ de fontes nitrogenadas em cana-de-açúcar colhida sem despalha a fogo. *Rev Bras Cienc Solo.* 2003; 27: 631-637. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832003000400007>

Dattamudi S, Wang JJ, Dodla SK, Arceneaux A, Viator HP. Effect of nitrogen fertilization and residue management practices on ammonia emissions from subtropical sugarcane production. *Atmos Environ.* 2016; 139: 122-130. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2016.05.035>

Drury CF, Yang X, Reynolds WD, Calder W, Oloya TO, Woodley AL. Combining urease and nitrification inhibitors with incorporation reduces ammonia and nitrous oxide emissions and increases corn yields. *J Environ Qual.* 2017; 46: 939–949. <https://doi.org/10.2134/jeq2017.03.0106>

Food and Agriculture Organization - FAO. *World Fertilizer Trends and Outlook to 2020*. Rome: Food and Agriculture Organization of the United Nations; 2017.

Fox RH, Bandel VA. Dicyandiamide (DCD) research in agriculture in the mid-Atlantic region. *Commun Soil Sci Plan.* 1989; 20: 1957–1968. <https://doi.org/10.1080/00103628909368196>

Frame W. Ammonia volatilization from urea treated with NBPT and two nitrification inhibitors. *Agron J.* 2017; 109: 378-387. <https://doi.org/10.2134/agronj2016.08.0464>

International Plant Nutrition Institute – INPI. *Nutrient Source Specifics: Urea-Ammonium Nitrate*; 2010 [cited 2019 July 12]. Available from: [https://www.ipni.net/publication/nss.nsf/0/5BB8639163BB14E3852579AF0075540B/\\$FILE/NSS-07%20Urea%20Ammonium%20Nitrate.pdf](https://www.ipni.net/publication/nss.nsf/0/5BB8639163BB14E3852579AF0075540B/$FILE/NSS-07%20Urea%20Ammonium%20Nitrate.pdf)

Keeney DR, Nelson DW. Nitrogen-Inorganic Forms. In: Page AL, Miller RH, Keeney DR, editors. *Methods of soil analysis*. 2nd ed. Madison: American Society of Agronomy/Soil Science Society of America; 1982. p. 643-698.

Kempers AJ, Zweers A. Ammonium determination extracts by the salicylate method. *Commun Soil Sci Plan.* 1986; 17: 715-723. <https://doi.org/10.1080/00103628609367745>

Lara Cabezas WAR, Korndorfer GH, Motta SA. Volatilização de N-NH₃ na cultura de milho: II. Avaliação de fontes sólidas e fluidas em sistema de plantio direto e convencional. *Rev Bras Cienc Solo.* 1997; 21: 489-496. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06831997000300019>

Lloyd AB, Sheaffe MJ. Urease activity in soils. *Plant Soil.* 1973; 39: 71-80. <https://doi.org/10.1007/BF00018046>

Longo RM, Melo WJ. Hidrólise da uréia em latossolos: efeito da concentração de uréia, temperatura, pH, armazenamento e tempo de incubação. *Rev Bras Cienc Solo.* 2005; 29: 651-657. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832005000400018>

Martens DA, Johanson JB, Frankenberger WT. Production and persistence of soil enzymes with repeated addition of organic residues. *Soil Sci.* 1992; 153: 53-61. <https://doi.org/10.1097/00010694-199201000-00008>

Melgar R, Duggan MT, Raggio JB, Poklepovic P, Matorras OL, Octtinger CA. Manual de fertilizantes fluidos: ¿Cómo optimizar el uso de fertilizantes fluidos en Argentina y agro-sistemas sudamericanos. Buenos Aires: Buenos Aires; 2014.

Mulvaney RL, Bremner JM. A modified diacetyl monoxime method for calorimetric determination of urea in soil extracts. *Commun Soil Sci Plan.* 1979; 10: 1163-1170. <https://doi.org/10.1080/00103627909366969>

Nyord T, Søgaard HT, Hansen MN, Jensen LS. Injection methods to reduce ammonia emission from volatile liquid fertilisers applied to growing crops. *Biosyst Eng.* 2008; 100: 235-244. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.01.013>

Pan B, Lam SK, Mosier A, Luo Y, Chen D. Ammonia volatilization from synthetic fertilizers and its mitigation strategies: A global synthesis. *Agr Ecosyst Environ.* 2016; 232: 283–289. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.08.019>

Smith RV, Doyle RM, Burns LC, Stevens RJ. A model for nitrite accumulation in soils. *Soil Biol & Biochem.* 1997; 29: 1241–1247. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(97\)00028-X](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(97)00028-X)

Soares JR, Cantarella H, Menegale MLC. Ammonia volatilization losses from surface-applied urea with urease and nitrification inhibitors. *Soil Biol Biochem.* 2012; 52: 82-89. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.04.019>

Tian Z, Wang JJ, Liu S, Zhang Z, Dodla SK, Myers G. Application effects of coated urea and urease and nitrification inhibitors on ammonia and greenhouse gas emissions from a subtropical cotton field of the Mississippi delta region. *Sci Total Environ.* 2015; 533: 329–338. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2015.06.147>

Tierling J, Kuhlmann H. Emissions of nitrous oxide (N₂O) affected by pH-related nitrite accumulation during nitrification of N fertilizers. *Geoderma.* 2018; 310: 12–21. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2017.08.040>

VanderZaag AC, Jayasundara S, Wagner-Riddle C. Strategies to mitigate nitrous oxide emissions from land applied manure. *Anim Feed Sci Tech.* 2011; 166: 464–479. <https://doi.org/10.1016/j.anifeedsci.2011.04.034>

Yang JE, Skogley E, Schaff B, Kim J. A simple spectrophotometric determination of nitrate in water, resin on soil extracts. *Soil Sci Soc Am J.* 1998; 62: 1108-1115. <https://doi.org/10.2136/sssaj1998.03615995006200040036x>

CAPÍTULO II - UAN COM INIBIDORES DE UREASE E DE NITRIFICAÇÃO: UMA ALTERNATIVA PARA A ADUBAÇÃO NITROGENADA EM PRÉ-SEMEADURA NA CULTURA DO MILHO

Resumo

A adubação nitrogenada fluida com UAN em pré-semeadura possui vantagens operacionais em relação à adubação em cobertura, contudo, as perdas de N podem comprometer a sua eficiência. A combinação do UAN com inibidores de urease e nitrificação pode contribuir para redução destas perdas. Assim, um experimento foi desenvolvido com o objetivo de avaliar o UAN com N-(n-butil) tiofosfórico triamida (NBPT) e, ou dicianodiamida (DCD) na adubação nitrogenada em pré-semeadura na cultura do milho, em sucessão à pastagem. Foram avaliados 20 tratamentos, compostos de acordo com uma matriz Baconiana, considerando-se os fatores: fonte de N (UAN e ureia), inibidores (NBPT e DCD), forma de adubação (pré-semeadura e cobertura), doses de N (0, 50, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹), doses de NBPT (0 e 2 g kg⁻¹) e doses de DCD (1, 2, 3 e 4 g kg⁻¹). A adubação com 100 kg ha⁻¹ N-ureia em cobertura foi o tratamento de referência. Foi avaliado o N acumulado nas plantas até o estágio de V10 e a produtividade de grãos. Nos tratamentos de adubação em pré-semeadura com 100 kg ha⁻¹ de N-ureia ou N-UAN, sem ou com 2 g kg⁻¹ de NBPT e, ou DCD foram avaliadas as emissões de NH₃, N₂O e CO₂ e a lixiviação de NO₃⁻ e NH₄⁺. A adubação em pré-semeadura com UAN_2nbpt_2dcd resultou em produtividade de milho similar à adubação em cobertura com UAN ou ureia sem inibidores. As perdas de NH₃ na adubação com UAN em pré-semeadura variaram de 19 a 35 %, mas tanto o NBPT como o DCD não contribuíram para reduzir estas perdas. No entanto, a adição tanto do NBPT como do DCD reduziu as emissões de N₂O. O NBPT também favoreceu menor emissão de CO₂. De modo geral, a lixiviação de NO₃⁻ não diferiu entre os tratamentos, mas o UAN sem os inibidores apresentou maior lixiviação acumulada de NH₄⁺, que correspondeu a apenas 1,4 % do N adicionado. Conclui-se que: a adubação com UAN é viável para aplicação em pré-semeadura do milho em sucessão à pastagem com preparo do solo; a adição do NBPT e DCD não aumenta a eficiência do UAN aplicado na pré-semeadura do milho; o DCD reduz as emissões de N₂O e o NBPT reduz as emissões de N₂O e CO₂ na adubação com UAN em pré-semeadura.

Palavras chave: Época de adubação, DCD, NBPT, N₂O, NH₃.

Abstract

Liquid nitrogen fertilization with UAN (urea ammonium nitrate) in pre-sowing has operational advantages compared to topdressing; however, N losses may compromise its efficiency. The combination of UAN with urease inhibitors and nitrification could reduce N losses. We conducted an experiment to evaluate UAN with N-(n-butyl) thiophosphoric triamide (NBPT) and, or dicyandiamide (DCD) in pre-sowing N fertilization in maize crop in succession to pasture. We evaluated 20 treatments, composed according to a Baconian matrix, considering the following factors: N source (UAN and urea), inhibitors (NBPT and DCD), fertilization (pre-sowing and topdressing), N rates (0, 50, 100, 150 and 200 kg ha⁻¹), NBPT doses (0 and 2 g kg⁻¹) and DCD doses (1, 2, 3 and 4 g kg⁻¹). Fertilization with 100 kg ha⁻¹ N-urea in topdressing was the control treatment. We evaluated the accumulated N up to the V10 stage and grain yield. In pre-sowing fertilization treatments with 100 kg ha⁻¹ N-urea or N-UAN, without or with 2 g kg⁻¹ of NBPT and, or DCD, we evaluated emissions of NH₃, N₂O and CO₂ and leaching of NO₃⁻ and NH₄⁺. Pre-sowing fertilization with UAN_2nbpt_2dcd resulted in corn yield similar to topdressing fertilization with UAN or urea without inhibitors. NH₃ losses in pre-sowing with UAN fertilization ranged from 19 to 35%, but neither NBPT nor DCD contributed to reducing these losses. However, the addition of both NBPT and DCD reduced N₂O emissions. NBPT also reduced CO₂ emissions. Overall, NO₃⁻ leaching did not differ between treatments; however, UAN without inhibitors showed higher cumulative NH₄⁺ leaching, which corresponded to only 1.4% of the N added. UAN fertilization is viable for corn pre-sowing in succession to pasture tillage. The addition of NBPT and DCD does not increase efficiency of UAN applied to corn pre-seeding. DCD reduces N₂O emissions and NBPT reduces N₂O and CO₂ emissions in pre-sowing with UAN fertilization.

Keywords: Fertilization time, DCD, NBPT, N₂O, NH₃.

1 INTRODUÇÃO

Para reduzir as perdas do N e melhorar o sincronismo entre o suprimento pela fertilização e a demanda das culturas, recomenda-se o parcelamento das doses de N (Silva et al., 2005a; Dieckow et al., 2006). Porém, esta prática tem se tornado inviável em razão da logística operacional nas grandes fazendas e a necessidade de diminuir os custos de produção com a redução das operações com máquinas.

A adubação nitrogenada em pré-semeadura tem vantagens operacionais (Coelho et al., 2002), no entanto, considerando a experiência que se tem com a adubação em cobertura, ela potencializaria as perdas de NH_3 (Lara Cabezas et al., 1997). A consequência é menor absorção do N e, conseqüentemente, menor produtividade (Bortolini et al., 2002; Silva et al., 2005b; Lara Cabezas e Couto, 2007; Sangoi et al., 2007; Santos et al., 2010).

A adubação com fertilizantes fluidos ainda é incipiente no Brasil, mas apresenta potencial de crescimento (Curione, 2018), sobretudo para atender a crescente adoção da adubação em pré-semeadura. Em relação aos fertilizantes sólidos, os fluidos destacam-se pelo menor custo, maior uniformidade de aplicação e versatilidade nas formulações, possibilitando combinar nutrientes, diferentes agroquímicos, além de inibidores de urease e de nitrificação (INPI, 2010; Melgar et al., 2014). Porém, a sua aplicação necessita de equipamentos especiais, o que requer investimento elevado ou a contratação de empresas especializadas, o que é uma tendência natural (Melgar et al., 2014; Silva, 2017).

