

Perdas de nitrogênio por volatilização da amônia em três solos Argilosos tratados com uréia

Antônio Carlos Saraiva da Costa*, José Carlos Ferreira, Edleusa Pereira Seidel, Cássio Antonio Tormena e José Carlos Pinto*

Departamento de Agronomia, Universidade Estadual de Maringá, Av. Colombo, 5790, 87020-900, Maringá, Paraná, Brasil.
*in memoriam *Autor para correspondência. e-mail: acscosta@uem.br

RESUMO. As perdas de nitrogênio (N) do solo na forma gasosa dependem das características intrínsecas dos solos e das condições ambientais. Em solos da mesma classe textural, a mineralogia da fração argila e o teor de matéria orgânica são os principais fatores que podem afetar a dinâmica do N. No Norte do Estado do Paraná, variações nestas características são encontradas em toposequências de solos derivadas do basalto onde no terço superior ocorrem solos altamente intemperizados como os Latossolos e nas outras seções do relevo ocorrem solos mais jovens como Neossolos e eventualmente Vertissolos. O objetivo do presente trabalho foi avaliar as perdas de N por volatilização da amônia, utilizando três solos argilosos (Latossolo Vermelho distroférrico - LVdf, Neossolo lítólico - RL e Vertissolo Hidromórfico órtico - VGo) submetidos a duas condições de umidade (S8 e SS) e que foram tratados com uréia. A volatilização da amônia proveniente dos solos foi avaliada em recipientes plásticos de 2000cm³ que receberam 500g de terra e 200mg de uréia por um período acumulativo de 10 dias. As perdas de N-NH₃ foram avaliadas utilizando-se filtros de papel coletores, previamente umedecidos com H₂SO₄, que foram colocados 5cm da superfície do solo. Os resultados mostraram que os solos apresentaram diferenças quanto às perdas de amônia em função da umidade inicial e da mineralogia da fração argila. No tratamento com baixo teor de água (S8), os solos menos intemperizados (RL e VGo) apresentaram as menores perdas por volatilização da amônia devido a presença de elevadas percentagens de minerais de argila do tipo 2:1. No tratamento, solo saturado (SS), não houve diferenças estatisticamente significantes, nas perdas de N-NH₃, entre os solos estudados.

Palavras-chave: solos tropicais, fixação, matéria orgânica, teor de água, minerais de argila, ASE.

ABSTRACT. Nitrogen losses by ammonia volatilization of three clayey soils treated with urea. The soil nitrogen (N) losses in gaseous form depend on their intrinsic characteristics and also on the environmental conditions. In soils with the same texture class, the mineralogy of the clay size fraction and the amount of organic matter are the main factors that may affect the N dynamics. In the State of Paraná northerner region, variations in these characteristics are found in the toposequence of soils derived from basalts where, in the landscape upper part, highly weathered soils, such as the Latosols, are found and, in the other sections, younger soils, such as Neosols and eventually Vertisols, are found. The aim of the present work was to evaluate the N volatilization losses from ammonia, using three clayey soils (Red Dystroferic Latosol-LVdf, Litholic Neosol-RL and Ortio Hydromorphic Vertisol-VGo) submitted to two soil moisture contents (S8 and SS) and treated with urea. The ammonia volatilization of the applied urea was evaluated in 2000cm³ plastic recipients that received 500g of soil and 200mg of urea, for an accumulative period of 10 days. Paper filter collectors, previously humidified with H₂SO₄ measured the N-NH₃ losses, which were placed 5cm above the soil surface. The results showed that the soils presented differences in the ammonia losses, related to the initial soil moisture contents and the mineralogy of the clay size fraction. In the lower moisture treatment (S8) the least weathered soils (RL and VGo) showed the lowest ammonia losses, due to the higher percentages of 2:1 clay type minerals. In the soil-saturated treatment the N-NH₃ losses were not statistically significant among the soils.

Key words: tropical soils, fixation, organic matter, water content, clay minerals, SSA.

