

**PERDAS POR VOLATILIZAÇÃO DA AMÔNIA DE DUAS FONTES DE N  
EM FUNÇÃO DA DOSE, PROFUNDIDADE DE APLICAÇÃO E  
UMIDADE INICIAL DE TRÊS DIFERENTES SOLOS**

**MARCOS CABRAL DE VASCONCELLOS BARRETTO**  
**Engenheiro Agrônomo**

**Orientador: Prof. Dr. Nadir Almeida da Glória**

Dissertação apresentada à Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", da Universidade de São Paulo, para obtenção do título de Mestre em Agronomia, Área de Concentração: Solos e Nutrição de Plantas.

**P I R A C I C A B A**  
**Estado de São Paulo - Brasil**  
**Janeiro - 1991**

Ficha catalográfica preparada pela Seção de Livros da  
Divisão de Biblioteca e Documentação - PCAP/USP

---

B274p Barretto, Marcos Cabral de Vasconcellos  
Perdas por volatilização da amônia de duas fontes  
de N em função da dose, profundidade de aplicação e  
umidade inicial de três diferentes solos. Piracicaba,  
1991.

160p. ilustr.

Diss. (Mestre) - ESALQ  
Bibliografia.

1. Amônia - Volatilização - Perda 2. Amônia como  
adubo 3. Nitrogênio em solo 4. Solo - Química - Característica I. Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba

CDD 631.41

PERDAS POR VOLATILIZAÇÃO DA AMÔNIA DE DUAS FONTES DE N EM  
FUNÇÃO DA DOSE, PROFUNDIDADE DE APLICAÇÃO E UMIDADE  
INICIAL DE TRÊS DIFERENTES SOLOS

MARCOS CABRAL DE VASCONCELLOS BARRETTO

Aprovada em: 05.03.1991

Comissão julgadora:

Prof. Dr. Nadir Almeida da Glória

ESALQ/USP

Prof. Dr. José Carlos Chitolina

ESALQ/USP

Dr. Tsuyoshi Yamada

POTAFOS

  
Prof. Dr. Nadir Almeida da Glória  
Orientador

A MEUS PAIS

GIL  
E ÍLMA

POR TUDO,

AOS IRMÃOS

EDUARDO  
GIL  
MARÍLIA  
E ALBERTO

POR TÊ-LOS,

CARINHOSAMENTE

DEDICO

## AGRADECIMENTOS

- Ao Professor Doutor Nadir Almeida da Glória, pela dedicada orientação e amizade.
- Ao Professor Doutor José Carlos Chitolina, pelas valiosas sugestões de caráter metodológico.
- Ao Engenheiro Agrônomo Norberto Lavorenti, pela colaboração prestada na interpretação estatística dos dados.
- Ao estagiário e futuro colega Kleber José de Moraes pela dedicada participação na montagem e coleta de dados dos experimentos.
- Aos colegas do PLANALSUCAR, pela ajuda e incentivo dados no decorrer deste curso.
- Aos professores e funcionários do Departamento de Química da ESALQ, por toda amizade e colaboração prestada.
- Ao CNPq pela concessão de uma bolsa de estudos.
- Aos colegas de pós-graduação, pelo agradável convívio, carinho e apoio.

# SUMÁRIO

	Página
RESUMO .....	vii
SUMMARY .....	ix
1. INTRODUÇÃO .....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA .....	4
2.1. Fixação, retenção e volatilização de amônia .....	4
2.2. Fatores que influem na volatilização de amônia .....	7
2.2.1. pH inicial do solo .....	7
2.2.2. Fonte nitrogenada e dose .....	9
2.2.3. Capacidade de troca catiônica, poder tam- pão e matéria orgânica do solo .....	12
2.2.4. Profundidade de aplicação do fertili- zante .....	19
2.2.5. Umidade do solo .....	23
2.2.6. Temperatura e aeração .....	26
2.3. Métodos para determinação das perdas de amônia ...	29
2.4. Comentários sobre a literatura .....	32
3. MATERIAL E MÉTODOS .....	35
3.1. Descrição do aparelho coletor de amônia .....	35
3.2. Calibração do método .....	38
3.3. Estudo das perdas de amônia em três solos .....	40
3.3.1. Descrição geral .....	40
3.3.2. Estudos com Latossolo Roxo álico .....	48
3.3.2.1. Experimento com aquamônia .....	48
3.3.2.2. Experimento com uréia .....	48
3.3.3. Estudos com Areia Quartzosa distrófica .....	51
3.3.3.1. Experimento com aquamônia .....	51
3.3.3.2. Experimento com uréia .....	51
3.3.4. Estudos com Vertissolo .....	53
3.3.4.1. Experimento com aquamônia .....	53

	Página
3.3.4.2. Experimento com uréia .....	53
3.4. Tratamento estatístico dos dados .....	56
3.4.1. Calibração do método .....	56
3.4.2. Estudos de perdas em três solos .....	56
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	57
4.1. Eficiência do método .....	57
4.2. Estudos com Latossolo Roxo álico .....	61
4.2.1. Experimento com aquamônia .....	61
4.2.1.1. Perdas diárias .....	61
4.2.1.2. Perdas totais .....	65
a) Efeito da dose de nitrogênio .....	66
b) Efeito da profundidade de a-	
plicação do fertilizante .....	70
c) Efeito da umidade inicial do	
solo .....	72
4.2.2. Experimento com uréia .....	75
4.2.2.1. Perdas diárias .....	75
4.2.2.2. Perdas totais .....	77
a) Efeito da dose de nitrogênio .....	80
b) Efeito da profundidade de a-	
plicação do fertilizante .....	81
c) Efeito da umidade inicial do	
solo .....	82
4.3. Estudos com Areia Quartzosa distrófica .....	84
4.3.1. Experimento com aquamônia .....	84
4.3.1.1. Perdas diárias .....	84
4.3.1.2. Perdas totais .....	87
a) Efeito da dose de nitrogênio .....	88
b) Efeito da profundidade de a-	
plicação do fertilizante .....	92
c) Efeito da umidade inicial do	
solo .....	95

	Página
4.3.2. Experimento com uréia .....	97
4.3.2.1. Perdas diárias .....	97
4.3.2.2. Perdas totais .....	100
a) Efeito da dose de nitrogênio .....	101
b) Efeito da profundidade de a-	
plicação do fertilizante .....	108
c) Efeito da umidade inicial do	
solo .....	111
4.4. Estudos com Vertissolo .....	115
4.4.1. Experimento com aquamônia .....	115
4.4.2. Experimento com uréia .....	116
4.4.2.1. Perdas diárias .....	116
4.4.2.2. Perdas totais .....	119
a) Efeito da dose de nitrogênio .....	120
b) Efeito da profundidade de a-	
plicação do fertilizante .....	125
c) Efeito da umidade inicial do	
solo .....	127
5. CONCLUSÕES .....	131
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	133
APENDICE .....	148

PERDAS POR VOLATILIZAÇÃO DA AMÔNIA DE DUAS FONTES DE N EM  
FUNÇÃO DA DOSE, PROFUNDIDADE DE APLICAÇÃO E UMIDADE  
INICIAL DE TRÊS DIFERENTES SOLOS

Autor: MARCOS CABRAL DE VASCONCELLOS BARRETTO

Orientador: PROF. DR. NADIR ALMEIDA DA GLÓRIA

**RESUMO**

Os efeitos da dose, profundidade de aplicação do fertilizante e umidade inicial do solo nas perdas de amônia por volatilização foi estudado em casa de vegetação com amostras de Latossolo Roxo álico (LRa), Areia Quartzosa distrófica (AQ) e Vertissolo (V), utilizando aquamônia e uréia como fontes de nitrogênio. Para a determinação das perdas foi desenvolvido um sistema no qual as medições da amônia volatilizada são feitas por titulação, dentro do próprio coletor, cuja eficiência foi aferida em quatro experimentos de calibração conduzidos em laboratório.

Os experimentos com aquamônia nos três solos consistiram de fatoriais com três níveis de nitrogênio, 0 e aproximadamente 50 e 100 kg N/ha; duas profundidades, 5 e 10 cm e três umidades iniciais: 0, 50 e 100% da capacidade de campo (CC) para os solos LRa e AQ, e 10, 50 e 100% CC para o Vertissolo. Nos experimentos com uréia foram usadas três doses, 0, 50 e 100 kg N/ha; três profundidades, 0, 2,5 e 5 cm e três umidades, as mesmas empregadas para aquamônia. As determinações das perdas foram feitas a cada dois dias.