O UAN (28 - 32 % de N) combinando 14 % de N- NH_2 (ureia), 9 % de N- NO_3^- e 9 % de N- NH_4^+ (NH_4NO_3) é um fertilizante fluido com potencial para atender as condições da adubação em pré-semeadura. Por ter menor concentração de N- NH_2 , o UAN perde menos NH_3 do que a ureia, conforme constataram Costa et al. (2003) em adubação de cana de açúcar e Lara Cabeza et al. (1997) em adubação de cobertura do milho, tanto em cultivo convencional, como em plantio direto. As perdas de N, além de implicar em prejuízo econômico, representam sérios riscos ambientais (Behera et al., 2013; Pan et al., 2016). Além das perdas por NH_3 , têm que ser consideradas as perdas por desnitrificação com emissão de N_2O , que é um importante gás de efeito estufa e ainda as perdas por lixiviação de NO_3^- .

O UAN combinado com inibidores de urease e de nitrificação perde menos N, tornando a adubação nitrogenada mais eficiente (Drury et al., 2017). Dentre os

disponíveis, destacam-se o inibidor de urease N-(n-butil) tiofosfórico triamida (NBPT) e o dicianodiamida (DCD), que inibe a ação das bactérias do gênero *Nitrosomonas*, responsáveis pela primeira fase da nitrificação. Considerando que, ainda há pouca informação sobre o potencial de uso do UAN com inibidores na fertilização nitrogenada em pré-semeadura, o objetivo deste trabalho foi avaliar o UAN com NBPT e, ou DCD para a adubação nitrogenada em pré-semeadura na cultura do milho, em sucessão à pastagem.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O experimento foi realizado em Patos de Minas, Minas Gerais (18°40'10" S e 46°31'53" O) no ano agrícola 2016/2017, em uma área de Latossolo Vermelho com 80 % de argila, que era ocupada com pastagem há cerca de 10 anos. Para a instalação do experimento o solo foi arado e gradeado com arado de disco e grade niveladora. Amostra da camada de 0-0,2 m do solo indicou: pH-H₂O de 5,64; 2,6 mg dm⁻³ de P e 155 mg dm⁻³ de K (ambos em Mehlich-1); 6,4 mg L⁻¹ de P-rem; 2,0 e 0,89 cmol_c dm⁻³ de Ca²⁺ e Mg²⁺, respectivamente, ambos extraídos em KCl 1 mol L⁻¹; 3,6 cmol_c dm⁻³ de H+Al (acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹ pH 7); 34 g kg⁻¹ de matéria orgânica (Walkley-Black); 3,3 e 6,7 cmol_c dm⁻³ de CTC efetiva e a pH 7, respectivamente; V de 49 %. Embora não apresentasse restrições de acidez ativa e trocável, os baixos teores de P disponível e baixa saturação por bases caracterizam condição de baixa produtividade de milho, que são comuns na região para lavouras em substituição a áreas de pastagens.

Os fatores em estudo foram duas fontes de N (UAN e Ureia), o inibidor de urease (NBPT - UBYFOL[®]), o inibidor de nitrificação (DCD 90 %), duas épocas de adubação (pré-semeadura e cobertura), cinco doses de N (0, 50, 100, 150 e 200 kg ha⁻¹), duas doses de NBPT (0 e 2 g kg⁻¹ de fertilizante) e cinco doses de DCD (0, 1, 2, 3 e 4 g kg⁻¹ de fertilizante). Os fatores e doses combinados compuseram 20 tratamentos (Tabela 1) de acordo com uma matriz Baconiana. Para atender as premissas desta matriz foi considerada como referência a dose de 100 kg ha⁻¹ de N, a dose de 2 g kg⁻¹ de NBPT e DCD. A ureia com 2 g kg⁻¹ de NBPT e o UAN com 2 g kg⁻¹ de NBPT e de DCD são fertilizantes disponíveis no mercado. Os tratamentos foram distribuídos de acordo com um delineamento em blocos casualizados com quatro repetições.

Tabela 2. Tratamentos obtidos pela combinação de fontes e doses de N, doses de NBPT e de DCD e época da adubação, de acordo com a estrutura de uma matriz Baconiana

Tratamento	Dose	Dose	Dose	Época da adubação
	N	NBPT	DCD	
	kg ha ⁻¹	----- g kg ⁻¹ -----		
Controle*	0	0	0	-
Ureia_50_0nbpt_0dcd_pre	50	0	0	Pré-semeadura
Ureia_100_0nbpt_0dcd_pre*	100	0	0	Pré-semeadura
Ureia_150_0nbpt_0dcd_pre	150	0	0	Pré-semeadura
Ureia_200_0nbpt_0dcd_pre	200	0	0	Pré-semeadura
Ureia_100_0nbpt_0dcd_cob	100	0	0	Cobertura
Ureia_100_2nbpt_0dcd_pre*	100	2	0	Pré-semeadura
Ureia_100_2nbpt_0dcd_cob	100	2	0	Cobertura
UAN_100_0nbpt_0dcd_pre*	100	0	0	Pré-semeadura
UAN_100_0nbpt_0dcd_cob	100	0	0	Cobertura
UAN_100_2nbpt_0dcd_pre*	100	2	0	Pré-semeadura
UAN_100_0nbpt_2dcd_pre*	100	0	2	Pré-semeadura
UAN_50_2nbpt_2dcd_pre	50	2	2	Pré-semeadura
UAN_100_2nbpt_2dcd_pre*	100	2	2	Pré-semeadura
UAN_150_2nbpt_2dcd_pre	150	2	2	Pré-semeadura
UAN_200_2nbpt_2dcd_pre	200	2	2	Pré-semeadura
UAN_100_2nbpt_1dcd_pre*	100	2	1	Pré-semeadura
UAN_100_2nbpt_3dcd_pre*	100	2	3	Pré-semeadura
UAN_100_2nbpt_4dcd_pre*	100	2	4	Pré-semeadura
UAN_100_2nbpt_2dcd_cob	100	2	2	Cobertura

* Tratamentos nos quais foram avaliadas as emissões de NH₃, N₂O e CO₂ e lixiviação de NH₄⁺ e NO₃⁻.

Cada parcela foi composta por nove linhas de plantio espaçadas em 0,50 m e com 6 m de comprimento, sendo que as cinco linhas centrais compuseram a área útil das parcelas. Em 28/11/2016 (8 d antes do plantio) foram aplicados 150 kg ha⁻¹ P₂O₅ e 30 kg ha⁻¹ de N (MAP), utilizando uma semeadora motorizada, mas sem as sementes, que depositou o adubo no fundo do sulco e marcou as linhas para posterior semeio. A adubação nitrogenada de pré-semeadura com os fertilizantes fluidos e

sólidos específicos de cada tratamento foram distribuídos manualmente e superficialmente na área total de cada parcela seis dias antes do plantio (30/12/2016). O semeio do milho híbrido 30F53YH PIONEER[®] ocorreu em 06/12/2016, com a população de 65,000 plantas ha⁻¹. No semeio foram aplicados 30 kg ha⁻¹ P₂O₅ (super simples), 90 kg ha⁻¹ K₂O (KCl), 3 kg ha⁻¹ B, 6 kg ha⁻¹ Zn. Esta adubação e o semeio foram realizados manualmente, simulando a operação mecanizada.

A adubação nitrogenada de cobertura, tanto dos fertilizantes fluidos como dos sólidos referentes aos tratamentos foi em linha afastada 0,20 m das plantas, 25 dias após a emergência (06/01/2017), com as plantas no estágio de V5.

Os tratos culturais fitossanitários foram realizados com duas aplicações de 0,4 L ha⁻¹ do inseticida Galil[®] em 26/12/2016 e 12/01/2017 e de 0,75 L ha⁻¹ do fungicida Opera[®] em 23/01/2017. O controle das plantas invasoras ocorreu com capina manual (05/01/2017) e a aplicação dos herbicidas Soberan[®] + Atrazina[®] (30/01/2017).

No estágio V10 três plantas nas linhas laterais de cada parcela útil foram cortadas rente ao solo. As plantas foram dissecadas e secas em estufa a 70 °C até peso constante, e obteve-se a massa da matéria seca. Depois de moídas foram analisadas para determinar o teor de N total (Tedesco et al., 1995). Com base no teor de N e a massa da matéria seca foi estimado o conteúdo de N nas plantas. A produtividade do milho foi medida colhendo as espigas das três linhas centrais das parcelas úteis, sendo o peso dos grãos corrigido para 13 % de umidade.

2.1 Emissões de gases e lixiviação

Avaliações das emissões de NH₃, N₂O e CO₂ e lixiviação de NH₄⁺ e NO₃⁻ foram realizadas entre 30/11/2016 e 19/12/2016, período em que as plantas estavam recém-emergidas. Em três blocos nas parcelas dos tratamentos controle e de nove tratamentos com adubação em pré-semeadura, conforme destacados na Tabela 1. As emissões de NH₃, N₂O e CO₂ e a lixiviação de NH₄⁺ e NO₃⁻ foram avaliadas nos tratamentos com a aplicação de 100 kg ha⁻¹ de N na pré-semeadura do milho. Assim, para facilitar a comunicação, os tratamentos serão identificados apenas com a indicação da fonte (ureia ou UAN) e dos inibidores (NBPT e DCD).

Em cada parcela, quatro tubos de PVC com 0,1 m de diâmetro e 0,15 m altura foram inseridos no solo mantendo uma borda de 0,05 m acima da superfície. Estes tubos constituíram as microparcels para as avaliações das emissões gasosas e da

lixiviação. Os tubos ficaram distanciados 0,3 m entre eles e 0,2 m da linha de plantio. Cada tubo recebeu o fertilizante específico ao tratamento, em quantidade proporcional para suprir o equivalente a 100 kg ha⁻¹ de N (78 mg de N). A adubação dos tubos de PVC foi realizada no dia 30/11/2016. A ocorrência de chuva durante estas avaliações é apresentada na Figura 1.

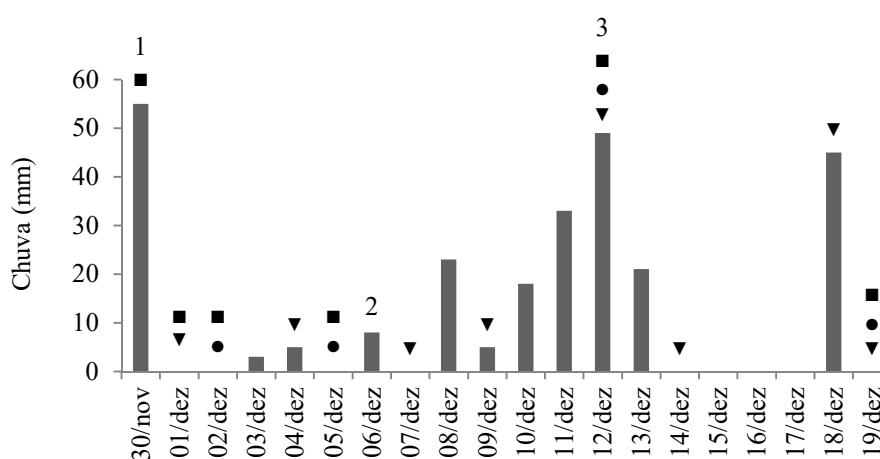


Figura 1. Precipitação de chuva diária entre 30/11/2016 e 19/12/2016, quando correram as avaliações das emissões de NH₃(●), N₂O e CO₂ (■) e lixiviação de NH₄⁺ e NO₃⁻ (▼). Destacando-se os eventos de adubação de pré-semeadura (1), semeio e adubação de plantio (2) e emergência das plantas (3).