Introdução

A uréia é considerada como um dos mais importantes fertilizantes nitrogenados devido ao seu

baixo custo relativo, à alta solubilidade em água e pela boa assimilação dos produtos de sua hidrólise pelas plantas (Cantarella, 1992). Esse fertilizante apresenta, no entanto, limitações quanto às perdas do

nitrogênio (N) que podem comprometer sua eficiência (Sengik e Kiehl, 1995a e b). A principal forma de perda de N, através da hidrólise da uréia, é a volatilização da amônia (Bouwmeester *et al.*, 1985; Lara-Cabezas *et al.*, 1997; Scherer e Zhang, 1999). No processo de hidrólise da uréia, ocorre a formação do íon amônio (Sengik e Kiehl, 1995a), por meio da atuação da atividade da enzima urease (Bergstrom *et al.*, 2000). Em condições normais, o N-NH_4^+ é transformado N-NO_3^- pela atividade biológica do solo através do processo de nitrificação ou, em condições especiais, como elevado pH, pode ser transformado em amônia (N-NH_3) ou em outras formas gasosas (N_2 ou N_2O) sendo perdas do solo (Brady, 1989).

As práticas de manejo do solo, as condições climáticas e as características do solo são responsáveis pela dinâmica do N. Dentre os fatores do solo que podem influenciar nas perdas gasosas de N, estão o pH, o poder tampão (van Cleemput, 1998), a textura, a mineralogia da fração argila (Ernstsen, 1996; Schneiders e Scherer, 1998; Scherer e Zhang, 1999), a umidade (Bouwmeester *et al.*, 1985; Lara-Cabezas *et al.*, 1997; Luo *et al.*, 2000), a capacidade de troca catiônica-CTC (Schneiders e Scherer, 1998), a temperatura (Luo *et al.*, 2000), o teor de matéria orgânica (Johansson, 1998), e o potencial redox (Turner e Patrick, 1968).

No processo de hidrólise da uréia e de formação de N-NH_4^+ , esse cátion pode ser fortemente retido, formando complexos de esfera interna (Drury e Beauchamp, 1991; Steffens e Sparks, 1999) com os espaços ditrigonais (Sposito, 1989) na superfície interna dos filossilicatos do tipo 2:1, reduzindo, dessa forma, suas perdas na forma de N-NH_3 . Esta retenção do N-NH_4^+ está diretamente relacionada com a quantidade e com a distribuição de cargas permanentes nas superfícies internas dos diferentes tipos de minerais de argila 2:1 presentes no solo (Schneiders e Scherer, 1998; Steffens e Sparks, 1999; Scherer e Zhang, 1999) e inversamente correlacionada com a presença de outros minerais que inibem essa retenção, como os óxidos de ferro e caulinita (Scherer e Zhang, 1999). Além disso, condições de oxi-redução (Schneider e Scherer, 1998; Scherer e Zhang, 1999) ou a presença/adição de potássio ao solo (Scherer e Weimar, 1994; Dou e Steffens, 1995; Liu *et al.*, 1997), que compete pelos sítios de retenção de N-NH_4^+ , são fatores que contribuem para reduzir a sua adsorção, facilitando as perdas por volatilização.

Em solos tropicais, não há estudos que avaliem a influência da mineralogia dos solos nas perdas de nitrogênio. Nesse contexto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar as perdas de nitrogênio, na forma de amônia, provenientes da aplicação da uréia em três solos argilosos, submetidos a diferentes regimes de umidade e com diferentes características químicas e

mineralógicas.

Material e métodos

Caracterização dos solos

Foi coletada a camada de 0-0,20m de três solos amostrados numa toposequência de solos derivados do basalto, no município de Maringá, Estado do Paraná. Os solos foram o Latossolo Vermelho distroférrico (LVdf), no topo da vertente, o Neossolo litólico (RL) nas costas, e o Vertissolo Hidromórfico órtico (VGo), no sopé da encosta (Embrapa, 1999). De cada local foram coletados, aproximadamente, 2kg de solo que foram secados ao ar e à sombra, tamisados em peneira de 2mm, constituindo a terra fina seca ao ar (TFSA). Subamostras da TFSA foram submetidas à análise química e granulométrica de rotina, conforme metodologias descritas pelo Iapar (1992) e pela Embrapa (1997).