O sistema de determinação das perdas revelou alta eficiência de recuperação da amônia volatilizada, sendo ainda de fácil manuseio e baixo custo de confecção e operação.

Em todos os experimentos com solo e nas duas fontes de N empregadas ocorreram efeitos altamente significativos para dose, profundidade e umidade inicial nas perdas de amônia. Também a interação destes fatores revelou elevada significância na maioria dos casos.

Os resultados obtidos, de maneira geral e independente da forma de aplicação e umidade, mostraram que as maiores perdas ocorreram no solo AQ, indicando a sua baixa capacidade de retenção de nitrogênio amoniacal. O Vertissolo foi o que apresentou as menores perdas, evidenciando que, desde que a aplicação não seja feita em superfície, estas são negligíveis, independente das fontes estudadas. No LRa, as menores perdas ocorreram quando foi utilizada a uréia. Neste solo, quando se aplicou aquamônia, mesmo para a maior profundidade estudada, estas não decresceram a ponto de atingir valores insignificantes.

Com as duas fontes estudadas, os efeitos da umidade e profundidade mostraram que são indissociáveis, indicando que para cada conjunto de fatores deve ser verificada as melhores condições de aplicação.

Verificou-se também, em todos os casos, independente das fontes, tipo de solo, umidade e dose, que a forma mais segura de aplicação do adubo foi a maiores profundidades, e ainda que, o aumento na dose de nitrogênio, acarretou o acréscimo nas perdas de amônia na maioria dos casos estudados.

AMMONIA VOLATILIZATION LOSSES FROM TWO N SOURCES AS A  
FUNCTION OF N LEVEL, DEPTH OF APPLICATION AND  
INITIAL MOISTURE IN THREE SOILS

Author: MARCOS CABRAL DE VASCONCELLOS BARRETTO

Adviser: PROF. DR. NADIR ALMEIDA DA GLÓRIA

**SUMMARY**

A study was carried out to investigate the ammonia volatilization losses from soils classified as Acrorthox, Quartzipisament and Vertisol under aqueous ammonia and urea fertilization, in a greenhouse test. Doses and fertilizer nitrogen sources, application depths and initial soil moisture were the variables studied in each soil.

The volatilization losses were determined, by titration, directly in a special glass device built to retain the ammonia volatilized from the soils. The efficiency of ammonia retention by the device was determined from laboratory calibration experiments.

The treatments of each soil and both fertilizers consisted of three nitrogen levels, i. e., 0, 50 and 100 kg N/ha and three initial moisture values, i. e., 0, 50 and 100% of the field capacity, except to the Vertisol whose initial moisture values were 10, 50 and 100% of the field capacity. The application depths varied according to the fertilizer applied. Aqueous ammonia was applied at 5 and 10 cm deep while urea was applied at 0, 2,5 and 5 cm deep. The ammonia volatilization losses were evaluated every other day.

The device utilized to trap the ammonia volatilized from the soils showed high recovery efficiency, low cost, besides being easy to manufacture and handle it.

From the results obtained, aqueous ammonia and urea showed highly significant differences to doses, application depths and initial moistures related to the ammonia volatilized from Acrorthox (LRa) and Quartzipsament (AQ), while Vertisol (V) showed the same significance only with urea application.

Highly significant differences were obtained from the interaction of the three factors studied, i. e., doses, application depths and initial soil moistures. No significant interaction was obtained for Acrorthox, when urea was applied.

Undetectable ammonia volatilization losses were observed in the Vertisol fertilized with aqueous ammonia.

In general, independently of the application depths and moisture levels, the results obtained showed higher losses in AQ soil, what indicates its low ammonia retention capacity. On the other hand, undetectable ammonia volatilization losses were verified in Vertisol, since the nitrogen sources were applied deep instead of on the surface of the soil. In case of Acrorthox the lowest losses occurred when the source applied was urea.

Significant interactions were obtained concerned to application depths and moisture levels, independently of the nitrogen sources utilized. So, in order to minimize the ammonia volatilization losses both variables have to be considered.

When aqueous ammonia and urea were incorporated in the soil, the losses of ammonia by volatilization were reduced as a function of the application depth. The highest losses occurred near to the soil surface, independently of nitrogen sources, soil types moisture levels and doses, in all cases. At the same time was verified an increasing of the ammonia losses with the nitrogen doses increasing.

## 1. INTRODUÇÃO

O nitrogênio é um elemento muito abundante na terra. Representa 78% da composição da atmosfera, constituindo esta parte, cerca de 2% do total existente no planeta. Quase 98% ocorrem na litosfera. Nesta, uma fração muito pequena está no solo, quantidade que, segundo STEVENSON (1982), é cinco mil vezes menor que a do N atmosférico, podendo encontrar-se em formas orgânicas ou inorgânicas.

O nitrogênio orgânico, representa cerca de 95% do total no solo e ocorre como aminoácidos, proteínas, aminoaçúcares, compostos resultantes de reação do amônio com lignina, da polimerização de quinonas e condensação de açúcares aminados. Existem ainda, segundo TISDALE et alii (1985), uma série de outros compostos de natureza não muito bem conhecida. Os 5% restantes, constituem as formas inorgânicas do N, que são: amônio ( $\text{NH}_4^+$ ), amônia ( $\text{NH}_3$ ), nitrito ( $\text{NO}_2^-$ ), nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), óxido nitroso (NO) e nitrogênio elementar ( $\text{N}_2$ ), sendo esta a única forma estável.

Adições deste elemento ao solo ocorrem de várias maneiras: através da chuva, que traz óxidos resultantes da quebra da molécula  $\text{N}_2$  por descargas elétricas e pequenas quantidades de N amoniacal e orgânico; da fixação por microorganismos simbióticos e de vida livre, decomposição da matéria orgânica e aplicação de adubos. A saída do nitrogênio do solo, ocorre principalmente através

no mundo. Este tipo de perda ocorre sempre que haja amônia livre próxima à superfície do solo e vários fatores inerentes a este, ao ambiente, ao fertilizante e seu manejo, irão determinar a magnitude da sua passagem para a atmosfera.

Para a determinação da volatilização do  $\text{NH}_3$  existem diversos métodos, que diferem entre si quanto ao custo, precisão e aplicabilidade em estudos de campo e/ou laboratório, geralmente desenvolvidos em função dos objetivos específicos de cada estudo.

Neste trabalho, é feita a calibração de um método para medir o  $\text{NH}_3$  volatilizado e, com este, um estudo em três solos a saber: Areia Quartzosa, Vertissolo e Latossolo Roxo álico, nos quais são avaliados os efeitos da umidade inicial do solo, da dose de N e profundidade de aplicação de aquamônia e uréia, nas perdas de nitrogênio por volatilização de amônia.

no mundo. Este tipo de perda ocorre sempre que haja amônia livre próxima à superfície do solo e vários fatores inerentes a este, ao ambiente, ao fertilizante e seu manejo, irão determinar a magnitude da sua passagem para a atmosfera.

Para a determinação da volatilização do  $\text{NH}_3$ , existem diversos métodos, que diferem entre si quanto ao custo, precisão e aplicabilidade em estudos de campo e/ou laboratório, geralmente desenvolvidos em função dos objetivos específicos de cada estudo.

Neste trabalho, é feita a calibração de um método para medir o  $\text{NH}_3$  volatilizado e, com este, um estudo em três solos a saber: Areia Quartzosa, Vertissolo e Latossolo Roxo álico, nos quais são avaliados os efeitos da umidade inicial do solo, da dose de N e profundidade de aplicação de aquamônia e uréia, nas perdas de nitrogênio por volatilização de amônia.

## 2. REVISÃO DE LITERATURA

### 2.1. FIXAÇÃO, RETENÇÃO E VOLATILIZAÇÃO DE AMÔNIA

O nitrogênio amoniacal presente no solo pode se encontrar, excluindo-se a absorção por organismos, fixado a moléculas orgânicas e a minerais de argila, adsorvido a ambos, ou ainda em solução. A proporção de cada uma destas ocorrências é dependente de diversas características do solo.

O primeiro caso (fixação) em solos minerais, é grandemente relacionado com os tipos de argila existentes em sua composição. Em estudo realizado na Nigéria por OPWARIBO & ODU (1978a) com 32 amostras de solo, observou-se na maioria deles a predominância de caulinita, que é uma argila do tipo 1:1. Em seis solos onde argilas 2:1 constituíam a maior parte desta fração, no caso montmorilonita, vermiculita e illita, encontraram grandes quantidades de amônio fixado e testes de laboratório confirmaram suas elevadas capacidades de fixação deste íon.