Para avaliar a volatilização do NH₃ foram utilizados dois dos tubos de PVC fixados no solo, empregando coletores estáticos confeccionados com garrafas PET com capacidade para 2 L, tendo como unidade coletora de NH₃ fita de espuma de nylon (0,25 x 0,025 x 0,003 m) embebida em H₂SO₄ 1 mol L⁻¹ e glicerina (2 % v/v), conforme descritos por Araújo et al. (2009). Os coletores de NH₃ foram instalados imediatamente após a aplicação dos fertilizantes, acoplando-os a um dos tubos de PVC. As avaliações ocorreram dois, cinco, 12 e 19 d após a aplicação dos fertilizantes. A cada avaliação, as unidades coletoras de NH₃ eram trocadas por outras, e os coletores eram alternados entre os dois tubos de PVC, para evitar a formação de microclima. Assim, as avaliações do 2º e 12º d ocorreram no tubo um e as avaliações do 5º e 19º d ocorreram no tubo dois. No final do dia em que os adubos foram aplicados e se instalou o coletor de NH₃ no primeiro tubo, ocorreu uma chuva de 55 mm (Figura 1). Assim, no 2º tubo que estava sem o coletor, os fertilizantes

foram incorporados ao solo pela água percolada, o que reduziu drasticamente a volatilização de NH_3 nas avaliações do 5º e 19º d. Conseqüentemente, as avaliações do 2º e 12º dia que ocorrera no tubo um, não sofreram influência da chuva. Desta forma, para a interpretação dos resultados foram consideradas duas condições: com chuva (avaliações aos 5º e 19º d) e sem chuva (2º e 12º d). As unidades captadoras de amônia foram conservadas em recipientes plásticos refrigerados até a medição do N por destilação Kjeldahl e titulação ácido-base.

O terceiro tubo de PVC foi utilizado para avaliar as emissões de N_2O e CO_2 . A câmara para acúmulo dos gases foi um cap de PVC com 0,1 m de diâmetro, perfeitamente acoplável ao tubo e contendo um orifício vedado com septo de borracha. As avaliações iniciaram imediatamente após a aplicação dos fertilizantes (tempo zero) e repetidas um, dois, cinco, 12 e 19 d após, sempre entre oito e 11 h. A cada avaliação, foram coletadas amostras do ar imediatamente após a instalação das câmaras (tempo zero) e 15 e 30 min após, para medir os fluxos dos gases. Por meio de seringas acopladas aos septos de borracha foram coletados 10 cm^3 de ar, que foram transferidos para vácuo containers (-80 kPa) e mantidos refrigerados até a determinação das concentrações dos gases por cromatografia gasosa em espectrômetro de massas (GCMS-QP2010 SE – Shimadzu Corporation) (Ekeberg et al., 2004). O fluxo dos gases foi calculado por meio da equação 1:

$$\text{Fluxo de gases (mg m}^{-2} \text{ h}^{-1}) = \frac{\Delta Q}{\Delta t} \times M \times \frac{(P \times V)}{(R \times T)} \times \frac{1}{A} \times 3,6 \quad (1)$$

em que:

$\Delta Q/\Delta t$: coeficiente angular ($\mu\text{L L}^{-1} \text{ s}^{-1}$), obtido do ajuste das concentrações de acordo com o tempo de coleta; M: massa molar do gás (g mol^{-1}); P: pressão (1 atm); V: volume de gás coletado (L); R: constante dos gases (0,08205746); T: temperatura do ar (K) e A: área da câmara (m^2).

Para as emissões de N_2O não foi possível estabelecer o fluxo na maioria das avaliações, assim foi calculado o fluxo médio em 19 d por meio da eq. 1. Para isto, utilizou-se o ΔQ_m que correspondeu à média da concentração de N_2O para cada tempo de amostragem (zero, 15 e 30 min) nas seis avaliações (zero, um, dois, cinco, 12 e 19 d após a adubação). Foram estabelecidos fluxos de CO_2 em cada

amostragem, no entanto para fins de uniformidade também foi estimado o fluxo médio em 19 d.

No quarto tubo foi instalado um coletor de solução do solo, composto por um tubo de PVC de 0,032 m de diâmetro e 0,4 m de comprimento, com uma cápsula porosa em sua extremidade. Para possibilitar o fluxo da solução do solo os coletores receberam vácuo de -33 kPa, com o auxílio de uma bomba de vácuo. As coletas das soluções do solo foram realizadas por meio de seringas em até 24 h após a ocorrência de chuvas. As soluções foram armazenadas em frascos de polietileno e mantidas refrigeradas até análise para determinação dos teores de NH_4^+ (Kempers e Zewers, 1986) e NO_3^- (Cataldo et al., 1975).

Em cada lado da área experimental, no sentido da declividade, foram instaladas três sondas CS616 (Campbell Scientific) nas profundidades de 0,3, 0,4 e 0,5 m. As sondas foram conectadas a dois dataloggers CR1000 (Campbell Scientific) e, posteriormente, foram calibradas em laboratório com amostra indeformada de solo previamente coletada no campo. Assim, determinou-se o teor de água no solo em cada profundidade. Amostras de solo foram levadas ao laboratório para obtenção da curva de retenção de água no solo e da condutividade hidráulica do solo saturado. O potencial mátrico foi calculado por meio da curva de retenção de água, utilizando o ajuste conforme equação de van Genuchten (1980). Em seguida, obteve-se o gradiente de potencial total e a condutividade hidráulica do solo não saturado $K(\theta)$, que foi calculada conforme Mualem (1976). O fluxo de água no solo foi calculado por meio da equação de Darcy-Buckingham (Libardi, 2005), multiplicando a condutividade hidráulica em solo não saturado pelo gradiente de potencial total. Os fluxos de NH_4^+ e NO_3^- foram determinados multiplicando-se as respectivas concentrações na solução do solo pelo fluxo de água, conforme Fernandes et al. (2006).

Os dados foram submetidos à análise de variância, considerando a significância até 10 % para o teste F. Para a análise de variância dos dados de volatilização de NH_3 foram consideradas duas condições: com e sem chuva. As perdas médias de NH_3 em cada condição foram comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,1$). Os dados de fluxo de CO_2 e de lixiviação acumulada de NH_4^+ e NO_3^- foram analisados como medidas repetidas no tempo. Os fluxos médios em 19 d de CO_2 e N_2O foram comparados por meio de contrastes e pelo teste de Dunnett para comparar os fluxos de N_2O e CO_2 de cada tratamento com as fontes de N com o tratamento

controle. Quanto aos lixiviados totais acumulados de NH_4^+ e NO_3^- , os tratamentos foram comparados pelo teste de Tukey ($p < 0,1$).

3 RESULTADOS

A produtividade média de $5,45 \text{ t ha}^{-1}$ dos tratamentos com adubação nitrogenada (Tabela 2), é compatível com as condições gerais da fertilidade do solo, sobretudo o baixo teor de P disponível. Os tratamentos adubados com 100 kg ha^{-1} de N resultaram em maior absorção de N pelas plantas e com produtividade média ($5,69 \text{ t ha}^{-1}$) significativamente superior ao tratamento controle ($3,59 \text{ t ha}^{-1}$) (Tabela 2 e Tabela 3, contraste 1). O conteúdo médio de N nas plantas para os tratamentos com UAN ($110,3 \text{ kg ha}^{-1}$) foi superior ao dos tratamentos com ureia ($109,2 \text{ kg ha}^{-1}$), embora, em média, não tenha diferido quanto à produtividade do milho (Tabela 3). Contudo, não houve aumento significativo na produtividade do milho com o incremento das doses de N aplicadas em pré-semeadura, tanto com ureia sem inibidores (Ureia_100_0nbpt_0dcd_pre) com UAN com inibidores (UAN_100_2nbpt_2dcd_pre) (Tabela 3).

Tabela 2. Médias do conteúdo de N nas plantas no estágio de V10 e da produtividade de grãos de milho

Tratamento	Conteúdo	Produção
	kg ha ⁻¹	t ha ⁻¹
Controle	87,1	3,59
Ureia_50_0nbpt_0dcd_pre	119,6	4,51
Ureia_100_0nbpt_0dcd_pre	121,5	4,77
Ureia_150_0nbpt_0dcd_pre	122,2	5,34
Ureia_200_0nbpt_0dcd_pre	103,3	4,01
Ureia_100_0nbpt_0dcd_cob	96,8	6,34
Ureia_100_2nbpt_0dcd_pre	117,6	4,48
Ureia_100_2nbpt_0dcd_cob	91,0	6,23
UAN_100_0nbpt_0dcd_pre	108,5	6,02
UAN_100_0nbpt_0dcd_cob	107,9	6,55
UAN_100_2nbpt_0dcd_pre	117,0	5,84
UAN_100_0nbpt_2dcd_pre	126,1	5,49
UAN_50_2nbpt_2dcd_pre	104,0	5,17
UAN_100_2nbpt_2dcd_pre	99,4	4,98
UAN_150_2nbpt_2dcd_pre	94,2	5,04
UAN_200_2nbpt_2dcd_pre	98,8	5,48
UAN_100_2nbpt_1dcd_pre	130,6	5,38
UAN_100_2nbpt_3dcd_pre	111,8	5,80
UAN_100_2nbpt_4dcd_pre	103,3	5,17
UAN_100_2nbpt_2dcd_cob	111,1	6,89
Média dos tratamentos com adubação	109,7	5,45

Tabela 3. Quadrados médios para os efeitos principais dos fatores em estudo e para alguns desdobramentos e 11 contrastes de interesse com as respectivas significâncias, para o conteúdo de N nas plantas no estágio de V10 e a produtividade de grãos de milho

Fatores / desdobramentos / contrastes	GL	Quadrado Médio	
		Conteúdo	Produtividade
Bloco	3	1052 *	6,4 *
Tratamento	(19)	593 *	2,8 ns
Fonte de N	1	1999 **	1,6 ns
Doses de N dentro de:			
Ureia_0nbpt_0dcd_pre	4	942 *	1,8 ns
UAN_2nbpt_2dcd_pre	4	1644 ns	2,1 ns
Doses de DCD dentro de			
UAN_100_2nbpt_pre	3	764 *	0,5 ns
Época da adubação dentro de:			
Ureia_100_0nbpt_0dcd	1	1261 *	4,9 ns
Ureia_100_2nbpt_0dcd	1	1482 *	6,2 °
UAN_100_0nbpt_0dcd	1	0,72 ns	0,6 ns
UAN_100_2nbpt_2dcd	1	282 ns	7,3 °
1: Controle vs Efeito médio da dose 100	1	1131 *	8,5 °
2: UAN_100_0nbpt_0dcd_pre vs UAN_100_2nbpt_0dcd_pre	1	139 ns	0,06 ns
3: UAN_100_0nbpt_0dcd_pre vs UAN_100_0nbpt_2dcd_pre	1	603 ns	0,5 ns
4: UAN_100_2nbpt_0dcd_pre vs UAN_100_0nbpt_2dcd_pre	1	163 ns	0,2 ns
5: UAN_100_0nbpt_0dcd_pre vs UAN_100_2nbpt_2dcd_pre	1	167 ns	2,1 ns
6: UAN_100_0nbpt_0dcd_cob vs UAN_100_2nbpt_2dcd_cob	1	22,1 ns	0,2 ns
7: Ureia_100_0nbpt_0dcd_pre vs Ureia_100_2nbpt_0dcd_pre	1	28,3 ns	0,2 ns
8: Ureia_100_0nbpt_0dcd_cob vs Ureia_100_2nbpt_0dcd_cob	1	68,9 ns	0,02 ns
9: Ureia_100_2nbpt_0dcd_pre vs Ureia_100_0nbpt_0dcd_cob	1	911 °	6,9 °
10: UAN_100_2nbpt_2dcd_pre vs UAN_100_0nbpt_0dcd_cob	1	146 ns	4,9 ns
11: UAN_100_2nbpt_2dcd_pre vs Ureia_100_0nbpt_0dcd_cob	1	15,6 ns	3,7 ns
Resíduo	57	260	2,1
Total	79		
CV (%)		15	27

ns, °, *, **, não significativo e significativo a 10, 5 e 1 %, respectivamente, pelo teste F.

Os inibidores NBPT e, ou DCD adicionados ao UAN não influenciaram no conteúdo de N nas plantas nem na produtividade do milho, independentemente da época da adubação (Tabela 3, contrastes 2 a 6). Resultado semelhante também foi

observado para a adubação com a ureia tratada com NBPT (Tabela 3, contrastes 7 e 8).