Os teores de areia, do silte e da argila foram determinados pelo método pipeta, após separação da fração de areia. Os teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^{3+} foram determinados após extração com $\text{KCl } 1\text{mol L}^{-1}$ e titulação do extrato com $\text{EDTA } 0,0125\text{mol L}^{-1}$ ($\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$) ou com $\text{NaOH } 0,025\text{mol L}^{-1}$ (Al^{3+}). O teor de K^+ foi determinado após extração com $\text{HCl } 0,025\text{mol L}^{-1}$, numa relação de 1:10 e determinado no extrato por fotometria de chama. A acidez extraível ($\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$) foi determinada pelo método SMP. A CTC foi considerada a soma dos cátions mais a acidez extraível. O teor de carbono orgânico total foi determinado através da oxidação da matéria orgânica com dicromato de potássio $0,2\text{mol L}^{-1}$ em meio ácido (Embrapa, 1997).

A avaliação da mineralogia dos solos foi efetuada na fração argila, que foi previamente separada por sifonamento, após dispersão do solo com $\text{NaOH } 1\text{mol L}^{-1}$. Na fração argila, foi determinado o teor total de óxidos e dos hidróxidos de ferro (Fe_2O_3), após dissolução do ferro livre com ditionito-citrato-bicarbonato de sódio (DCB) a quente (Mehra e Jackson, 1960). No material residual do tratamento DCB foram determinadas as quantidades de gibbsita e de caulinita, por análise térmica diferencial (Karathanasis e Hajek, 1982), utilizando-se um equipamento Seiko-200. As percentagens de minerais de argila expansíveis do tipo 2:1 (vermiculita e ou esmectitas) foram determinadas, em cada amostra, por diferença do somatório das percentagens dos Fe_2O_3 , caulinita e gibbsita (Costa *et al.*, 1999). A área superficial específica total (ASE) foi determinada pelo método do etileno glicol mono-etil éter (Dyal e Hendricks, 1950). A capacidade de troca catiônica da fração mineral foi determinada a partir da seguinte equação: $\text{CTCmin} = ((\text{CTC} - 4,5. (\% \text{C})) / \% \text{argila}) \cdot 100$ (Camargo *et al.*, 1987).

Determinação das perdas de N-NH_3

A unidade experimental de avaliação das perdas de N-NH₃ foi constituída de um frasco plástico de 2000cm³, em que foram adicionados 500cm³ de solo (Figura 1). O delineamento experimental foi constituído de um fatorial completamente casualizado sendo que os tratamentos principais foram três solos e dois níveis de água com três repetições por tratamento, ou seja, solo com 8% de umidade gravimétrica (S8) e solo saturado (SS). Em cada solo, foram adicionados 200mg de uréia granulada na superfície. Em cada frasco, a 5cm da superfície do solo e a cada 2cm em 2 camadas, foram colocados 2 papéis de filtro coletores, de 8 cm de diâmetro (Figura 1), em um total de 10 papéis. Cada conjunto de papel recebeu 2cm³ de H₂SO₄ 0,5mol L⁻¹ e uma gota de indicador alaranjado de metila. Os frascos permaneceram fechados por dez dias. Após isso, todos os filtros coletores de cada frasco foram colocados em um recipiente com 60mL de H₂O destilada e titulados com NaOH 0,02mol L⁻¹, na presença do indicador verde de bromocresol. O tratamento testemunha para cada solo constou da avaliação das perdas de N-NH₃ sem a adição da uréia.

As perdas de N-NH₃ foram calculadas pela seguinte expressão: N-NH₃ (mg) = (V2-V1)0,28; em que NH₃ é a média de amônia perdida, V1 é a média do volume de NaOH gasto para titular o tratamento testemunha, V2 é a média do volume médio de NaOH gasto para titular o ácido remanescente do conjunto de filtros coletores e 0,28 é a constante de equivalente de nitrogênio (Sengik e Kiehl, 1995a). A análise estatística dos resultados foi efetuada utilizando-se as rotinas Procanova e Procreg do *software* SAS (Statistical Analysis System, 1999).