A capacidade de fixação de  $\text{NH}_4^+$  pelos minerais de argila 2:1 é decorrente da existência nestes de três posições de troca catiônica. MIELNICZUK (1981) as define como posições (a) planar, as cargas negativas existentes nas superfícies externas; (b) externas, nas bordas das partículas; e (c) internas, cargas negativas situadas na

superfície interior, entre as camadas. A exemplo do que acontece com o íon  $K^+$  (NOMMIK & VAHTRAS, 1982), o  $NH_4^+$ , ao difundir-se para o interior da partícula de argila, é adsorvido na posição interna, podendo aí permanecer de forma não trocável, a depender do tipo de argila 2:1 e da condição de umidade. Segundo os mesmos autores, a vermiculita possui elevada capacidade de fixação de  $NH_4^+$  por se contrair quando este íon é adsorvido na posição interna. A illita pode ou não fixar, a depender do seu grau de intemperismo e da saturação de potássio. A montmorilonita não fixa  $NH_4^+$  quando úmida pelo fato deste não provocar a sua contração nestas condições, fixando entretanto, quando o solo sofre um dessecação. Dada à semelhança de comportamento no complexo sortivo do solo entre o  $NH_4^+$  e o  $K^+$ , este exerce uma forte influência na fixação do amônio, por competir por sítios de adsorção, segundo OPWARIBO & ODU (1978b), que ressaltam ainda a importância de períodos alternados de presença e ausência de umidade no aumento da fixação de amônio, decorrente do aumento da concentração de  $NH_4^+$  e da desidratação das superfícies interlamelares da argila, como no caso citado da montmorilonita.

O amônio fixado pode tornar-se novamente disponível através do seu deslocamento por outro íon, ou por diminuição no teor de  $NH_4^+$  trocável e em solução, em decorrência por exemplo, da retirada pelas culturas. MENGUEL & SHERER (1981) trabalhando com  $N^{15}-NH_4^+$  em solo aluvial da Alemanha Ocidental cultivado com beterraba açucareira, determinaram significativa liberação de  $NH_4^+$  fixado, confirmada ainda pela presença do elemento marcado em análises de tecido vegetal, reafirmando sua participação no ciclo geral do nitrogênio.

A fixação de  $NH_4^+$  pela matéria orgânica é feita, segundo BROADBENT & STEVENSON (1966), principalmente

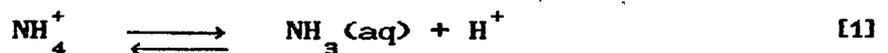
por grupos fenólicos e quinonas derivados da degradação da lignina, cuja polimerização, formando compostos aminados de elevado peso molecular, torna indisponível parte do amônio adicionado ao solo. Estes autores relatam ainda a contribuição para este processo de altos valores de pH, como ocorre imediatamente após a aplicação ao solo de amônia anidra ou em solução e de uréia. A liberação do N assim fixado é lenta, podendo tanto significar uma reserva como constituir-se numa causa de momentânea deficiência deste nutriente para as plantas.

O amônio considerado "retido", é aquele que encontra-se adsorvido aos colóides do solo em posições trocáveis, estando em equilíbrio com o  $\text{NH}_4^+$  em solução.

Também o  $\text{NH}_4^+$  fixado pode passar a trocável. Portanto, considera-se haver um equilíbrio entre as diversas formas deste íon, conforme o esquema abaixo:



O amônio pode, em solução, passar para a forma de amônia ( $\text{NH}_3$ ), de acordo com a reação:



Como o  $\text{NH}_3$  é uma forma volátil, pode difundir-se para a atmosfera, o que é função do gradiente de potencial entre sua quantidade em solução -  $\text{NH}_3(\text{aq})$  - e a pressão parcial de  $\text{NH}_3$  no ar ( $P_{\text{NH}_3}$ ). Esta é geralmente baixa e razoavelmente constante. Portanto, o que vai determinar as perdas é o  $\text{NH}_3$  presente na solução do solo.

Os fatores que afetam o equilíbrio das formas  $\text{NH}_4^+$  trocável  $\xrightleftharpoons{\quad}$   $\text{NH}_4^+(\text{aq})$   $\xrightleftharpoons{\quad}$   $\text{NH}_3(\text{aq})$   $\xrightleftharpoons{\quad}$   $\text{NH}_3$  atmosfera

são discutidos a seguir.

## 2.2. FATORES QUE INFLUEM NA VOLATILIZAÇÃO DE AMÔNIA

### 2.2.1. pH inicial do solo

O equilíbrio entre as espécies amônio e amônia, indicado na reação [1], expresso em termos de atividades, explica a influência do pH do meio, conforme segue (NELSON, 1982):

$$\frac{(\text{NH}_3(\text{aq})) \cdot (\text{H}^+)}{(\text{NH}_4^+)} = K = 10^{-9,5} \quad [2]$$

Portanto,

$$\log \frac{(\text{NH}_3(\text{aq}))}{(\text{NH}_4^+)} = -9,5 + \text{pH} \quad [3]$$

Tomando-se como referência um pH de 9,5 onde as atividades do  $\text{NH}_3$  e  $\text{NH}_4^+$  se igualam, pode-se observar que, a valores menores, o equilíbrio da reação desloca-se de maneira a preponderar a forma ionizada. Por exemplo: a pH= 7, apenas 0,32% do N amoniacal estaria presente como  $\text{NH}_3$ . Nota-se então, através da equação [3], a necessidade de uma condição alcalina para que exista amônia em quantidades significativas na solução.

De fato, vários estudos apontam menores perdas de  $\text{NH}_3$  em solos ácidos. Du PLESSIS & KROONJE (1964), trabalhando com amostras de solo com pH variando de 4,5 a 7,1, determinaram que a taxa de volatilização era

diretamente relacionada com o pH inicial. Em cinco solos com pH variando de 4,5 a 6,9, FILIMONOV & STREL'NIKOVA (1974) encontraram perdas por volatilização de  $\text{NH}_3$ , correspondentes a 20% do N-uréia em solo próximo à neutralidade e de apenas 4% em solo ácido. Em terreno cultivado com cana-de-açúcar a pH 7,7 (PINNA & VALDIVIA, 1978), 70% do N-uréia aplicado em superfície foi perdido na forma de  $\text{NH}_3$ , quatro dias após a aplicação.

MILLS et alii (1974) utilizando solo arenoso de pH inicial igual a 5,5, que recebeu doses crescentes de calagem, observaram em laboratório que os tratamentos com pH entre 5,7 e 7,2 apresentaram perdas de no máximo 17% do N aplicado na forma de cloreto de amônio. A valores de pH acima de 7,6; a volatilização de  $\text{NH}_3$  era sempre maior que 50%. Este efeito da calagem também foi observado por OLIVEIRA (1982) em Latossolo Vermelho-amarelo, no qual a elevação do pH de 5,7 para 6,3 aumentou as perdas de 14% para 25%, respectivamente, quando a uréia foi aplicada em superfície. A 2 cm de profundidade, a volatilização foi de 1% e 7% do N-uréia aplicado, para os tratamentos sem e com calagem. Du PREEZ & BURGER (1987a), em solo arenoso com pH ajustado para 6,5; 7,6; 8,3 e 9,1, determinaram perdas de respectivamente, 5,3; 14,4; 17,5 e 23,6% do N-uréia aplicado em dose equivalente a 120 kg N / ha.

Respostas semelhantes quanto ao pH do solo, foram obtidas por VENTURA & YOSHIDA (1977) com a incorporação de sulfato de amônio, seguida de inundação. Também nestas condições, MIKKELSEN et alii (1978) e CHAUAN & MISHRA (1989) determinaram correlações significativas entre as perdas de amônia por volatilização e o pH da água de irrigação.

Apesar de governar o equilíbrio amônio-amônia

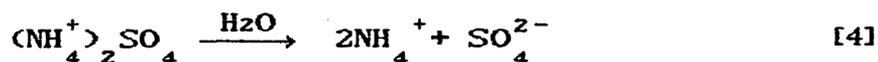
em solução, o pH é influenciado por outros fatores que podem alterar o seu valor no local onde se encontra o N amoniacal em maiores concentrações, como na região adjacente à partícula de adubo. Assim, um aumento na concentração de  $\text{NH}_4^+$  ou mudança no pH resultantes da aplicação do fertilizante podem vir a promover perdas de amônia, independentemente da acidez inicial do solo.