A adubação nitrogenada em cobertura e em pré-semeadura com ureia ou UAN sem inibidores (Ureia_100_0nbpt_0dcd ou UAN_100_0nbpt_0dcd) propiciou produtividades de milho equivalentes (Tabelas 2 e 3). Contudo, a produtividade foi significativamente maior (39 %) na adubação em cobertura quando se utilizou tanto a ureia como o UAN com os inibidores (Ureia_100_2nbpt_0dcd ou UAN_100_2nbpt_2dcd).

A produtividade do milho adubado em pré-semeadura com UAN com inibidores (UAN_100_2nbpt_2dcd_pre) não diferiu da adubação em cobertura, seja com o UAN ou ureia sem inibidores (Tabela 3, contrastes 10 e 11). No entanto, a produtividade do milho adubado com a ureia em cobertura foi significativamente maior do que a obtida com a adubação com ureia com NBPT em pré-semeadura (Tabela 3, contraste 9).

Embora a produtividade do milho não tenha sido afetada pelo aumento das doses do DCD no UAN (Tabela 3), verificou-se redução significativa no conteúdo de N nas plantas (Figura 2).

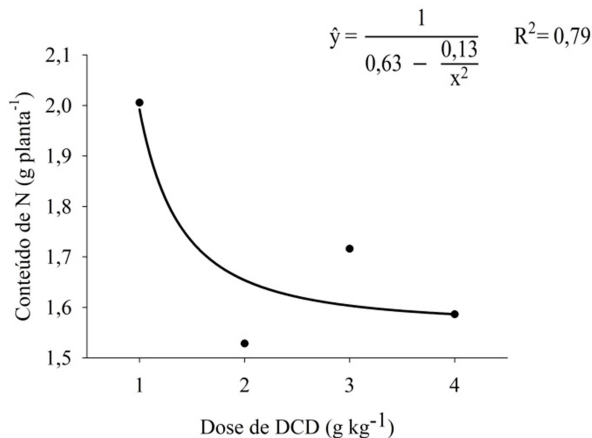
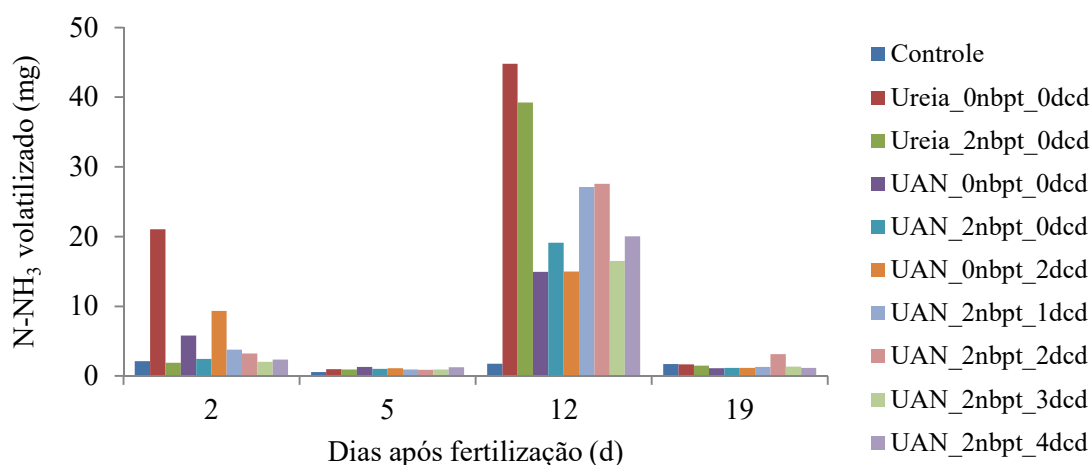


Figura 2. Conteúdo de N nas plantas de milho no estágio V10 em função das doses de DCD adicionado ao UAN com NBPT.

3.1 Emissões de gases e lixiviação

As avaliações do 2º e 12º dia foram realizadas no tubo que recebeu o coletor de NH₃ logo após a adubação evitando a ação de uma chuva de 55 mm (Figura 1). Assim, os fertilizantes foram mantidos na superfície do solo o que justifica as maiores quantidades de NH₃ volatilizada (Figura 3a).

(a)



(b)

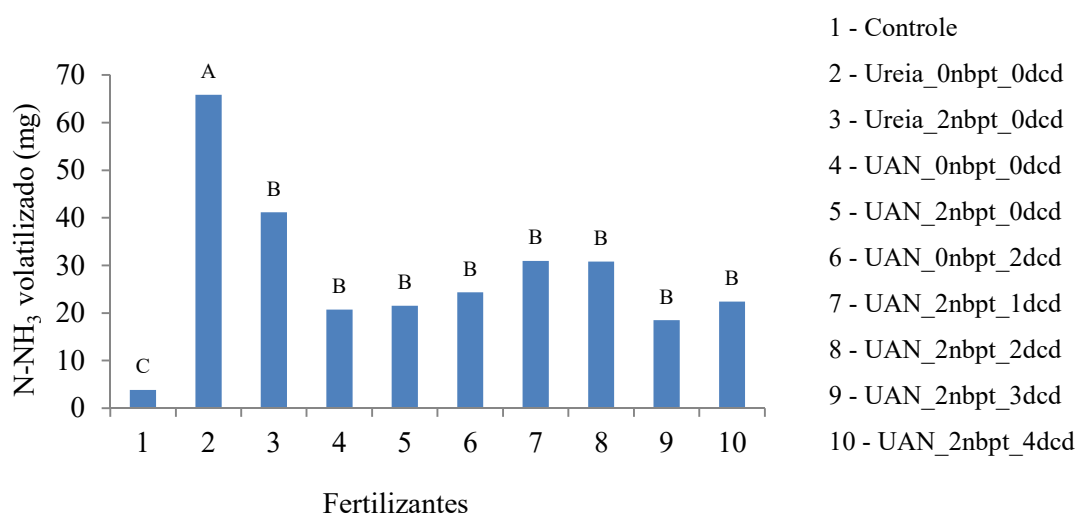


Figura 3. N-NH₃ volatilizado em cada coleta (a) e acumulado em duas coletas sem influência da chuva (2° e 12° d após a adubação) com a aplicação de 100 kg ha⁻¹ de N em pré-semeadura do milho (b). As barras com letras diferentes indicam diferença significativa pelo teste de Tukey ($p < 0,1$).

As menores volatilizações no 5° e 19° dia após a fertilização (Figura 3a) devem-se à incorporação dos fertilizantes no solo pela ação da chuva.

A quantidade acumulada de NH₃ volatilizada nas duas avaliações (2° e 12° d após a adubação) a partir da ureia (Ureia_0nbpt_0dcd) foi de 65,9 mg N-NH₃, ou seja 81 % do N aplicado. A adição do NBPT à ureia (Ureia_2nbpt_0dcd) reduziu

significativamente (38 %) a perda de NH_3 . As quantidades acumuladas de NH_3 volatilizada no 2º e 12º d, a partir do UAN, com ou sem inibidores (NBPT e DCD), foram significativamente menores (Figura 3b). Estas perdas corresponderam de 19 a 35 % do N aplicado. Na avaliação do 2º d após a adubação o NBPT foi eficaz para reduzir a volatilização, tanto pela ureia como pelo UAN, enquanto que na avaliação do 12º d ele foi menos eficaz (Figura 3a).

A emissão média de N_2O do solo fertilizado com UAN (UAN_0nbpt_0dcd) foi 2,7 vezes maior do que a emissão do tratamento controle (Dunnett, $p < 0,1$) (Figura 4). Com a adição do NBPT ou DCD ao UAN as emissões médias de N_2O reduziram em 71 e 58 %, respectivamente, embora não tenham sido estatisticamente significativas (Tabela 4, contraste 1). No entanto, incrementos nas doses de DCD não influenciaram na redução da emissão média de N_2O . Por outro lado, o UAN com NBPT e DCD (UAN_2nbpt_2dcd) causou redução significativa (59 %) na emissão de N_2O (Tabela 4, contraste 3).

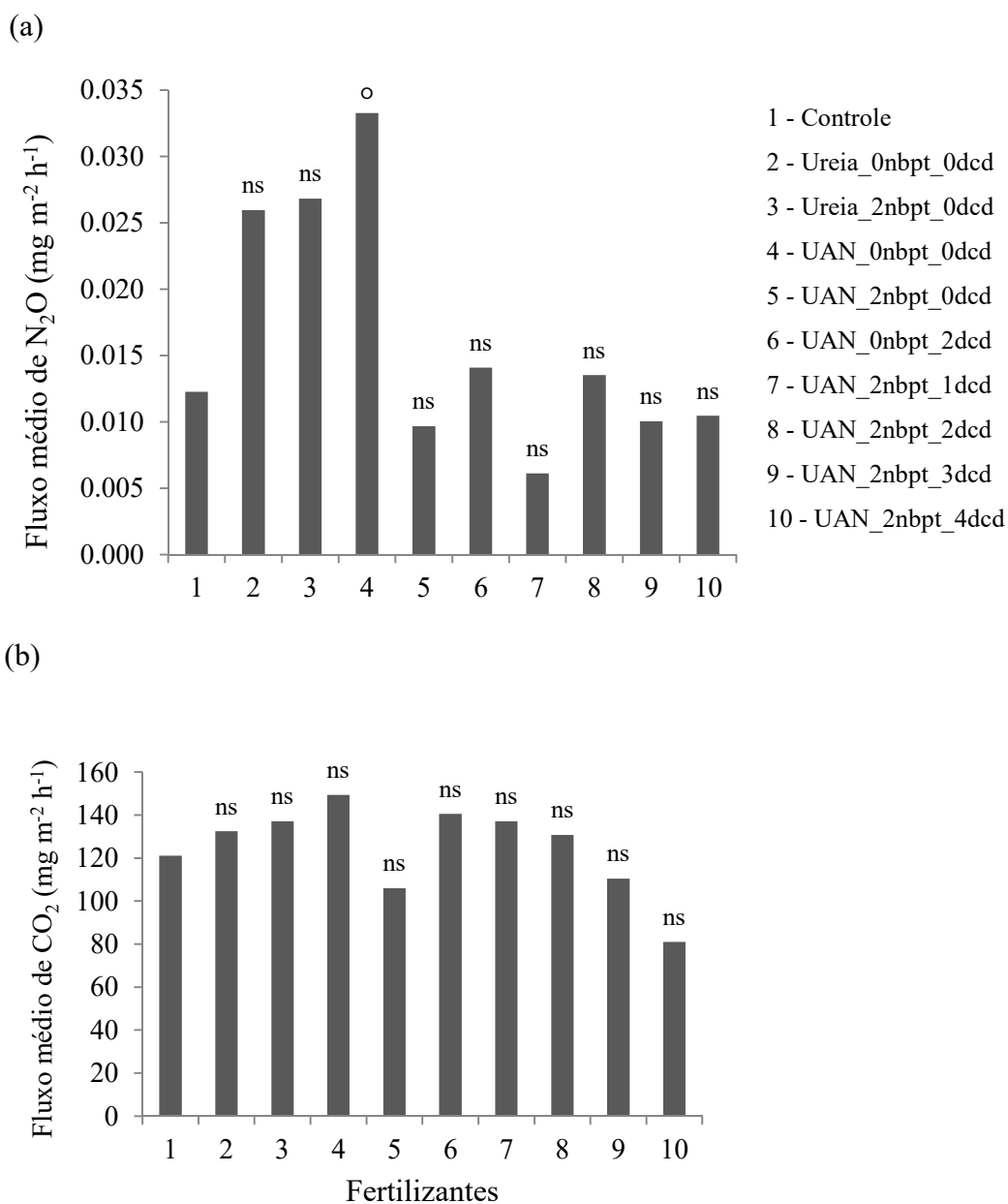


Figura 4. Fluxo médio em 19 d de N₂O (a) e CO₂ (b) com aplicação de 100 kg ha⁻¹ em pré-semeadura do milho. ns, ° = não significativo e significativo a 10 % pelo teste de Dunnett ao comparar cada tratamento com o controle.