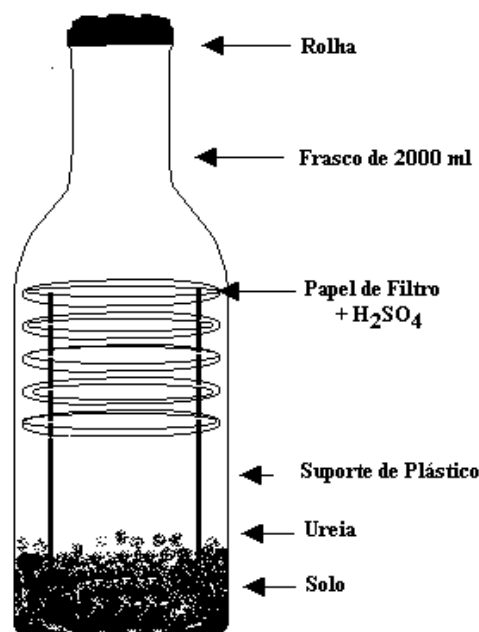


Figura 1. Representação da unidade experimental para avaliação da volatilização de N-NH₃ proveniente da uréia.

Resultados e discussão

Caracterização dos solos

O LVdf apresentou elevada acidez (Tabela 1) e baixa capacidade de troca catiônica (CTC). Os solos RL e VGo, por apresentarem condições específicas de pedogênese, associados à localização em relevo acidentado e lençol freático presente, respectivamente, são solos mais jovens, menos intemperizados em relação ao LVdf. Considerando que a CTC média da matéria orgânica é 450cmol kg⁻¹ (Camargo *et al.*, 1987), pode-se observar que, no solo VGo, que possui a menor concentração de carbono orgânico, essa contribuiu com somente 17% para a CTC do solo, comparados com 46% e 60% nos solos RL e LVdf, respectivamente.

Tabela 1. Valores médios dos teores de areia, de silte e de argila e das características químicas da camada superficial dos solos estudados.

Solo ⁽¹⁾	Areia	Silte	Argila	PH	C	Al ³⁺	H ⁺ +Al ³⁺	Ca ²⁺ +Mg ²⁺	K ⁺	CTC
LVdf	29	41	60	4,7	33,4	2,2	7,80	cmol.kg ⁻¹	0,38	9,99
RL	29	12	59	6,0	21,03	0	4,77	16,10	0,87	20,74
VGo	19	26	55	6,7	11,68	0	4,05	27,29	0,27	31,61

⁽¹⁾ LVdf - Latossolo Vermelho distroférrico; RL - Neossolo Litólico; VGo - Vertissolo Hidromórfico órtico.

A mineralogia da fração argila dos diferentes solos foi dominada por minerais argilosos silicatados do tipo 1:1 e óxidos de Fe e Al (Tabela 2). Na fração argila, independente da posição do relevo, a caulinita foi o principal mineral silicatado identificado nos três solos (Tabela 2). Dentre os óxidos de ferro e de alumínio, a maghemita, a hematita, a goethita e a

gibbsita foram os únicos encontrados nos três solos (Schwertmann e Herbillon, 1992; Costa *et al.*, 1999).

Tabela 2. Valores médios da percentagem de minerais, da área superficial específica total (ASE) e da capacidade de troca catiônica (CTC) dos minerais presentes na fração argila do Latossolo Vermelho distroférrico (LVdf), do Neossolo Litólico (RL) e do Vertissolo hidromórfico órtico (VGo).

Solo	Fe ₂ O ₃	Gibbsita	Caulinita	Argilas 2:1	ASE	CTCmin
------	--------------------------------	----------	-----------	-------------	-----	--------

	----- % -----				m ² g ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹
LVdf	16	6	68	10	97	6,72
RL	14	4	67	15	184	19,11
VGo	6	0	54	40	256	45,44

No solo VGo, a ocorrência do fluxo lateral e basal de materiais em solução (Moniz, 1996), associado às condições de relevo de drenagem e aos frequentes processos de secamento e de molhamento, determinaram a formação dos minerais de argila expansivos, facilmente identificáveis a campo com o desenvolvimento de uma estrutura prismática e *slickensides* (Embrapa, 1999).