RACHHPAL-SINGH & NYE (1984) estabeleceram modelos matemáticos para concentração de uréia, amônio e variações do pH no perfil de solo em função da colocação do adubo em superfície. SHERLOCK & GOH (1985a, 1985b), desenvolveram e testaram em campo modelos para prever a volatilização de amônia e, entre as variáveis utilizadas, elegeram como principal o pH resultante da aplicação do adubo. Estes trabalhos destacaram a influência do tipo e dose do fertilizante na movimentação do N amoniacal, no solo e para fora deste.

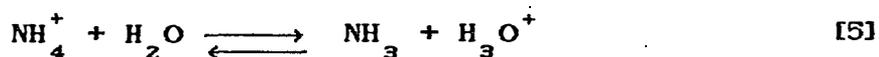
### 2.2.2. Fonte nitrogenada e dose

A depender da natureza química dos fertilizantes, quando estes são adicionados ao solo, podem provocar alterações no pH do meio.

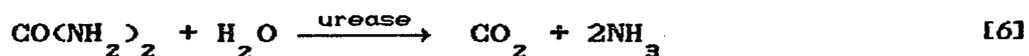
O sulfato de amônio, por exemplo, causa uma reação ácida devido ao seguinte comportamento em solução:



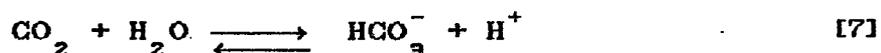
O  $\text{NH}_4^+$  em solução, comporta-se como ácido fraco, através da reação:



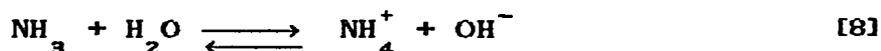
A uréia provoca uma reação fortemente alcalina como resultado da sua hidrólise:



O  $\text{CO}_2$  formado passa para a atmosfera ou reage com a água, liberando  $\text{H}^+$  para solução:



Apesar desta reação o efeito final é alcalino, devido à maior quantidade de  $\text{NH}_3$  formada que retira prótons do meio, conforme a reação abaixo:



Um outro fertilizante, a solução de amônia, nada mais é que o sistema representado na reação [8]. Não apresentando nenhum componente ácido, como o  $\text{CO}_2$  produzido na hidrólise da uréia (reações [6] e [7]), a aquamônia irá provocar uma elevação ainda mais drástica no pH do meio. Maiores alterações no pH com a adição deste adubo do que com uréia foram observadas por KISSEL et alii (1988).

Em revisão feita por MAKAROV & MAKAROV (1976) são relatadas maiores perdas de aquamônia (45 a 53% do N aplicado) que de uréia (11 a 17%), em testes de laboratório com aplicações superficiais. No entanto, LARA CABEZAS (1987) não observou diferenças significativas entre uréia e aquamônia, aplicadas em Latossolo Roxo em condições de campo, de 10 a 15 cm de profundidade. Isto indica que a fonte não é um fator limitante ao uso de determinado adubo, desde que o modo de aplicação seja condizente com as características deste e do solo a ser tratado.

A dose do fertilizante pode influenciar a volatilização devido ao aumento na concentração de  $\text{NH}_4^+$  e à elevação no pH da solução do solo, com consequente aumento na quantidade de amônia dentro do equilíbrio entre estas duas formas (equação [8]).

Em muitos casos estudados, embora os aumentos nas doses tenha aumentado a quantidade bruta de  $\text{NH}_3$  volatilizado, os valores em percentagem relativos às quantidades aplicadas apresentaram decréscimo ou estabilização. HARGROVE et alii (1977) não observaram diferenças significativas entre as perdas percentuais com o aumento de 140 para 280 Kg/ha de N-sulfato de amônio. Utilizando uréia nas doses de 56, 112, 224 e 448 Kg N/ha, HARGROVE & KISSEL (1979) determinaram perdas de respectivamente 31, 26, 19 e 13% do N aplicado. STUMPE et alii (1984), aplicando uréia nas doses de 25, 50 e 100 kg N/ha, observaram perdas em torno de 21% para os três casos. Em todos esses trabalhos, a uréia foi disposta superficialmente em Vertissolos que, por suas elevadas CTC, apresentam grande capacidade de reter o íon  $\text{NH}_4^+$ .

Por outro lado, solos de textura arenosa e baixa CTC podem atingir rapidamente a capacidade máxima de retenção de amônio, permitindo a sua presença em grandes quantidades na solução, fazendo com que a adição de níveis elevados de N amoniacal ocasione um aumento significativo nas perdas percentuais. OVERREIN & MOE (1967) observaram, em condições de laboratório, o crescimento exponencial na volatilização de  $\text{NH}_3$  em função do aumento da dose. Tal efeito também foi determinado por CONNELL et alii (1979): Com a variação na dose de 224 para 336 Kg de N-uréia por hectare (aumento de 50%), as perdas de  $\text{NH}_3$  dobraram de 19% para 36% do N aplicado. O efeito da concentração de N amoniacal na solução foi também observado na água de irrigação por

DENMEAD et alii (1982), com a elevação das perdas percentuais em função do aumento da quantidade de N-aquamônia.

No comportamento das perdas, o efeito da fonte e dose de nitrogênio expressa-se em função das características do solo, entre elas a sua textura. TERMAN (1979) por exemplo, relata perdas negligíveis com amônia anidra aplicada a 7 cm de profundidade em um solo calcário argiloso e, perdas elevadas com a injeção a 15 cm em um solo ácido arenoso.

O maior potencial de perder amônia dos solos arenosos é atribuído, por PARR & PAPENDICK (1966), à (i) maior permeabilidade aos gases permitindo um mais rápido movimento da amônia por difusão ou fluxo de massa, e (ii) ao menor número de sítios de adsorção de  $\text{NH}_4^+$  em relação a um solo argiloso. A este último fator deve ser somada uma menor resistência a variações no pH quando da aplicação do adubo. Assim, a CTC e o poder tampão de um solo vão exercer grande influência na sua capacidade de reter nitrogênio amoniacal.

### 2.2.3. Capacidade de troca catiônica, poder tampão e matéria orgânica do solo

Conforme já visto, existe um equilíbrio entre o amônio trocável, em solução (aq) e a amônia no solo:



Solos com grande número de cargas negativas, são capazes de manter elevadas quantidades de amônio adsorvido. Nesta condição, menos  $\text{NH}_4^+$  estará sujeito a passar para a forma volátil ( $\text{NH}_3$ ). Quando um adubo amoniacal é

adicionado, aumentando o teor de  $\text{NH}_4^+$  (aq), o equilíbrio da equação [9] é alterado. Caso a capacidade de adsorção de amônio do solo seja pequena, formar-se-ão grandes quantidades de  $\text{NH}_3$  na solução, que tende a passar para a atmosfera.

Estudando um solo argiloso misturado a quantidades crescentes de areia lavada, obtendo assim capacidades de troca catiônica, em me/100g, de 58, 29, 18, 9, 6, e 0 (só areia), com pH ajustado para 7,6; FENN & KISSEL (1976) observaram que a taxa de volatilização de amônia crescia significativamente em função da diminuição da CTC. Na dose equivalente a 110 kg N/ha, as perdas variaram de 91 a 50% do N aplicado na forma de sulfato de amônio. Determinaram ainda que a redução das perdas era mais pronunciada nesta dose do que a 550 kg N/ha, as quais variaram de 75 a 60%, indicando o efeito da saturação do solo quanto à capacidade de reter  $\text{NH}_4^+$ . Esta interação entre CTC e dose foi também observada por FENN et alii (1982) em estudo com o mesmo solo utilizando uréia como fonte nitrogenada. Em solos tropicais de baixa CTC, apesar da acidez, KIEHL (1983) relata perdas de amônia que atingiram valores maiores que 80% do N aplicado.

HUNT & ADAMSEN (1985) utilizando amostras de dois solos agitados por 30 minutos em solução de hidróxido de amônio com o objetivo de determinar modelos matemáticos para a adsorção de  $\text{NH}_4^+$ , afirmaram ser a CTC do solo um parâmetro confiável para estimar o equilíbrio entre as quantidades de  $\text{NH}_4^+$  adsorvidas e em solução. O'TOOLE et alii (1985) determinaram elevada correlação negativa entre a CTC de dez solos e a volatilização de amônia. Observaram ainda, perdas negligíveis para CTC acima de 28me/100g e, a valores abaixo deste, taxas crescentes de volatilização. Também REYNOLDS & WOLF (1987b), estudando 7 solos, e MARTENS &

BREMER (1989) em trabalho com 20 solos, observaram correlações significativas entre CTC e perdas de  $\text{NH}_3$ .