Tabela 4. Quadrados médios para os efeitos principais dos fatores e alguns desdobramentos e para três contrastes de interesse com as respectivas significâncias, para fluxo médio de N₂O e CO₂ durante os 19 dias após a aplicação de 100 kg ha⁻¹ de N em pré-semeadura do milho

Efeito / desdobramento / contraste	GL	QM	
		N ₂ O	CO ₂
Bloco	2	0,00009 ns	853,5 ns
Tratamento	(9)	0,0002 °	1244,1 °
Doses de DCD dentro de:			
UAN_2nbpt	3	0,00002 ns	1906,1 *
Inibidor dentro de fonte de N			
nbpt d/Ureia	1	0,000001 ns	32,1 ns
nbpt d/UAN	1	0,0008 **	2816,9 *
dcd d/UAN	1	0,0003 °	114,2 ns
1: UAN_2nbpt_0dcd vs UAN_0nbpt_2dcd	1	0,0001 ns	1796,9 °
2: UAN_0nbpt_0dcd vs Ureia_0nbpt_0dcd	1	0,00008 ns	425,7 ns
3: UAN_0nbpt_0dcd vs UAN_2nbpt_2dcd	1	0,0006 *	518,2 ns
Resíduo	18	0,00008	596,3
Total	29		
CV (%)		48	20

ns, °, *, **, não significativo e significativo a 10, 5 e 1 %, respectivamente, pelo teste F.

Os fluxos de CO₂ do solo nos tratamentos controle, UAN_2nbpt_2dcd e UAN_2nbpt_4dcd não se alteraram durante o período de avaliação, e corresponderam, em média, a 121, 130 e 81 mg m⁻² h⁻¹ de CO₂, respectivamente. Para os demais tratamentos ocorreram dois picos no fluxo de CO₂ no 1º dia e no 12º dia após a adubação (Figura 5). No entanto, considerando-se o fluxo médio nos 19 d, as diferentes composições dos fertilizantes nitrogenados não proporcionaram fluxo médio de CO₂ maiores do que aqueles verificados no tratamento controle (Dunnett, p < 0,1) (Figura 4). Por outro lado, a adição do NBPT ao UAN favoreceu redução significativa (29 %) no fluxo médio de CO₂ (Figura 4, Tabela 4). Além disso, incremento nas doses do DCD associadas com o NBPT proporcionou redução significativa no fluxo médio de CO₂ (Tabela 4, Figura 6).

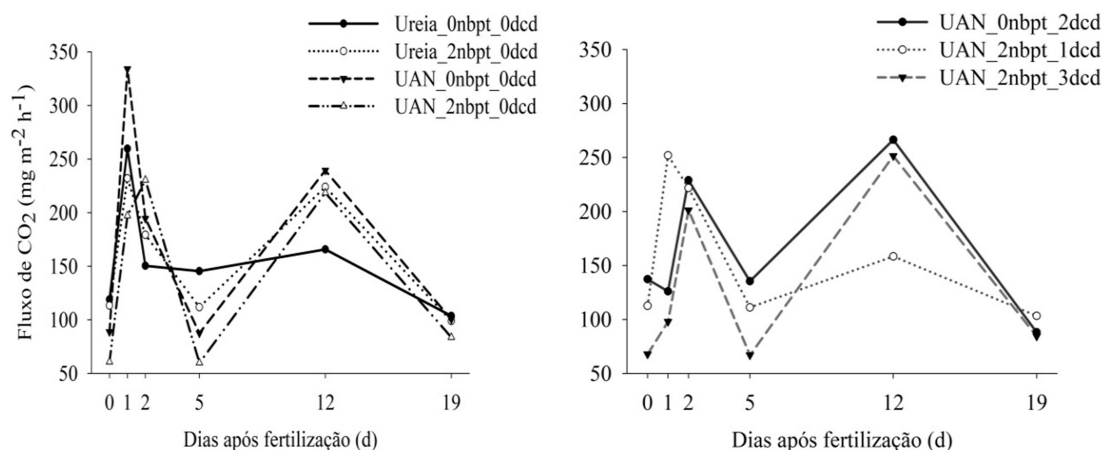


Figura 5. Fluxos de CO₂ do solo em 19 d desde a aplicação de 100 kg ha⁻¹ de N em pré-semeadura do milho.

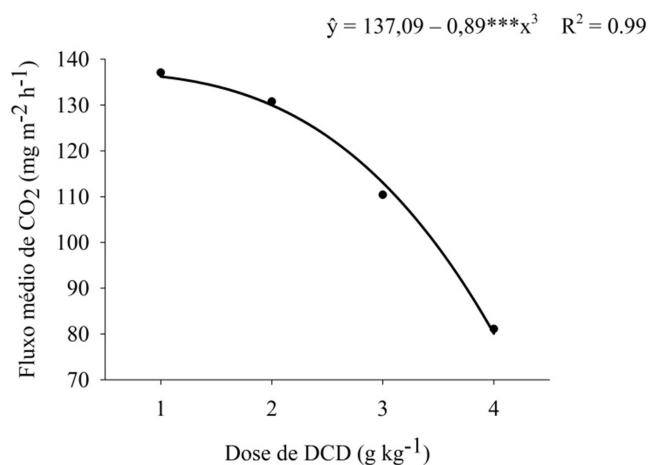
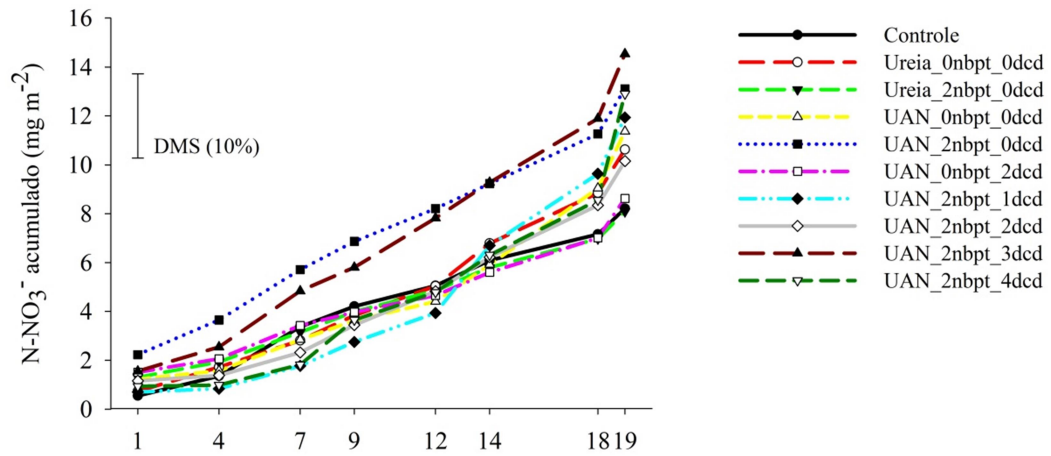


Figura 6. Fluxo médio de CO₂ em função das doses de DCD adicionadas ao UAN com NBPT, com a aplicação de 100 kg ha⁻¹ de N em pré-semeadura do milho.

A lixiviação do NO₃⁻ foi mais intensa do que a de NH₄⁺ (Figura 7). De modo geral, os tratamentos que receberam 100 kg ha⁻¹ de N apresentaram lixiviação acumulada de NO₃⁻ similar ao tratamento controle (Tukey, $p < 0,1$). A lixiviação acumulada até 19 d após a adubação, foi, em média, de 11,25 mg m⁻² de N-NO₃⁻.

No primeiro dia após a adubação, a lixiviação de NH₄⁺ foi intensa para todos os fertilizantes. No entanto, a lixiviação acumulada de NH₄⁺ aumentou ao longo dos 19 dias somente nos tratamentos UAN_0nbpt_0dcd, UAN_0nbpt_2dcd e UAN_2nbpt_2dcd (Figura 7a). Todavia, aos 19 dias após a adubação apenas o UAN

(a)



(b)

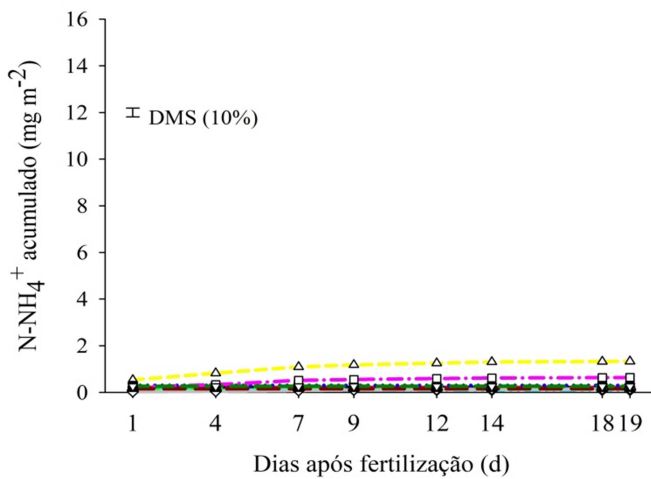


Figura 7. Lixiviação acumulada de NO_3^- (a) e NH_4^+ (b) em 19 d desde a aplicação de 100 kg ha^{-1} de N em pré-semeadura do milho. Diferença mínima significativa (DMS) pelo teste de tukey ($p < 0,1$).

sem inibidores (UAN_0nbpt_0dcd) apresentou lixiviação acumulada de NH_4^+ ($1,33 \text{ mg m}^{-2}$) significativamente maior (tukey $p < 0,1$), correspondendo a 1,4 % do N adicionado.

4 DISCUSSÃO

As condições de fertilidade do solo, sobretudo a baixa disponibilidade de P, ainda que tenham sido aplicados 180 kg ha^{-1} de P_2O_5 , limitou a produtividade média do milho ($5,45 \text{ t ha}^{-1}$) e, seguramente, restringiu o efeito da adubação nitrogenada à dose de 100 kg ha^{-1} , independente da aplicação em pré-semeadura ou em cobertura. Em solos com baixa disponibilidade e elevado fator capacidade de P a aplicação do fertilizante fosfatado localizada no sulco de plantio não é suficiente para atender a demanda de P do milho, além de limitar a absorção de N, sobretudo na forma nítrica (Novais e Smyth, 1999).

A adubação em pré-semeadura com 100 kg ha^{-1} de N como UAN ou ureia sem inibidores resultaram em produtividades equivalentes àquela alcançada com adubação em cobertura. Este não efeito da época da adubação é atribuído à incorporação do N aplicado em pré-semeadura devido à chuva de 55 mm ocorrida imediatamente após a adubação. Com esta incorporação minimizou-se a volatilização de NH_3 , que compensou o melhor sincronismo entre o suprimento e a demanda de N das plantas na adubação de cobertura. Porém, a produtividade de milho foi maior com a adubação de cobertura quando as fontes de N foram o UAN_2nbpt_2dcd ou Ureia_2nbpt. Com isto, fica evidente a importância dos inibidores para preservação do N e assegurar melhor sincronismo entre o fornecimento e a demanda de N pelas plantas, quando a adubação ocorre em condições desfavoráveis, como a não ocorrência de chuva (Cantarella, 2007).

As equivalências entre as produtividades do milho adubado com UAN_2nbpt_2dcd em pré-semeadura e com o UAN em cobertura não evidenciam a importância da adição dos inibidores para a adubação em pré-semeadura, o que, no entanto, pode ser atribuído ao efeito da chuva incorporando o fertilizante fluido no solo. Por outro lado, a menor produtividade com Ureia_2nbpt_0dcd em pré-semeadura em relação à ureia em cobertura, indica que a adição do NBPT não é suficiente para viabilizar o uso da ureia na adubação em pré-semeadura.

A redução no conteúdo de N nas plantas com o aumento das doses de DCD adicionadas ao UAN pode ser atribuída ao efeito fitotóxico do inibidor, que é relatado por outros autores (Reddy, 1964; Reeves e Touchton, 1986; Zerulla et al., 2001; Macadam et al., 2003). Os sintomas de fitotoxicidade não foram observados quando se utilizou o 3,4-dimetilpirazol fosfato (DMPP), sugerindo que esse efeito se

deve à absorção do DCD. Segundo estes autores, os sintomas da fitotoxidez (clorose e necrose das bordas das folhas) ocorreram com alta dose de DCD (48 kg ha^{-1}), que é muito superior à maior dose utilizada neste experimento (equivalente a $1,34 \text{ kg ha}^{-1}$). No entanto, desequilíbrio nutricional e redução na produção de matéria seca pelo milho, algodão, tomate e trigo foram observados com menor dose de DCD ($4,9 \text{ kg ha}^{-1}$), que ainda assim, é superior às utilizadas neste experimento.