O teor de ferro total (Tabela 2) foi maior no solo LVdf do que nos outros dois solos, por estar associado com os óxidos e com os hidróxidos como hematita, maghemita e goethita (Costa, 1996), minerais que são acumulados com o aumento da intensidade do intemperismo.

Os valores de ASE, da CTC dos solos e da fração mineral (Tabela 2) confirmaram que o solo VGo possui maior percentagem de argila de alta atividade em relação ao LVdf. Como consequência, apresentou também maiores valores de CTC e de ASE (Tabela 1). O solo RL é mais raso (aproximadamente 0,5m) do que o solo VGo (mais de 1,5m de *solum*), com maiores quantidades de óxidos de ferro (Tabela 2) pois não apresentou hidromorfismo no perfil como o solo VGo, onde a dissolução/remoção dos minerais de ferro determinou cores cinzas e esverdeadas (Costa, 1996).

Os altos valores de ASE e de CTC da fração mineral do solo VGo estão associados com a dominância de minerais de argila do tipo 2:1 (Sposito, 1989). Enquanto no solo LVdf a mineralogia da fração argila é dominada por caulinita e óxi-hidróxidos de ferro e de alumínio que possuem baixa densidade de cargas negativas e elevados valores de pH no ponto de carga zero (Sposito, 1989). Nos três solos, os teores de argila foram muito semelhantes (Tabela 1, LVdf= 60%, VGo = 59% e RL = 58%). Esses teores de argila determinaram que os solos são pertencentes a classe textural argila pesada. Os crescentes teores de silte encontrados (LVdf < RL < VGo) também demonstram que os solos apresentaram diferentes intensidades de intemperismo, sendo que o VGo é o solo mais jovem encontrado na toposequência.

Perdas de N-NH₃

Nos coletores, a quantidade máxima de N-NH₃ determinado foi inferior a 100mg. Portanto as quantidades de N-NH₃ retidas foram inferiores à quantidade máxima possível de ser retida pelos papéis umedecidos com H₂SO₄ 0,5mol L⁻¹, que era de 350mg de N-NH₃. Dessa forma, não houve perda de

N-NH₃ do solo para a atmosfera, que não fosse recuperado pelos coletores de papel. Além disso, os dez dias em que o experimento foi conduzido foram mais do que suficientes para que os processos de perdas ocorressem, conforme observado por Silva e Sengik (1994).

A análise estatística-Anova das perdas de nitrogênio volatilizado mostraram efeito significativo dos tratamentos do solo da água e da interação dessas variáveis, todas com P<0,0001, sendo que os valores de F foram maiores para o tratamento nível de água aplicada (F=86,36), em comparação à interação solo *versus* níveis de água (F = 49,27) e ao tratamento solo (F= 39,81). Desse modo, procedeu-se ao desdobramento das interações, estudando a influência do teor de água nos solos e dos solos nos diferentes teores de água.

Influência do teor de água entre os solos

Nas condições ambientais em que foi conduzido o experimento, isto é, temperatura média de 24±2°C e umidade relativa de 100%, dentro dos recipientes, ficou evidenciado que a aplicação de uréia favoreceu às perdas de N-NH₃, tanto nos solos com menor umidade (S8) como nos solos saturados (SS) (Figura 2). A atmosfera saturada por água contribuiu para as perdas de N-NH₃, mesmo em um solo com baixo conteúdo de água, por favorecer a contínua hidrólise da uréia (Silva e Sengik, 1994). O tratamento S8 determinou, nos diferentes solos, a umidade do solo inferior ao ponto de murchamento permanente (Costa *et al.*, 1997).

Os valores de perda de nitrogênio mostraram diferenças estatisticamente significativas somente no tratamento S8, em que o solo LVdf apresentou perdas maiores do que os outros dois solos. As maiores perdas de N-NH₃ do LVdf, no tratamento S8, devem-se a menor área superficial específica e à capacidade de troca catiônica (Tabela 2), onde poderiam ser retidas maiores quantidades de NH₄⁺, precursor natural do NH₃.