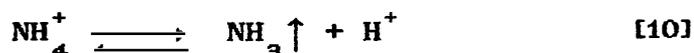
Além da densidade de carga negativa do solo, a adsorção de  $\text{NH}_4^+$  é influenciada também pela natureza e quantidade de outros cátions presentes no complexo sortivo.

Estudando volatilização de amônia em função da salinidade, GANDHI & PALIWAL (1976) determinaram perdas 3 vezes maiores num solo tratado com sódio ( $E_{ce} = 50$  mmhos/cm) em relação à testemunha ( $E_{ce} = 1,1$  mmhos/cm), tendo atribuído este efeito à diminuição da disponibilidade de sítios de adsorção para o  $\text{NH}_4^+$ . RAISON & McGARITY (1978) observaram significativo aumento na volatilização de  $\text{NH}_3$  com a adição de cinzas ao solo. Explicaram que isto foi devido à elevação do pH, saturação dos sítios de troca por bases presentes na cinza e maior atividade da urease no solo tratado.

FENN et alii (1981) afirmam que a reação do carbonato formado a partir da hidrólise da uréia com o ion  $\text{Ca}^{2+}$ , precipitando-se na forma de  $\text{CaCO}_3$ , irá liberar sítios de adsorção para o  $\text{NH}_4^+$ . FENN & MYAMOTO (1981) observaram diminuição nas perdas de  $\text{NH}_3$  proveniente de aquamônia e uréia em solo contendo altos níveis de cálcio e magnésio solúveis, que precipitaram como  $\text{CaCO}_3$  e  $\text{MgCO}_3$ , conforme demonstraram as análises dos seus teores no final do experimento. FENN (1986) afirma ainda que o potássio pode contribuir para a redução das perdas de  $\text{NH}_3$ -uréia aplicada na superfície de solos calcários, ao deslocar o  $\text{Ca}^{2+}$  adsorvido, facilitando a adsorção de  $\text{NH}_4^+$ , por este poder ser trocado mais facilmente com o  $\text{K}^+$ . Entretanto, DAFTARDAR & SHINDE (1980) determinaram o aumento da volatilização em presença deste ion e KIEHL (1989), ao aplicar sais potássicos junto com a uréia, observou efeito ora nulo, ora estimulador das perdas.

Devido às características do complexo sortivo alterarem a magnitude da adsorção de  $\text{NH}_4^+$  e, como consequência, a concentração de  $\text{NH}_3$  em solução; sendo que esta sofre ainda influência direta do pH resultante da aplicação do adubo, a CTC de um solo nem sempre é, apenas por si, suficiente para estimar o seu potencial de perder amônia. A capacidade do solo de resistir a variações de pH vai então desempenhar um importante papel no controle da volatilização da amônia.

AVNIMELECH & LAHER (1977) afirmam que o pH inicial do solo é o fator dominante da volatilização de amônia apenas quando a capacidade tampão do solo é alta. Estes autores, em solo com pH inicial de 8,26 e valores crescentes de acidez tampão, determinaram em função desta o crescimento linear das perdas. Este efeito estimulador da evolução de amônia em meio alcalino, deve-se, segundo VLEK & STUMPE (1978), à resistência à perda de alcalinidade titulável que ocorre durante a volatilização, pela liberação de prótons para o meio:



Em solução não tamponada de sulfato de amônio com pH ajustado para 9, estes autores determinaram a perda de 37% do N até que cessasse a volatilização com a acidificação do meio. Em um solo alcalino bem tamponado, os  $\text{H}^+$  são prontamente neutralizados. Isto desloca para a direita o equilíbrio da reação [10], permitindo a continuidade da formação de  $\text{NH}_3$ . Em cinco solos com o pH inicial ajustado em torno de 8 e CTC variando de 2,9 a 28 me/100g e adubados com sulfato de amônio, fosfatos mono e diamônico ou uréia, Du PREEZ & BURGER (1986) determinaram perdas de  $\text{NH}_3$  mais elevadas para maiores valores de CTC devido às suas maiores capacidades tampão.

Em solos ácidos, o poder tampão vai apresentar um efeito inverso ao observado nos solos alcalinos. Resistindo à elevação do pH decorrente da adição de adubos de reação alcalina, como aquamônia ou uréia, vai inibir a formação de  $\text{NH}_3$ , contribuindo para a redução das perdas. O poder tampão de um solo representa a sua acidez total, que é composta pela trocável ( $\text{H}^+$  +  $\text{Al}^{3+}$  adsorvidos) e a não trocável titulável. Esta última, segundo COLEMAN & THOMAS (1967) é muito relacionada com a presença de sesquióxidos de ferro e de alumínio, cuja hidrólise libera prótons para a solução.

Polímeros de hidróxido de alumínio foram usados para elevar o poder tampão de um solo ácido, por FERGUSON et alii (1984). O solo não tratado perdeu 42% do N-uréia aplicado em superfície, enquanto que a presença dos hidróxidos reduziu a volatilização para 18%. As perdas mais baixas coincidiram com as menores elevações no pH após a adição do adubo. Repetindo o experimento, utilizando resinas acidificadas para elevar o poder tampão mantendo valores idênticos de CTC, obtiveram resultados semelhantes. IZURRALDE et alii (1987), comparando capacidades tampão e de troca catiônica em sete solos, determinaram uma relação estequiométrica de 1:1 entre a acidez titulável e a retenção de amônio. Para a predição desta, consideraram a CTC um parâmetro impreciso, devido a nem todos os sítios de troca participarem da capacidade de adsorção de  $\text{NH}_4^+$  pelo solo. BOTHA (1987), comparando a volatilização de amônia proveniente de uréia, uran e nitrocálcio em quatro solos com porcentagens de argila de 59, 49, 32 e 9,5%, determinaram o aumento das perdas em função da diminuição do teor de argila, para os três adubos. Medições de pH feitas ao final do experimento, indicaram que os efeitos observados deviam-se às diferentes capacidades tampão dos solos estudados.

Ao abordar CTC e poder tampão, é importante citar a influência exercida sobre estes fatores pelos colóides orgânicos do solo devido ao seu grande número de cargas negativas, que contribuem para a adsorção de  $\text{NH}_4^+$  e por serem grandes doadores de prótons, aumentando a resistência do solo a variações no pH. No entanto, tratando-se da adição de resíduos orgânicos, a volatilização de  $\text{NH}_3$  ocorrerá de maneiras diversas em função do seu grau de decomposição.

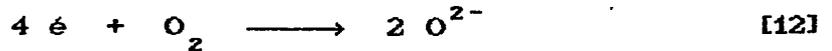
Em amostras de solo com CTC de 23,4 me/100g misturadas a palha de trigo, milho, fumo ou girassol às quais, após incubação por 15 dias, foi aplicada uréia numa dose equivalente a 250 kgN/ha, PERUCCI et alii (1982) determinaram perdas de amônia significativamente maiores do que quando o adubo foi aplicado ao solo não tratado. Explicaram que este efeito foi devido à elevação na taxa de hidrólise da uréia, com a incorporação dos resíduos. Em terreno sob cultivo mínimo, McINNES et alii (1986), aplicando mistura de uréia com nitrato de amônio, observaram que a volatilização de amônia foi maior no solo coberto com palha de trigo do que no solo descoberto. Determinaram que a atividade da urease era 20 vezes maior na palha que nos primeiros 10mm do solo. Sob condições semelhantes, KUCEY (1988), encontrou perdas de  $\text{NH}_3$  duas vezes maiores com a aplicação de uréia na palha de trigo do que sobre o solo nu. Estes trabalhos indicam que, ao estimular a hidrólise da uréia sem ao mesmo tempo contribuir para o aumento da CTC e do poder tampão do solo, a matéria orgânica não humificada estimula as perdas de  $\text{NH}_3$  deste adubo.

Um outro fato que pode contribuir para o aumento das perdas após a adição de material orgânico é a elevação do pH em decorrência da sua mineralização. MATIAZZO & GLÓRIA (1985) determinaram significativa elevação no pH de

três solos tratados com vinhaça, tendo atribuído este efeito à atividade microbiana mineralizando a matéria orgânica, de acordo com as seguintes reações:



O elétron liberado vão ser recebidos pelo oxigênio do ar:



Sendo o oxigênio um ávido receptor de prótons, vai então neutralizar  $\text{H}^+$  da solução:



A neutralização de  $\text{H}^+$  pode ocorrer ainda de maneira direta, pelos elétrons fornecidos pela MO:



Os autores acima citados confirmaram que o aumento no pH era consequência do processo de mineralização da matéria orgânica, visto que quando foi impedida a atividade microbiana em alguns tratamentos, mediante fumigação com brometo de metila, o pH do solo não sofreu alterações significativas.