As menores emissões de NH_3 nas avaliações que ocorreram na microparcela que ficou sujeita à ação da chuva evidenciam a sua importância para a incorporação do N no solo na adubação em pré-semeadura. Na microparcela não influenciada pela chuva, além da elevada volatilização de NH_3 , ficou evidente a importância do NBPT para reduzir a perda de N da ureia. Há relatos de que ureia aplicada em superfície pode apresentar perdas de NH_3 equivalentes a 78 % do N aplicado (Lara Cabezas et al., 1997).

O UAN apresentou menores perdas de NH_3 do que a ureia, mesmo sem adição do NBPT. Isso se deve à menor concentração de N potencialmente volatilizável (14 % de N-NH_2 + 9 % de N-NH_4^+) nesse fertilizante. Além disso, a aplicação em jato pressurizado aprofunda o fertilizante fluido alguns milímetros no solo, fazendo com que a hidrólise da ureia ocorra no espaço poroso do solo, o que propicia a adsorção do NH_4^+ e reduz as perdas de NH_3 (Nyord et al., 2008).

O menor efeito benéfico do NBPT na perda de NH_3 do UAN do que da ureia pode ser atribuído ao menor teor de N potencialmente volatilizável no UAN. Porém, mesmo que o NBPT não influencie na quantidade volatilizada ele retarda o pico de volatilização de NH_3 do UAN (Soares, et al. 2012; Forrestal et al., 2015). Contudo, deve-se considerar que o período de ação do inibidor varia de três a 14 d, dependendo das condições de temperatura e umidade do solo (Cantarella, 2007).

Há relatos de que o inibidor de nitrificação DCD possa elevar a volatilização de NH_3 (Fox e Bandel, 1989; Zaman et al., 2009; Soares et al., 2012), assim como não causar nenhum efeito (Kim et al., 2012; Forrestal et al., 2015; Recio et al., 2018). Nas nossas condições, a adição do inibidor de nitrificação ao UAN, com ou sem NBPT, não influenciou nas perdas de N-NH_3 . O DCD bloqueia a oxidação do NH_4^+ a NO_2^- , o que pode resultar em maiores concentrações de NH_4^+ no solo por mais tempo, que em condições de pH elevado, será convertido a NH_3 . A inibição da nitrificação pode, ainda, prolongar o pico de pH ocasionado pela hidrólise da ureia, aumentando o período de emissão de NH_3 (Fox e Bandel, 1989).

Apenas a adubação em pré-semeadura (100 kg ha⁻¹ de N) com o UAN sem inibidores elevou os fluxos de N₂O acima da emissão basal do solo (tratamento controle). A emissão de 0,033 mg m⁻² h⁻¹ de N₂O, que corresponde à 1,84 kg ha⁻¹ ano⁻¹ de N-N₂O foi superior à faixa de emissão relatada em estudos para solos de cerrado, que é de -0,09 e 1,19 kg ha⁻¹ ano⁻¹ (Meurer et al., 2016). Há relatos de que as diferentes formulações dos fertilizantes afetam as emissões de N₂O (Bouwman et al., 2002), com maiores emissões ocorrendo em fertilizantes mistos, que fornecem NH₄⁺, NO₃⁻ e ureia (Harty et al., 2016).

Contudo, na adubação com UAN com NBPT e, ou DCD as emissões de N₂O foram equivalentes à emissão basal do solo. A menor emissão com a adição do DCD pode ser atribuída à sua ação sobre a amônia monooxigenase, enzima responsável pela primeira fase da nitrificação (Sanz-Cobena et al., 2011; Huérfano et al., 2016; Cayuela et al., 2017). O efeito do NBPT não é devidamente esclarecido, mas, geralmente, há redução nas emissões (Sanz-Cobena et al., 2012; Feng et al., 2016; Guardia et al., 2017). No entanto, há relatos de resultados contrastantes (Fan et al., 2018), assim como de pequenos aumentos nas emissões de N₂O (Weller et al., 2019). A interação entre o NBPT e DCD também apresenta resultados contrastantes, o NBPT tanto pode incrementar (Sanz-Cobena et al., 2011; Ni et al., 2018) como reduzir o efeito do DCD nas emissões de N₂O (Zhao et al., 2017).

A emissão basal de CO₂, que reflete a atividade microbiana do solo, manteve-se estável entre as avaliações, evidenciando pouco efeito das chuvas ocorridas no período. No entanto, a emissão basal média de 121 mg m⁻² h⁻¹ de CO₂ reflete o efeito da aração e gradagem, porque se aproxima da emissão de 150 mg m⁻² h⁻¹ obtida após a subsolagem do solo (Fialho et al., 2018). Apesar do preparo ter incorporado os resíduos da pastagem ao solo, o aumento da emissão de CO₂ deve-se à melhor aeração do solo e à exposição de matéria orgânica protegida no interior dos agregados do solo, o que é mais acentuado em solos argilosos (Zinn et al., 2005; Mikutta et al., 2006; Kögel-Knabner et al., 2008). Em solos com relação C/N mais elevada, que é usual em pastagens, a adição de N estimula a mineralização e conseqüentemente a emissão de CO₂ (Fontaine et al., 2003; Pegoraro et al., 2011), o que não foi verificado nas condições do experimento, considerando-se a emissão média. No entanto, de modo geral, o efeito da adubação nitrogenada se fez notar considerando-se as emissões de CO₂ nas avaliações que ocorreram sob influência de chuvas. A redução na emissão de CO₂ com o aumento da dose de DCD no

UAN_2nbpt_dcd, que também foi constatada por Weiske et al. (2001) pode ser uma redução na atividade microbiana. Estes autores observaram redução de 7 e 28 % nas emissões de CO₂ do solo fertilizado com a aplicação da mistura sulfato de amônio-nitrato com DCD ou DMPP, respectivamente. Quando os inibidores foram aplicados ao solo não fertilizado as emissões de CO₂ foram reduzidas em 10 e 29 % para o DCD e DMPP, respectivamente.

A lixiviação mais intensa do NO₃⁻ deve-se a menor interação do ânion com o complexo sortivo do solo, ainda que, o solo possa ter maior densidade de cargas positivas devido à natureza caulínica e oxídica de sua fração argila (Cantarella, 2007). A lixiviação mais acentuada do NH₄⁺ imediatamente após a adubação é explicada pelo volume de chuva que ocorreu logo após a adubação e a rápida e intensa infiltração da água, considerando que o solo estava recém-preparado. A lixiviação de amônio não representa risco de perdas significativas de N, devido à sua adsorção pela CTC do solo. Ainda que o UAN tenha propiciado perda de NH₄⁺ equivalente a apenas 1,4 % do N aplicado, lixiviação menos expressiva ocorreu nas formulações com os inibidores.

5 CONCLUSÕES

A adubação com UAN é viável para aplicação em pré-semeadura do milho em sucessão à pastagem com preparo do solo.

O DCD reduz as emissões de N₂O e o NBPT reduz as emissões de N₂O e CO₂ na adubação com UAN em pré-semeadura.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

Araújo ES, Marsola T, Miyazawam M, Soares LHB, Urquiaga S, Boddey RM, Alves BJR. Calibração de câmara semiaberta estática para quantificação de amônia volatilizada do solo. *Pesqui Agropecu Bras.* 2009; 44: 769-776. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-204X2009000700018>

Behera SN, Sharma M, Aneja VP, Balasubramanian R. Ammonia in the atmosphere: a review on emission sources, atmospheric chemistry and deposition on terrestrial bodies. *Environ Sci Pollut R.* 2013; 20: 8092–8131. <https://doi.org/10.1007/s11356-013-2051-9>

Bortolini CG, Silva PRF, Argenta G, Forsthofer EL. Sistemas de aplicação de nitrogênio e seus efeitos sobre o acúmulo de N na planta de milho. *Rev Bras Cienc Solo.* 2002; 26: 361-366. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832002000200009>

Bouwman AF, Boumans LJM, Batjes NH. Emissions of N₂O and NO from fertilized fields: Summary of available measurement data. *Global Biogeochem Cy.* 2002; 16: 1-13. <https://doi.org/10.1029/2001GB001811>

Cantarella H. Nitrogênio. In: Novais RF, Alvarez V. VH, Cantarutti RB, Neves JCL, editors. *Fertilidade do solo*. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo; 2007. p.375-470.

Cataldo DA, Maroon M, Schrader LE, Youngs VL. Rapid colorimetric determination of nitrate in plant tissue by nitrate of salicylaty. *Commun Soil Sci Plan.* 1975; 6: 71–80. <https://doi.org/10.1080/00103627509366547>

Cayuela ML, Aguilera E, Sanz-Cobena A, Adams DC, Abalos D, Barton L, Ryals R, Silver WL, Alfaro MA, Pappa VA, Smith P, Garnier J, Billen G, Bouwman L, Bondeau A, Lassaletta L. Direct nitrous oxide emissions in Mediterranean climate cropping systems: Emission factors based on a meta-analysis of available measurement data. *Agr Ecosyst Environ.* 2017; 238: 25–35. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.10.006>

Coelho AM, Cruz JC, Filho IAP. Rendimento do milho no Brasil: Chegamos ao máximo. In: III Simpósio de Rotação Soja/Milho no Plantio Direto; 10/07/2002; Piracicaba, Brasil. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz; 2002. p. 1-12.

Costa MCG, Vitti GC, Cantarella H. Volatilização de N-NH₃ de fontes nitrogenadas em cana-de-açúcar colhida sem despalha a fogo. *Rev Bras Cienc Solo.* 2003; 27: 631-637. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832003000400007>

Curione R. Fluid fertilizer Brazil; 2018 [cited 2019 July 12]. Available from: http://www.stab.org.br/palestras_irrigacao_2018/ricardo_yara.pdf

Dieckow J, Meurer EJ, Salet RL. Nitrogen application timing and soil inorganic nitrogen dynamics under no-till oat/maize sequential cropping. *Rev Bras Cienc Solo*. 2006; 30: 707-714. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832006000400011>

Drury CF, Yang X, Reynolds WD, Calder W, Oloya TO, Woodley AL. Combining urease and nitrification inhibitors with incorporation reduces ammonia and nitrous oxide emissions and increases corn yields. *J Environ Qual*. 2017; 46: 939–949. <https://doi.org/10.2134/jeq2017.03.0106>

Ekeberg D, Ognér G, Fongén M, Joner EJ, Wickström T. Determination of CH₄, CO₂ and N₂O in air samples and soil atmosphere by gas chromatography mass spectrometry, GC-MS. *J Environ Monit*. 2004; 6: 621–623. <https://doi.org/10.1039/b401315h>

Fan X, Yin C, Yan G, Cui P, Shen Q, Wang Q, Chen H, Zang N, Ye M, Zhao Y, Li T, Lizng Y. The contrasting effects of N-(n-butyl) thiophosphoric triamide (NBPT) on N₂O emissions in arable soils differing in pH are underlain by complex microbial mechanisms. *Sci Total Environ*. 2018; 642: 155–167. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.05.356>

Feng J, Li F, Deng A, Feng X, Fang F, Zhang W. Integrated assessment of the impact of enhanced-efficiency nitrogen fertilizer on N₂O emission and crop yield. *Agr Ecosyst Environ*. 2016; 231: 218–228. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.06.038>

Fernandes FCS, Libardi PL, Carvalho LA. Internal Drainage and nitrate leaching in corn-black oat-corn succession with two split nitrogen applications. *Sci Agric*. 2006; 63: 483-492. <http://dx.doi.org/10.1590/S0103-90162006000500011>