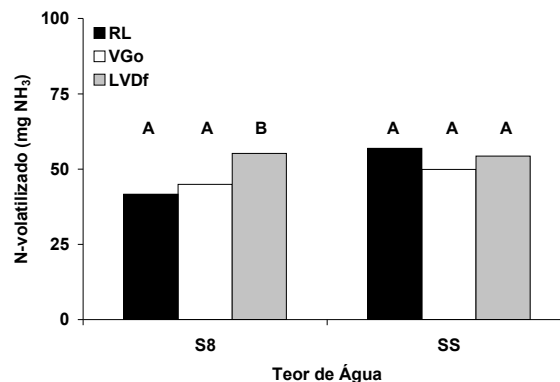


Figura 2. Perdas de nitrogênio volatilizado devido à diferentes conteúdos de água (8%g g⁻¹ (S8) e solo saturado (SS)) do Latossolo Vermelho distroférrico (LVdf), do Neossolo Litólico (RL) e do

Vertissolo Hidromórfico órtico (VGo). Médias seguidas da mesma letra, em cada teor de água, não diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade.

No tratamento com os solos saturados, não houve diferenças significativas nas perdas de N-NH_3 pelos diferentes solos. Isto é, nessas condições de umidade, diferenças nas características químicas dos solos (Tabela 1) ou mesmo na mineralogia da fração argila (Tabela 2) não determinaram diferenças nas perdas de N-NH_3 .

Nos solos saturados, o preenchimento da porosidade total dos solos deve ter modificado as características químicas da solução do solo. Nessas condições, o desaparecimento do O_2 (geralmente em 24 horas) resulta na elevação do pH do solo (Sposito, 1989), favorecendo o desenvolvimento de microrganismos anaeróbicos facultativos que reduziram o NH_4^+ produzido na hidrólise da uréia a NH_3 (Lara-Cabezas *et al.*, 1997). Nesse processo, esses microrganismos provocam o incremento da redução do nitrato a amônio (em 60 horas) e a subsequente perda de N-NH_3 para a atmosfera (Turner e Patrick, 1968). Resultados semelhantes foram obtidos por Bouwmeester *et al.* (1985) por Silva e Sengik (1994) por Lara-Cabezas *et al.* (1997) e por Luo *et al.* (2000).

Em condições de campo, os resultados obtidos em outros experimentos seriam diferentes (Urquiaga *et al.*, 1989), visto que a menor umidade relativa do ar e o secamento da superfície do solo pela ação do vento promoveriam o retardamento da dissolução da uréia (Bouwmeester *et al.*, 1985; Lara-Cabezas *et al.*, 1997).

Influência dos solos em função do teor de água

O solo RL foi o único que apresentou diferenças estatisticamente significantes nas perdas de N-NH_3 em função do teor de água aplicado (Figura 3) ou seja as perdas de N-NH_3 foram menores no tratamento de solo seco (S8) do que no solo saturado (SS). Essa mesma tendência também foi observada para o solo VGo. Dessa forma, os solos menos intemperizados (RL e VGo) determinaram as menores perdas de N-NH_3 . Nesses solos, também foram observados os maiores valores de CTC (Tabela 1) e de concentração de minerais de argila do tipo 2:1 (Tabela 2), que são os minerais responsáveis pelos sítios de adsorção das moléculas de NH_4^+ , precursores do NH_3 produzidas no processo de volatilização, em baixos teores de água. Portanto as diferenças na composição mineralógica da fração argila (Tabela 2) foram os fatores predominantes que determinaram os diferentes comportamentos entre os solos com baixo teor de água, visto que esses possuem teores semelhantes de argila (Tabela 1).

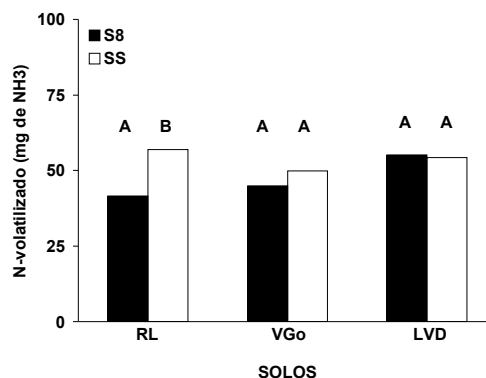


Figura 3. Perdas de nitrogênio volatilizado do Latossolo Vermelho distroférrico (LVdf), do Neossolo Litólico (RL) e do Vertissolo Hidromórfico órtico (VGo) em função dos teores de água (8%g g⁻¹ (S8) e do solo saturado (SS)). Médias seguidas da mesma letra, em cada solo, não diferem entre si pelo teste t a 5% de probabilidade.