Por outro lado, a adição de resíduos com boa parte da matéria orgânica já em estado coloidal aumenta a adsorção de  $\text{NH}_4^+$ , segundo PRASAD (1976). Este autor, ao incorporar torta de filtro ao solo, constatou sensível redução na quantidade de  $\text{NH}_4^+$  em solução e na volatilização de  $\text{NH}_3$  da uréia. Comportamento semelhante foi também observado por DAFTARDAR & SHINDE (1980), ao aplicar amônia anidra junto com quantidades crescentes de esterco bovino

líquido. Estas permitiram menores alterações no pH do solo e baixas quantidades de amônia volatilizada em relação ao tratamento que recebeu apenas amônia. Além do efeito tamponante, os autores atribuem as menores perdas à retenção de  $\text{NH}_3$  por fixação química, formação de humatos de amônio e adsorção a sítios de troca na fração coloidal do resíduo.

#### 2.2.4. Profundidade de aplicação do fertilizante

Quando um adubo amoniacal é aplicado na superfície do solo, a sua dissolução e/ou hidrólise, ocorrendo na interface solo/atmosfera, facilitará a volatilização de  $\text{NH}_3$ . A incorporação do fertilizante vai fazer com que o nitrogênio difunda-se por um maior volume de solo, incrementando a sua retenção pelos colóides, reduzindo assim as perdas.

FENN & KISSEL (1976) estudaram o efeito da mistura e da aplicação localizada de sulfato de amônio, a diversas profundidades, em dois substratos. Em um solo calcário arenoso com  $\text{pH} = 7,6$  e CTC de 22 me/100g, a aplicação às profundidades de 0, 2,5; 5 e 7,5 cm, ocasionou perdas de, respectivamente, 66, 52, 35 e 26% do N aplicado. Ao misturar o adubo a camadas de 0 a 2,5 cm, 0 a 5 cm e 0 a 7,5 cm de profundidade, respectivamente 60, 45 e 29% do N foi perdido por volatilização. A aplicação profunda revelou-se então mais eficiente do que a mistura. Já em solo argiloso, de  $\text{pH} = 7,6$  e CTC de 58 me/100g, a distribuição superficial ocasionou a perda de 50% do N, contra 18% quando da aplicação a 2,5 cm de profundidade. Estudando o mesmo solo, BURESH et alii (1984), observaram que 26,7% foi perdido em superfície e 16,9% com a colocação do adubo à profundidade de 2 cm.

A incorporação superficial de uréia em solo de baixa CTC também não contribuiu significativamente para a diminuição das perdas num Podzólico arenoso que recebeu calagem (MATOCHA, 1976). CONNELL et alii (1979), por sua vez, determinaram perdas 23 vezes maiores de  $\text{NH}_3$  da uréia colocada em superfície quando comparadas com a aplicação a 4 cm em um solo arenoso de pH próximo à neutralidade.

Estudando a volatilização de  $\text{NH}_3$  decorrente do uso de uréia e aquamônia aplicadas a 0, 2,5; 5 e 7,5 cm de profundidade em solo arenoso, FENN & MIYAMOTO (1981) determinaram, para a aquamônia, perdas de respectivamente 74, 52, 13 e 0% do N aplicado. A uréia perdeu 66 e 41%, em superfície e a 2,5 cm; a partir de 5 cm as perdas foram nulas. Também em solo arenoso, BANSAL & OMANWAR (1981) calcularam as perdas de  $\text{NH}_3$ -uréia, colocada a 2,5 e 5 cm de profundidade como sendo correspondentes a, respectivamente, 24 e 5% daquelas registradas com a distribuição superficial do adubo, atribuindo este efeito à menor taxa de trocas gasosas com a atmosfera quando da incorporação. RAO & BATRA (1983), determinaram em solo alcalino uma diminuição de 19% na volatilização de  $\text{NH}_3$  para cada polegada de acréscimo na profundidade de aplicação do adubo. Neste trabalho não houve diferenças entre as perdas provenientes do sulfato de amônio e da uréia em decorrência, segundo os autores, do elevado pH do solo.

No Brasil, ANJOS & TEDESCO (1973) determinaram em dois solos com CTC de 17,4 e 2,6 me/100g, perdas de, respectivamente, 15,9 e 27,9% do  $\text{NH}_3$  proveniente da uréia distribuída em superfície, enquanto que a aplicação a 2 cm de profundidade reduziu a volatilização para 0,1 e 1,4% do N aplicado.

O efeito da incorporação da uréia foi

estudado também por RODRIGUES & KIEHL (1986) em um Podzólico Vermelho-amarelo (PV) e um Latossolo Vermelho-amarelo distrófico (LVd). Em laboratório, medições diretas de amônia volatilizada do PV, para dose equivalente a 120 kgN/ha, mostraram perdas de 95% quando o adubo foi aplicado em superfície, 84 e 43,8% com a mistura do adubo a camadas de, respectivamente, 0 a 2 cm e 0 a 5 cm, e, de 29,6% com a aplicação do adubo a 5 cm de profundidade.

No mesmo trabalho, experimentos em vasos com plantas de milho, nos quais as perdas foram avaliadas de maneira indireta, mostraram que as perdas seguiram um padrão semelhante ao do teste em laboratório para o PV, embora com valores menores para a incorporação do adubo. O PV (pH 7,1; e CTC 9,49 me/100ml) e o LVd (pH 5,8 e CTC 5,04 me/100ml), na dose de 120kgN/ha perderam, respectivamente, 94,5 e 80,4% do N aplicado em superfície. Para a mistura em camadas de 0 a 2 cm e de 0 a 5 cm, as perdas foram de 65 e 18% para o PV, e, 70,1 e 65% para o LVd. A aplicação a 5 cm de profundidade, resultou em perdas de 1,4 e 34,7%, para o PV e o LVd.

Observa-se que, mesmo com a incorporação profunda do fertilizante, o LVd apresentou grande volatilização de amônia, apesar de ser um solo mais ácido. Medições feitas ao final do ensaio revelaram para este solo, um pH mais elevado resultante da aplicação do adubo, indicando a sua menor capacidade tampão quando comparado com o PV.

Du PREEZ & BURGER (1987b) trabalharam com cinco solos de CTC variando de 2,9 a 28 me/100g. Nestes, foram aplicadas doses equivalentes a 120 kg/ha de N nas formas de uréia, sulfato de amônio, fosfatos mono e diamônico (MAP e DAP) e nitrato de amônio, distribuídos em superfície, misturados aos primeiros 6 cm de solo e

aplicados a 6 cm de profundidade. Para todos os solos e adubos, as perdas foram maiores em superfície, intermediárias quando misturados, e menores com a deposição em profundidade. Também neste trabalho, observou-se que, apesar do contato mais íntimo com as partículas do solo, a mistura do adubo a este, permitindo a presença de parte do amônio próxima à superfície, controlou a volatilização com menor eficiência do que a aplicação profunda.

O comportamento de resíduos orgânicos em relação à profundidade é semelhante ao dos fertilizantes minerais, segundo ADAMSEN & SABEY (1987). Aplicando lodo de esgoto em solo areno-argiloso, estes autores determinaram a perda de 43% do nitrogênio amoniacal, com a distribuição do material na superfície do solo. A incorporação a 2,5 cm de profundidade reduziu a volatilização para apenas 0,35% do N adicionado.

Em solos inundados, a incorporação também produz resultados positivos. REDDY & PATRICK (1977) e MIKKELSEN et alii (1978), determinaram nestas condições, perdas menores com sulfato de amônio e uréia aplicados ao solo do que quando estes eram espargidos sobre a água de inundação.

Um outro componente que influencia a volatilização de  $N-NH_3$ , junto com o modo de aplicação do adubo, é a umidade do solo no momento e após a fertilização, como se verá a seguir.

### 2.2.5. Umidade do solo

A água do solo, causando a dissolução do adubo, e, no caso da uréia, permitindo a sua hidrólise; e também por ser um dos determinantes da concentração dos íons, influi diretamente no comportamento do nitrogênio no solo.