Fialho RC, Teixeira RS, Teixeira AP, Silva IR. Short-term carbon emissions: Effect of various tree harvesting, transport, and tillage methods under a eucalyptus plantation. *Land Degrad Dev*. 2018; 29: 3995-4004. <https://doi.org/10.1002/ldr.3161>

Fontaine S, Mariotti A, Abbadie L. The priming effect of organic matter: A question of microbial competition? *Soil Biol Biochem*. 2003; 35: 837–843. [https://doi.org/10.1016/S0038-0717\(03\)00123-8](https://doi.org/10.1016/S0038-0717(03)00123-8)

Forrestal PJ, Harty M, Carolan R, Lanigan GJ, Watson CJ, Laughlin RJ, McNeill G, Chambers B, Richards KG. Ammonia emissions from urea, stabilised urea and calcium ammonium nitrate: insights into loss abatement in temperate grassland. *Soil Use Manage*. 2015; 32: 92-100. <https://doi.org/10.1111/sum.12232>

Fox RH, Bandel VA. Dicyandiamide (DCD) research in agriculture in the mid-Atlantic region. *Commun Soil Sci Plan*. 1989; 20: 1957–1968. <https://doi.org/10.1080/00103628909368196>

Guardia G, Cangani MT, Andreu G, Sanz-Cobena A, García-Marco S, Álvarez JM, Recio-Huetos J, Vallejo A. Effect of inhibitors and fertigation strategies on GHG emissions, NO fluxes and yield in irrigated maize. *Field Crop Res*. 2017; 204: 135–145. <https://doi.org/10.1016/j.fcr.2017.01.009>

Harty MA, Forrester PJ, Watson CJ, McGeough KL, Carolan C, Elliot C, Krol D, Laughlin RJ, Richards KG, Lanigan GJ. Reducing nitrous oxide emissions by changing N fertiliser use from calcium ammonium nitrate (CAN) to urea based formulations. *Sci Total Environ.* 2016; 563: 576-586. <http://dx.doi.org/10.1016/j.scitotenv.2016.04.120>

Huérffano X, Fuertes-Mendizábal T, Fernández-Diez K, Estavillo JM, González-Murua C, Menéndez S. The new nitrification inhibitor 3,4 dimethylpyrazole succinic (DMPSA) as an alternative to DMPP for reducing N₂O emissions from wheat crops under humid Mediterranean conditions. *Eur J Agron.* 2016; 80: 78–87. <https://doi.org/10.1016/j.eja.2016.07.001>

International Plant Nutrition Institute – INPI. Nutrient Source Specifics: Urea-Ammonium Nitrate; 2010 [cited 2019 July 12]. Available from: [https://www.ipni.net/publication/nss.nsf/0/5BB8639163BB14E3852579AF0075540B/\\$FILE/NSS-07%20Urea%20Ammonium%20Nitrate.pdf](https://www.ipni.net/publication/nss.nsf/0/5BB8639163BB14E3852579AF0075540B/$FILE/NSS-07%20Urea%20Ammonium%20Nitrate.pdf)

Kempers AJ, Zweers A. Ammonium determination extracts by the salicylate method. *Commun Soil Sci Plan.* 1986; 17: 715-723. <https://doi.org/10.1080/00103628609367745>

Kim DG, Saggar S, Roudier P. The effect of nitrification inhibitors on soil ammonia emissions in nitrogen managed soils: a meta-analysis. *Nutr Cycl Agroecosys.* 2012; 93: 51–64. <https://doi.org/10.1007/s10705-012-9498-9>

Kögel-Knabner I, Guggenberger G, Kleber M, Kandeler E, Kalbitz K, Scheu S, Eusterhues K, Leinweber P. Organo-mineral associations in temperate soils: Integrating biology, mineralogy, and organic matter chemistry. *J Plant Nutr Soil Sc.* 2008; 171: 61–82. <https://doi.org/10.1002/jpln.200700048>

Lara Cabezas WAR, Korndorfer GH, Motta SA. Volatilização de N-NH₃ na cultura de milho: II. Avaliação de fontes sólidas e fluidas em sistema de plantio direto e convencional. *Rev Bras Cienc Solo.* 1997; 21: 489-496. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06831997000300019>

Lara Cabezas WAR, Couto PA. Imobilização de nitrogênio da uréia e do sulfato de amônio aplicado em pré-semeadura ou cobertura na cultura de milho, no sistema plantio direto. *Rev Bras Cienc Solo.* 2007; 31: 739-752. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832007000400015>

Libardi PL. Dinâmica da água no solo. São Paulo: Editora Universidade de São Paulo; 2005.

Macadam XMB, del Prado A, Merino P, Estavillo JM, Pinto M, González-Murua C. Dicyandiamide and 3,4-dimethyl pyrazole phosphate decrease N₂O emissions from grassland but dicyandiamide produces deleterious effects in clover. *J Plant Physiol.* 2003; 160: 1517–1523. <https://doi.org/10.1078/0176-1617-01006>

Melgar R, Duggan MT, Raggio JB, Poklepovic P, Matorras OL, Octtinger CA. Manual de fertilizantes fluidos: ¿Cómo optimizar el uso de fertilizantes fluidos en Argentina y agro-sistemas sudamericanos. Buenos Aires: Buenos Aires; 2014.

Meurer KHE, Franko U, Stange CF, Rosa JD, Madari BE, Jungkunst HF. Direct nitrous oxide (N₂O) fluxes from soils under different land use in Brazil—a critical review. *Environ Res Lett.* 2016; 11: 1-13. <https://doi.org/10.1088/1748-9326/11/2/023001>

Mikutta R, Kleber M, Torn MS, Jahn R. Stabilization of soil organic matter: Association with minerals or chemical recalcitrance? *Biogeochemistry.* 2006; 77: 25–56. <https://doi.org/10.1007/s10533-005-0712-6>

Mualem Y. A new model for prediction the hydraulic conductivity of unsaturated porous media. *Water Resour Res.* 1976; 12: 513-522. <https://doi.org/10.1029/WR012i003p00513>

Ni K, Kage H, Pacholski A. Effects of novel nitrification and urease inhibitors (DCD/TZ and 2-NPT) on N₂O emissions from surface applied urea: An incubation study. *Atmos Environ.* 2018; 175: 75–82. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.12.002>

Novais RF, Smyth TJ. Fósforo em solo e planta em condições tropicais. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa; 1999.

Nyord T, Sogaard HT, Hansen MN, Jensen LS. Injection methods to reduce ammonia emission from volatile liquid fertilisers applied to growing crops. *Biosyst Eng.* 2008; 100: 235-244. <https://doi.org/10.1016/j.biosystemseng.2008.01.013>

Pan B, Lam SK, Mosier A, Luo Y, Chen D. Ammonia volatilization from synthetic fertilizers and its mitigation strategies: A global synthesis. *Agr Ecosyst Environ.* 2016; 232: 283–289. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2016.08.019>

Pegoraro RF, Silva IR, Novais RF, Barros NF, Fonseca S. Fenóis derivados da lignina, carboidratos e aminoaçúcares em serapilheira e solos cultivados com eucalipto e pastagem. *Rev Arvore.* 2011; 35: 359–370. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622011000200020>

Recio J, Vallejo A, Le-Noë J, Garnier J, García-Marco S, Álvarez J M, Sanz-Cobena A. The effect of nitrification inhibitors on NH₃ and N₂O emissions in highly N fertilized irrigated Mediterranean cropping systems. *Sci Total Environ.* 2018; 636: 427–436. <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2018.04.294>

Reddy GR. Effect of varying quantities of dicyandiamide on the utilization of nitrogen by several crops from sodium nitrate and ammonium sulphate. *J Agr Sci.* 1964; 62: 35-38. <https://doi.org/10.1017/S0021859600059748>

Reeves DW, Touchton JT. Relative phytotoxicity of dicyandiamide and availability of its nitrogen to cotton, corn, and grain sorghum. *Soil Sci Soc Amer J.* 1986; 50: 1353–1357. <https://doi.org/10.2136/sssaj1986.03615995005000050054x>

Sangoi L, Ernani PR, Silva PRF. Maize response to nitrogen fertilization timing in two tillage systems in a soil with high organic matter content. *Rev Bras Cienc Solo*. 2007; 31: 507-517. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832007000300011>

Santos MM, Galvão JCC, Silva IR, Miranda GV, Finger FL. Épocas de aplicação de nitrogênio em cobertura na cultura do milho em plantio direto, e alocação do nitrogênio (15N) na planta. *Rev Bras Cienc Solo*. 2010; 34: 1185-1194. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832010000400018>

Sanz-Cobena A, Misselbrook T, Camp V, Vallejo A. Effect of water addition and the urease inhibitor NBPT on the abatement of ammonia emission from surface applied urea. *Atmos Environ*. 2011; 45: 1517–1524. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2010.12.051>

Sanz-Cobena A, Sánchez-Martín L, García-Torres L, Vallejo A. Gaseous emissions of N₂O and NO and NO₃ – leaching from urea applied with urease and nitrification inhibitors to a maize (*Zea mays*) crop. *Agr Ecosyst Environ*. 2012; 149: 64– 73. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2011.12.016>

Silva EC, Buzett S, Guimarães GL, Lazarini E, Sá ME. Doses e épocas de aplicação de nitrogênio na cultura do milho em plantio direto sobre Latossolo Vermelho. *Rev Bras Cienc Solo*. 2005a; 29: 353-362. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832005000300005>

Silva EC, Ferreira SM, Silva GP, Assis RL, Guimarães GL. Épocas e formas de aplicação de nitrogênio no milho sob plantio direto em solo de cerrado. *Rev Bras Cienc Solo*. 2005b; 29:725-733. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-06832005000500008>

Silva MJ. Processo para aplicação localizada de fertilizante líquido nitrogenado em cana-soca [tese de doutorado]. Campinas: Faculdade de Engenharia Agrícola - Universidade Estadual de Campinas; 2017.

Soares JR, Cantarella H, Menegale MLC. Ammonia volatilization losses from surface-applied urea with urease and nitrification inhibitors. *Soil Biol Biochem*. 2012; 52: 82-89. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2012.04.019>

Tedesco MJ, Gianello C, Bissani CA, Bohnen H, Volkweiss SJ. Análise de solo, plantas e outros materiais. 2. ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul; 1995.

van Genuchten MT. A closed-form equation for predicting the hydraulic conductivity of unsaturated soils. *Soil Sci Soc Am J*. 1980; 44: 892-898. <https://doi.org/10.2136/sssaj1980.03615995004400050002x>

Weiske A, Benckiser G, Herbert T, Ottow JCG. Influence of the nitrification inhibitor 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP) in comparison to dicyandiamide (DCD) on nitrous oxide emissions, carbon dioxide fluxes and methane oxidation

during 3 years of repeated application in field experiments. *Biol Fert Soils*. 2001; 34: 109–117. <https://doi.org/10.1007/s003740100386>

Weller S, Fischer A, Willibald G, Navé B, Kiese R. N₂O emissions from maize production in South-West Germany and evaluation of N₂O mitigation potential under single and combined inhibitor application. *Agr Ecosyst Environ*. 2019; 269: 215–223. <https://doi.org/10.1016/j.agee.2018.10.004>

Zaman M, Saggar S, Blennerhassett JD, Singh J. Effect of urease and nitrification inhibitors on N transformation, gaseous emissions of ammonia and nitrous oxide, pasture yield and N uptake in grazed pasture system. *Soil Biol Biochem*. 2009; 41: 1270–1280. <https://doi.org/10.1016/j.soilbio.2009.03.011>

Zerulla W, Barth T, Dressel J, Erhardt K, von Locquenghien KH, Pasda G, Rädle M, Wissemeier AH. 3,4-dimethylpyrazole phosphate (DMPP)-a new nitrification inhibitor for agriculture and horticulture. *Biol Fert Soils*. 2001; 34: 79–84. <https://doi.org/10.1007/s003740100380>

Zhao Z, Wu D, Bol R, Shi Y, Guo Y, Meng F, Wu W. Nitrification inhibitor's effect on mitigating N₂O emissions was weakened by urease inhibitor in calcareous soils. *Atmos Environ*. 2017; 166: 142–150. <https://doi.org/10.1016/j.atmosenv.2017.07.034>

Zinn YL, Lal R, Resck DVS. Texture and organic carbon relations described by a profile pedotransfer function for Brazilian Cerrado soils. *Geoderma*. 2005; 127: 168–173. <https://doi.org/10.1016/j.geoderma.2005.02.010>

CONSIDERAÇÕES FINAIS

A adubação em pré-semeadura com o UAN é uma alternativa promissora para o manejo da adubação nitrogenada nas grandes fazendas. A facilidade de combinar o fertilizante fluido com outros compostos químicos possibilita que a adubação seja realizada concomitantemente com a aplicação de herbicidas dessecantes, inseticidas e, ou fungicidas. Além disso, a tendência de terceirização da aplicação do fertilizante fluido representa ganho operacional e logístico.