Além disso, a presença de maior concentração de óxidos de ferro e alumínio e de caulinita, no LVdf, promoveriam o recobrimento da superfície dos minerais de argila 2:1, desse solo, dificultando os processos de expansão e de contração, que aumentariam a retenção de N-NH_4^+ , facilitando, assim, a formação de NH_3 e as perdas por volatilização desse solo (Scherer e Zhang, 1999).

Conclusão

Os solos apresentaram diferenças quanto às perdas de nitrogênio proveniente da amônia em função da umidade inicial e da composição mineralógica da fração argila.

Os solos menos intemperizados (RL e VGo) apresentaram as menores perdas de N-NH_3 no tratamento com baixo teor de água (S8).

No tratamento de solo saturado (SS), não houve diferenças estatisticamente significantes, nas perdas de N-NH_3 , entre os solos estudados.

Nesse experimento, a composição mineralógica da fração argila influenciou mais nas perdas de N-NH_3 do que o conteúdo de matéria orgânica dos solos.

Referências

- BERGSTROM, D.W. *et al.* Interpretation of soil enzyme activities in a comparison of tillage practices along a topographic and textural gradient. *Can. J. Soil Sci.*, Baltimore, v.80, p.71-79, 2000.
- BOUWMEESTER, R.J.B. *et al.* Effect of environmental factors on ammonia volatilization from a urea-fertilizer soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, v.49, p.376-381, 1985.
- BRADY, N.C. *Natureza e propriedades dos solos*. 7 ed. Rio de Janeiro: Livraria Freitas Bastos, 1989, 561p.
- CAMARGO, N.M. *et al.* Classificação de solos em levantamentos pedológicos no Brasil. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, Campinas, v.12, p.11-33, 1987.