CHIN & KROONTJE (1963) aplicaram solução de carbonato de amônio (representando o produto da hidrólise da uréia) a um solo argiloso (pH 7,8 e CTC 38,8 me/100g) e a um solo arenoso (pH 4,1 e CTC 11,2 me/100g). Para ambos; encontrando-se secos no momento da aplicação, a volatilização foi significativamente maior do que quando inicialmente úmidos. Avaliando a interação entre umidade e profundidade de aplicação da uréia, OVERREIN & MOE (1967), determinaram para cada centímetro aprofundado uma redução de 15 e 23% nas perdas de um solo arenoso com umidades iniciais de respectivamente 10 e 20% em peso. Estas percentagens encontravam-se abaixo e acima da capacidade de campo (13%).

A aplicação de solução de uréia a um solo calcário de pH = 7,3 umedecido a 25, 50, e 80% da capacidade de campo (PRASAD, 1976), resultou na volatilização de respectivamente 20,6; 14,5; e 8,4% do N. O autor explica que sendo solúvel em água, o maior teor de umidade provê uma maior superfície para adsorção do  $\text{NH}_4^+$ . Observa ainda que a maior taxa de nitrificação no solo mais úmido reduz a quantidade de N amoniacal na solução. KHENGRE & SAVANT (1976) injetando  $\text{NH}_3$  anidra em um Vertissolo para avaliar a sua distribuição, observaram que o coeficiente de difusão da amônia cresceu com o aumento da umidade até a capacidade de campo, e a partir daí decresceu, devido à restrição física decorrente da diminuição da permeabilidade do solo.

Maiores perdas por volatilização com a adição de adubo em solução a solo seco foram ainda observadas por FENN & ESCARZAGA (1976). Entretanto, ao aplicar fertilizantes sólidos os efeitos variaram: amostras de Vertissolo com percentagens de água de 0 (seco em estufa), 8 (seco ao ar), 10, 13, 15, 18, 30 e 55% (saturado) e recebendo sulfato de amônio em superfície, apresentaram menores perdas a 0 e 8% de umidade, devido a estes níveis não serem suficientes para dissolver todo o adubo aplicado. As maiores volatilizações ocorreram entre os teores de 13 e 30%, sendo crescentes nesta faixa, e no saturado (55%) as perdas voltaram a diminuir. Também em estudo feito por RAO & BATRA (1983) as perdas decresceram com o aumento da umidade, da capacidade de campo até a saturação e desta para a inundação do solo.

FLEISHER et alii (1987) observaram o aumento das perdas com o decréscimo da umidade para valores abaixo da capacidade de campo, principalmente em solos arenosos. Explicam que, como a mobilidade do  $\text{NH}_3$  na fase gasosa é  $10^4$  vezes maior que na fase líquida, o solo com menor umidade, e portanto mais ar, permite maior difusão do  $\text{NH}_3$ .

Um outro ponto muito estudado é a relação entre a evaporação de água e as perdas de amônia. CHAO & KROONTJE (1964) utilizando soluções de  $\text{NH}_4\text{OH}$ , mostraram que tanto em solos argilosos como nos arenosos a taxa de volatilização de  $\text{NH}_3$  decresce com o tempo, enquanto a perda de umidade permanece constante até valores próximos à condição de terra seca ao ar, seguindo portanto funções diferentes. FENN & ESCARZAGA (1977) determinaram significativas perdas por volatilização mesmo quando a umidade do solo foi mantida constante, indicando que a diminuição da umidade não é condição necessária para que ocorra evolução de amônia. Contudo, pode haver um efeito

indireto, pois, a perda de umidade aumenta a concentração de  $\text{NH}_4^+$  (aq) e, por consequência, a de  $\text{NH}_3$ .

A adição de água ao solo após a colocação do adubo também influi na volatilização. CRAIG & WOLLUM (1982) ao aplicarem uréia na superfície de um Alfissol em floresta de pinheiros, observaram que chuvas leves, em torno de 5 mm, dissolveram o adubo mas não foram suficientes para incorporá-lo ao solo, provocando assim perdas elevadas. Chuvas de aproximadamente 30 mm diminuíram as perdas, chegando a eliminá-las em alguns casos. Também com uréia em superfície, BOUWMEESTER et alii (1985) simulando uma chuva de 10 mm, mediram volatilização de 40% do  $\text{NH}_3$  e de apenas 13% com 40 mm. No mesmo trabalho foi determinado que o aumento da umidade do solo de 21% (ponto de murcha permanente) para 31%, ocasionou um aumento de 8% na volatilização, por ter incrementado a hidrólise da uréia.

Em estudo feito por BLACK et alii (1987), aplicações de água intermitentes equivalendo a 2 mm de chuva causaram perdas muito maiores do que uma única aplicação de 16 mm, devido à incorporação da uréia ao solo no segundo caso. A adição de quantidades grandes de água, provocou uma redução pronunciada na volatilização em solo inicialmente seco, pois, a menor permeabilidade quando em capacidade de campo dificultou a incorporação da uréia. Notaram ainda que o retardamento da irrigação no solo inicialmente úmido, reduziu muito o efeito da adição de água, quando comparada com a feita imediatamente após a adubação. Afirmaram que isto se deve a (i) grande parte da volatilização já ter ocorrido e a (ii) após 48 horas predominar a forma  $\text{NH}_4^+$ , que é menos carregada em profundidade pela água do que a uréia, por possuir carga positiva, fazendo com que uma parte deste amônio fique retido próximo à superfície do solo.

Em interação com a umidade do solo, a aeração e temperatura vão também influir no comportamento da volatilização de  $\text{NH}_3$ .

### 2.2.6. Temperatura e aeração

A temperatura influi diretamente no equilíbrio entre a amônia em solução e na atmosfera ( $P_{\text{NH}_3}$ ), de acordo com a equação [15]:

$$P_{\text{NH}_3} = \text{NH}_3(\text{aq}) / K_H \quad [15]$$

O aumento na temperatura, elevando o valor da Constante de Henry ( $K_H$ ), vai provocar a diminuição na quantidade de  $\text{NH}_3(\text{aq})$  através da difusão de maiores quantidades de amônia para a fase gasosa. Baseado nisto, em estudo feito com soluções puras por VLEK & STUMPE (1978), foi estimado, numa faixa de temperatura típica de clima tropical, o aumento da ordem de 0,25% na taxa de volatilização de amônia para cada unidade de incremento na temperatura em  $^{\circ}\text{C}$ .

Em dois solos estudados por FENN & KISSEL (1974), as perdas de amônia a  $32^{\circ}\text{C}$  chegaram a ser o dobro das medidas a  $12^{\circ}\text{C}$ . Outro efeito observado foi a alteração na velocidade das perdas: A  $32^{\circ}\text{C}$  as maiores volatilizações ocorreram no primeiro dia, havendo um retardamento quando o solo foi incubado a  $12^{\circ}\text{C}$ , onde as perdas mais elevadas ocorreram em torno de 72 horas após a aplicação do adubo. Em ensaios de campo conduzidos em diferentes épocas por ANJOS E TEDESCO (1976), a aplicação superficial de uréia ocasionou perdas de 30,3; 27,7 e 24,7% em temperaturas médias de respectivamente 26, 25,3 e  $21,3^{\circ}\text{C}$ .

Um outro efeito da temperatura sobre a volatilização de amônia é devido à sua influência na

atividade biológica do solo. OVERREIN & MOE (1967), medindo a taxa de hidrólise da uréia em dois solos, notaram que, a 28°C, esta era cinco vezes maior do que a 4°C. Em floresta de clima temperado, VORONKOVA (1981) relata que o decréscimo da temperatura média, de valores entre 17 e 20°C para 10 a 14°C, reduziu pela metade as perdas de  $\text{NH}_3$  como consequência da diminuição na atividade da urease. TIKKO et alii (1987) determinaram marcantes aumentos na volatilização de  $\text{NH}_3$  com o incremento da temperatura de 10 para 22,2°C. No entanto, de 22,2 para 32,2°C não houve diferenças significativas. Isto foi atribuído a um efeito indireto da temperatura, causando perdas de umidade, reduzindo assim a taxa de hidrólise da uréia.

Como a passagem do  $\text{NH}_3$  da solução para a atmosfera ocorre em função de uma diferença de potencial entre estas duas fases, o movimento do ar, ao afastar da superfície do solo a amônia volatilizada, aumenta o gradiente de concentração de  $\text{NH}_3$  entre solo e ar, estimulando as perdas. Trabalhos em campo feitos por MAHENDREPPA & OGDEN (1973), utilizando métodos micrometeorológicos, determinaram decréscimo na volatilização de amônia proveniente da uréia, com a diminuição da velocidade do vento.