O UAN perde menos N por volatilização de NH_3 que a ureia e quando combinado com o NBPT há mais tempo para que a ocorrência de chuvas incorpore o fertilizante. Contudo, quando aplicado em condições que favorecem a perda de NH_3 , maiores doses de NBPT são necessárias. O inibidor de urease também se mostrou promissor em reduzir as emissões de N_2O em solos fertilizados com UAN, o que contribui para redução das emissões de gases de efeito estufa associadas à adubação nitrogenada.

A adição de até 4 g kg^{-1} DCD ao UAN com 2 g kg^{-1} de NBPT não aumenta as perdas de NH_3 , contudo o inibidor de nitrificação não contribuiu para reduzir as perdas por lixiviação de NO_3^- . De modo geral, em solos com elevados teores de argilas oxídicas a lixiviação de NO_3^- não representa perdas significativas devido à maior densidade de cargas positivas que adsorvem o íon e reduzem sua movimentação no perfil do solo. Além disso, em solos profundos, como os de Cerrado, o NO_3^- dificilmente alcançará o lençol freático, reduzindo as chances de contaminação.

CONCLUSÕES GERAIS

O UAN perde menos NH_3 que a ureia.

O NBPT reduz as perdas de NH_3 do UAN e da ureia aplicados em pré-semeadura.

O DCD não aumenta as perdas de NH_3 do UAN.

A adição combinada de NBPT e DCD ao UAN reduz as perdas de NH_3 , sendo que o DCD não reduz a eficiência do NBPT.

A adubação com UAN é viável para aplicação em pré-semeadura do milho em sucessão à pastagem, com preparo do solo.

O DCD reduz as emissões de N_2O e o NBPT reduz as emissões de N_2O e CO_2 na adubação com UAN em pré-semeadura.

ANEXOS

Tabela 1A. Quadrados médios para os teores de N-ureia, N-NH₄⁺, N-NO₃⁻, N-NO₂⁻ e pH-KCl, com as respectivas significâncias para os fatores, solo, fertilizante, tempo de avaliação e suas interações

Fonte de Variação	Quadrado médio					
	GL	Ureia	NH ₄ ⁺	NO ₃ ⁻	NO ₂ ⁻	pH
		----- g dm ⁻³ -----				
			--		mg dm ⁻³	
Bloco	3	6,81 **	33,55 ***	9,6 ***	104,64 ***	4,8 ***
Fert	5	297,06 ***	46,35 ***	56,42 ***	118,82 ***	49,34 ***
Solo	1	5,83 *	2,84 ***	0,39 ns	31,55 **	10,74 ***
Fert*solo	5	2,85 *	0,13 **	0,28 ns	14,94 *	0,95 ***
Erro Bloco*Fert*Solo	15	0,81	0,02	0,18	3,53	0,02
Coleta	8	103,23 ***	11,88 ***	0,16 ns	384,03 ***	42,4 ***
Fert*coleta	40	16,35 ***	1,41 ***	0,32 **	15 ***	2,5 ***
Solo*coleta	8	3,88 **	0,3 ns	0,32 °	8,09 ***	1,03 ***
Fert*solo*coleta	40	1,91 **	0,34 *	0,09 ns	3,16 **	0,6 ***
Coleta d/ Solo_milho d/Controle	8	0,02 ns	0 ns	0 ns	0,54 ns	0,06 ns
Coleta d/ Solo_milho d/Ureia	8	70,53 ***	7,67 ***	0,01 ns	70,93 ***	9,04 **
Coleta d/ Solo_milho d/UAN	8	7,8 ***	1,54 ***	0,74 ***	79,91 ***	6,12 ***
Coleta d/ Solo_milho d/uannbpt	8	2,27 *	0,22 ns	0,12 ns	63,14 ***	1,56 ***
Coleta d/ Solo_milho d/uandcd	8	7,05 ***	1,45 ***	0,14 ns	70,86 ***	6,25 ***
Coleta d/ Solo_milho d/uannbpt.dcd	8	1,91 °	0,27 ns	0,3 °	13,61 ***	1,28 ***
Coleta d/ Solo_pasto d/Controle	8	0,04 ns	0 ns	0 ns	0,81 ns	0,18 ***
Coleta d/ Solo_pasto d/Ureia	8	59,78 ***	4,54 ***	0 ns	22,61 ***	6,91 ***
Coleta d/ Solo_pasto d/UAN	8	21,37 ***	2,31 ***	0,71 **	56,58 ***	9,01 ***
Coleta d/ Solo_pasto d/uannbpt	8	3,57 **	0,62 **	0,09 ns	20,61 ***	4,72 ***
Coleta d/ Solo_pasto d/uandcd	8	21,23 ***	1,6 ***	0,29 ns	63,05 ***	9,09 ***
Coleta d/ Solo_pasto d/uannbpt.dcd	8	2,84 *	0,71 **	0,15 ns	15,38 ***	4,7 ***
Erro Bloco*Fert*Solo*Coleta	306	1,14	0,23	0,18	1,89	0,07
Total	431					
CV 1 (%)		22,67	10,4	34,77	48,73	2,38
CV 2 (%)		26,94	31,79	34,68	35,61	4,22
Média geral		3,96	1,5	1,22	3,86	6,1

ns, °, *, **, *** = não significativo e significativo a 10, 5, 1 e 0.1 %, respectivamente, pelo teste F.

Tabela 2A. Análise de variância para a volatilização de NH₃ acumulada

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
Bloco	2	358,45	179,22	3,16	0,0666
Tratamento	9	3708,68	412,07	7,26	0,0002
Erro (a)	18	1020,59	56,70		
Época	1	9746,15	9746,15	163,97	0,0000
Época x trat	9	3604,64	400,52	6,73	0,0002
trat d/época 1	9	7305,53	811,72	13,65	0,0000
trat d/época 2	9	7,80	0,87	0,015	1,0000
Erro (b)	20	1188,77	59,44		
Total	59	19627,28			

Tabela 3A. Análise de variância para a emissão diária de CO₂

FV	GL	SQ	QM	F	P
Bloco	2	4584,714	2292,36	0,44	0,6533
Tratamento	9	69531,43	7725,71	1,47	0,2325
Erro Tratamento*Bloco	18	94647,85	5258,21		
Coleta	5	408996,9	81799,38	19,18903	0,0000
Tratamento*Coleta	45	251421,2	5587,14	1,310667	0,1333
Coleta d/tratamento(controle)	5	37147,65	7429,53	1,742867	0,1317
Coleta d/tratamento(Ureia_100_0nbpt_0dcd_pre)	5	45273,88	9054,78	2,124128	0,0686
Coleta d/tratamento(Ureia_100_2nbpt_0dcd_pre)	5	53697,54	10739,51	2,519343	0,0343
Coleta d/ tratamento(UAN_100_0nbpt_0dcd_pre)	5	151487,7	30297,54	7,107392	0,0000
Coleta d/ tratamento(UAN_100_2nbpt_0dcd_pre)	5	100498,3	20099,67	4,715109	0,0007
Coleta d/ tratamento(UAN_100_0nbpt_2dcd_pre)	5	70368,92	14073,78	3,301519	0,0084
Coleta d/ tratamento(UAN_100_2nbpt_1dcd_pre)	5	60404,03	12080,81	2,833993	0,0195
Coleta d/tratamento(UAN_100_2nbpt_2dcd_pre)	5	22903,69	4580,74	1,074579	0,3791
Coleta d/ tratamento(UAN_100_2nbpt_3dcd_pre)	5	92264,64	18452,93	4,328807	0,0013
Coleta d/ tratamento(UAN_100_2nbpt_4dcd_pre)	5	26371,74	5274,35	1,237291	0,2974
Erro Tratamento*Bloco*Coleta	100	426282,1	4262,82		
Total	179	1255464			

Tabela 4A. Análise de variância para a lixiviação de NH_4^+ no tempo

FV	GL	SQ	QM	F	P
Bloco	2	12,55642	6,27821	2,782275	0,0885
Tratamento	9	20,1038	2,233755	0,989919	0,481
Erro Tratamento*Bloco	18	40,61704	2,256502		
Coleta	7	2,129928	0,304275	12,35681	0,0000
Tratamento*Coleta	63	1,219877	0,019363	0,786348	0,8582
Coleta d/tratamento(controle)	7	0,068616	0,009802	0,398077	0,9021
Coleta d/tratamento(Ureia_100_0nbpt_0dcd_pre)	7	0,08553	0,012219	0,496204	0,8361
Coleta d/tratamento(Ureia_100_2nbpt_0dcd_pre)	7	0,033752	0,004822	0,195813	0,9859
Coleta d/ tratamento(UAN_100_0nbpt_0dcd_pre)	7	1,71596	0,245137	9,955169	0,0000
Coleta d/ tratamento(UAN_100_2nbpt_0dcd_pre)	7	0,176327	0,02519	1,022964	0,4178
Coleta d/ tratamento(UAN_100_0nbpt_2dcd_pre)	7	0,500448	0,071493	2,903357	0,0073
Coleta d/ tratamento(UAN_100_2nbpt_1dcd_pre)	7	0,070883	0,010126	0,411229	0,8941
Coleta d/tratamento(UAN_100_2nbpt_2dcd_pre)	7	0,042038	0,006005	0,243884	0,9734
Coleta d/ tratamento(UAN_100_2nbpt_3dcd_pre)	7	0,103059	0,014723	0,597898	0,7568
Coleta d/ tratamento(UAN_100_2nbpt_4dcd_pre)	7	0,553192	0,079027	3,209352	0,0035
Erro Tratamento*Bloco*Coleta	140	3,447375	0,024624		
Total	239	80,07444			

Tabela 5A. Análise de variância para a lixiviação de NO_3^- no tempo

FV	GL	SQ	QM	F	P
Bloco	2	241,7152	120,8576	2,744016	0,0912
Tratamento	9	276,222	30,69134	0,696833	0,7038
Erro Tratamento*Bloco	18	792,7931	44,04406		
Coleta	7	2450,256	350,0366	171,1636	0,0000
Tratamento*Coleta	63	146,327	2,32265	1,135748	0,2665
Coleta d/tratamento(controle)	7	151,6315	599,0884	292,9469	0,0000
Coleta d/tratamento(Ureia_100_0nbpt_0dcd_pre)	7	254,4105	36,34435	17,77194	0,0000
Coleta d/tratamento(Ureia_100_2nbpt_0dcd_pre)	7	119,1388	17,01983	8,32249	0,0000
Coleta d/ tratamento(UAN_100_0nbpt_0dcd_pre)	7	271,7062	38,81516	18,98014	0,0000
Coleta d/ tratamento(UAN_100_2nbpt_0dcd_pre)	7	285,9521	40,85029	19,97529	0,0000
Coleta d/ tratamento(UAN_100_0nbpt_2dcd_pre)	7	122,462	17,49458	8,554633	0,0000
Coleta d/ tratamento(UAN_100_2nbpt_1dcd_pre)	7	373,795	53,39928	26,11159	0,0000
Coleta d/tratamento(UAN_100_2nbpt_2dcd_pre)	7	228,4192	32,63131	15,95631	0,0000
Coleta d/ tratamento(UAN_100_2nbpt_3dcd_pre)	7	424,9128	60,70183	29,68245	0,0000
Coleta d/ tratamento(UAN_100_2nbpt_4dcd_pre)	7	364,1549	52,02212	25,43818	0,0000
Erro Tratamento*Bloco*Coleta	140	286,3057	2,045041		
Total	239	4193,619			