- CANTARELLA, H. Perdas de nitrogênio por volatilização podem comprometer a adubação. *Petrofertil Rural*, n.13, 1992.
- COSTA, A.C.S. *Iron oxide mineralogy of soils derived from volcanic rocks in the Paraná River Basin, Brazil*. Columbus, 1996 (Ph.D. Thesis) - The Ohio State University, Columbus, 1996.
- COSTA, A.C.S. *et al.* Determinação da umidade na capacidade de campo e ponto de murchamento permanente por diferentes metodologias. *Rev. Unimar*, Maringá, v.19, p.827-844, 1997.
- COSTA, A.C.S. *et al.* Quantification and characterization of maghemite in soils derived from volcanic rocks in southern Brazil. *Clays Clays Min.*, Boulder, v.47, p.466-473, 1999.
- DOU, H.T.; STEFFENS, D. Recovery of N-15 labelled urea as affected by fixation of ammonium by clay-minerals. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, Amsterdam, v.158, p.351-354, 1995.
- DRURY, C.F.; BEAUCHAMP, E.G. Ammonium fixation, release, nitrification, and immobilization in high-and-low fixing soils. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, v.55, p.125-129, 1991.
- DYAL, R.S.; HENDRICKS, S.B. Total surface of clays in polar liquids as a characteristic index. *Soil Sci.*, London, v.69, p.421-432, 1950.
- EMBRAPA-S.N.L.C.S. *Manual de métodos e análises de solos*. Rio de Janeiro, 1997.
- EMBRAPA-C.N.P.S. Sistema brasileiro de classificação de solos. Brasília, 1999.
- ERNSTSEN, V. Reduction of nitrate by Fe^{2+} in clay minerals. *Clays Clay Min.*, Boulder, v.44, p.599-608, 1996.
- IAPAR. Manual de análise química de solo e controle de qualidade. Londrina, 1992.
- JOHANSSON, G. Chemical fixation of ammonia to soil organic matter after application of urea. *Acta Agric. Scand.* Stockholm, v.48, p.73-78, 1998.
- KARATHANASIS, A.D.; HAJEK, B.F. Revised methods for rapid quantitative determination of minerals in soil clays. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, v.46, p.419-425, 1982.
- LARA-CABEZAS, W.A.R. *et al.* Volatilização de nitrogênio da amônia na cultura de milho – Efeito da irrigação e substituição parcial da uréia por sulfato de amônio. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, Viçosa, v.21, p.481-487, 1997.
- LIU, Y.J. *et al.* Release and fixation of ammonium and potassium under long-term fertility management. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, Madison, v.61, p.310-314, 1997.
- LUO, J.; TILLMAN, R.W.; BALL, P.R. Nitrogen loss through denitrification in a soil under pasture in New Zealand. *Soil Biol. Biochem.*, Cambridge, v.32, p.497-509, 2000.
- MEHRA, O.P.; JACKSON, M.L. Iron oxide removal from soils by a dithionite-citrate system buffered with sodium bicarbonate. *Clays Clays Min.*, Boulder, v.7, p.317-327, 1960.
- MONIZ, A.C. Evolução de conceitos no estudo da gênese de solos. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, Viçosa, v.20, p.349-362, 1996.
- SAS. Statistical Analysis System Institute. *SAS/STAT Procedure guide for personal computers*. Version 5, SAS Inst. Cary, NC, 1999.
- SCHERER, H.W.; WEIMAR, S. Significance of the K content of the soils and the proportion of expandable clay-minerals of the total clay fraction on the dynamics of the nonexchangeable NH_4^+ -N after slurry application. *Agribiol. Res.*, v.47, p.124-139, 1994.
- SCHERER, H.W.; ZHANG, Y.S. Studies on the mechanisms of fixation and release of ammonium in paddy soils after flooding. I. Effect of iron oxides on ammonium fixation. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, Amsterdam, v.162, p.593-597, 1999.
- SCHNEIDERS, M.; SCHERER, H.M. Fixation and release of ammonium in flooded rice soils as affected by redox potential. *Eur. J. Agron.*, Amsterdam, v.8, p.181-189, 1998.
- SCHWERTMANN, U.; HERBILLON, A.J. Some aspects of fertility associated with the mineralogy of highly weathered tropical soils. In: LAL, R.; SANCHEZ, P.A. (Ed.). *Myths and Science of soils of the tropics*. Madison: S.S.S.A. Spec. Pub. N 29, 1992. p.61-91.
- SENGIK, E.; KIEHL, J.C. Controle da volatilização em terra tratada com uréia e turfa pelo emprego de sais inorgânicos. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, Viçosa, v.19, p.455-461, 1995a.
- SENGIK, E.; KIEHL, J.C. Efeito dos resíduos orgânicos e do fosfato monocálcico na volatilização da NH_3 em terra tratada com uréia. *Rev. Bras. Cienc. Solo*, Viçosa, v.19, p.321-326, 1995b.
- SILVA, C.C.; SENGIK, E. Influência da adição de água sobre a volatilização de amônia proveniente de uréia aplicada na superfície de amostras de solo. *Revista Unimar*, Maringá, v.16, p.243-251, 1994.
- SPOSITO, G. *The chemistry of soils*. New York: Oxford University Press, 1989.
- STEFFENS, D.; SPARKS, D.L. Effect of residence time on the kinetics of nonexchangeable ammonium release from illite and vermiculite. *J. Plant Nutr. Soil Sci.*, Amsterdam, v.62, p.599-605, 1999.
- TURNER, F.T.; PATRICK, W.H. Chemical changes in waterlogged soils as a result of oxygen depletion. In: *Transections of the IX International Soil Science Congress*. Riga 1968. Proceedings. Riga: International Soil Science Society, 1968. v.4, p.53-65.
- URQUIAGA, S. *et al.* Perdas por volatilização de 15 N-uréia e 15-N-sulfato de amônio. *Pesq. Agropecu. Bras.*, Brasília, v.24, p.607-613, 1989.
- VAN CLEEMPOT, O. Subsoils: chemo and biological denitrification, N_2O and N_2 emissions. *Nut. Cycl. Agroecosyst.*, v.52, p.187-194, 1998.

Received on February 16, 2004.

Accepted on August 19, 2004.