KISSEL et alii (1977), avaliando o efeito da aeração com o objetivo de calibrar um método para determinar perdas, observaram aumentos insignificantes na volatilização quando a taxa de renovação do ar era maior que 15 volumes por minuto. Afirmaram ainda que acima de 20 volumes por minuto, correspondendo a uma velocidade do vento de 0,26 km/h no sistema testado, não há mais efeito da aeração sobre as perdas. Já BOUWMEESTER et alii (1985), utilizando túnel de vento colocado sobre a superfície do solo, aumentando a aeração de 6,1 para 12,2 km/h, determinou a diminuição da

volatilização de 19 para 7,5% do N aplicado. Atribuiu a um efeito indireto da aeração: o dessecamento da superfície do solo reduzindo a taxa de hidrólise da uréia aplicada. Por outro lado, havendo suprimento normal de umidade, a velocidade do vento parece provocar um efeito crescente. Foi o que observaram FILLERY E VLEK (1986), em estudos feitos ao ar livre com sistemas abertos de captação de amônia, nos quais é relatado o crescimento linear das perdas com o aumento da velocidade do vento.

Segundo alguns autores, a umidade relativa do ar (UR) também pode influir na volatilização. HARGROVE & KISSEL (1977), aplicando sulfato de amônio sobre a superfície de um solo coberto com gramíneas, determinaram o crescimento das perdas com a elevação da UR, atribuindo o fato a uma maior dissolução do fertilizante e também à possibilidade da amônia adsorvida poder ser deslocada pelo vapor d'água. Trabalhando com uréia granulada e em solução, aplicada sobre turfa plantada com grama em condições de laboratório, TIKKO et alii (1987) determinaram para uréia em solução perdas cinco vezes maiores com 68% de UR do que a 31%. Com perdas totais muito mais elevadas do que em solução, a uréia em grão apresentou uma volatilização de  $\text{NH}_3$  54% maior na umidade mais alta, comparada com as medidas a 38% de UR.

Entretanto, REYNOLDS & WOLF (1987a) afirmam que muitas vezes se confunde efeito direto de umidade com o do dessecamento do solo. Estes autores, notaram que em um solo com umidade mantida constante em capacidade de campo (-0,033 MPa), não houve diferenças entre as perdas do  $\text{NH}_3$ -uréia nas umidades relativas do ar de 25 e 85%. Quando a umidade não era repostada ao seu valor inicial, o rápido dessecamento provocado pelo ar com 25% de UR causava a interrupção da hidrólise da uréia, tendo sido observado que,

após 12 dias, 49,8% do N aplicado no solo permanecia ainda na forma de uréia, ocasionando assim menores perdas de  $\text{NH}_3$ .

No mesmo trabalho, o solo foi incubado a 85% de UR nos primeiros 5 dias e a partir daí recebeu ar com apenas 25% de umidade. Secando rapidamente, porém após toda a uréia já haver sido hidrolisada, apresentou perdas 12% maiores que o tratamento onde a umidade foi mantida constante. A secagem do solo contendo amônia livre aumentou a sua concentração estimulando a fuga de  $\text{NH}_3$  para a atmosfera. No solo seco ( $\ll -1,5 \text{ MPa}$ ) com ar úmido a 85%, mais de 1/3 do N foi perdido em decorrência da alta UR ter permitido a hidrólise da uréia. Baseados nestes dados, os autores consideram que a umidade relativa do ar pode exercer um papel importante, quando o solo não possui umidade suficiente para promover a dissolução e/ou hidrólise do adubo ou quando, com ar seco, a água perdida pelo solo não é repostada.

### 2.3. MÉTODOS PARA DETERMINAÇÃO DAS PERDAS DE $\text{NH}_3$

Para a medição das perdas de nitrogênio na forma de amônia foram desenvolvidos diversos sistemas, que podem ser reunidos em dois grupos, de acordo com determinados critérios, os quais, em detalhada revisão sobre o tema feita por LARA CABEZAS (1987), são classificados como indireto e direto.

O critério indireto, consiste na determinação da amônia volatilizada pela diferença entre a quantidade N aplicada como adubo e o nitrogênio residual no solo, somado ao retirado pelas plantas, descontando-se o N nativo.

Metodologias baseadas neste critério foram usadas, entre outros, por NOMMIK (1973) utilizando uréia enriquecida com  $N^{15}$  como traçador, RASHID (1977), MORAGHAN et alii (1984) também com  $N^{15}$ , e SAN (1986). Para que este critério ofereça resultados precisos é necessário, segundo ANJOS & TEDESCO (1976), que o nitrogênio do solo não sofra lixiviação, imobilização, fixação ou desnitrificação e ainda que a matéria orgânica não tenha sido afetada pela aplicação do adubo nitrogenado, podendo estes fatores fazer com que as perdas sejam superestimadas.

Na determinação das perdas pelo critério direto, a volatilização é medida com o uso de aparatos que podem conter porções de terra, estar montados sobre vasos ou na superfície do solo ou ainda suspensos acima desta absorvendo o  $NH_3$ , consistindo em sistemas fechados, semi-abertos ou abertos. As dimensões e formas destes aparelhos são bastante diversas, bem como as suas maneiras de utilização.

Os absorvedores em sistemas fechados têm em comum a característica de isolarem o solo do contato com o ar atmosférico durante parte ou todo o tempo de execução do experimento. Em alguns é provocada circulação forçada de ar, como os utilizados por Du PLESSIS & KROONTJE (1964), FENN & KISSEL (1973), KISSEL et alii (1977), RODRIGUES & KIEHL (1986) ou REYNOLDS & WOLF (1987a). Outros permanecem fechados, como os instalados em campo por ANJOS & TEDESCO (1973), ou são aerados periodicamente com a abertura dos vasos, quando da substituição das soluções absorvedoras. Estes últimos foram usados em estudo de campo por LIBARDI & REICHARD (1978) e em laboratório, por OLIVEIRA (1982) e KIEHL (1989). A maioria deles são sistemas de baixo custo e que permitem a coleta de grande número de dados com rapidez.

Os sistemas semi-abertos, muito utilizados em estudos de campo, caracterizam-se por possuírem algum tipo de abertura que permita, permanentemente, o equilíbrio da atmosfera interna do aparelho com o ar exterior. Diversos pesquisadores utilizaram este tipo de sistema, entre eles, VENTURA & YOSHIDA (1977), MARSHAL & DEBEL (1980), CHITOLINA & BOARETTO (1981) e LARA CABEZAS (1987). São métodos com custos de confecção e operação geralmente baixos.

A captação de amônia volatilizada através do uso de sistemas abertos é considerada como a que fornece os dados mais precisos, visto que a aplicação desta metodologia não interfere nas condições naturais do solo nem do ambiente onde é feito o estudo, razão pela qual, vários pesquisadores têm dado preferência a este método (BEAUCHAMP et alii (1982), HARPER et alii (1983), FRENEY et alii (1985), McINNES et alii (1985), GORDON et alii (1988)). O sistema consiste em absorvedores suspensos a diversas alturas do solo que, junto com medições da velocidade do vento, vão fornecer dados da densidade de fluxo horizontal e vertical de amônia. São chamados de métodos micrometeorológicos e apresentam elevados custos de instalação, devido ao grande número de equipamentos empregados.

Estudos de perdas de amônia utilizando mais de uma metodologia, geralmente apresentam diferenças entre os valores absolutos medidos em cada sistema. Entretanto, como se observa em trabalhos de FERNANDO & ROBERTS (1975), ANJOS & TEDESCO (1976), MARSHAL & DEBELL (1980) ou SAN (1986), as tendências de resposta aos tratamentos dados ao solo, seguem funções semelhantes. Assim, mesmo sob diferentes metodologias, é válida a comparação de fatores comuns na avaliação do comportamento das perdas de  $\text{NH}_3$ .

## 2.4. COMENTÁRIOS SOBRE A LITERATURA.

Os trabalhos revisados, muitas vezes apresentando respostas diferentes para variáveis semelhantes, indicam que não há grande preponderância de um fator sobre outro na determinação das perdas de amônia, não sendo possível eleger um deles como principal.

O pH inicial exerce grande influência nas perdas de amônia, apenas se o adubo aplicado não provocar alterações no seu valor. Isto vai depender da natureza do fertilizante e do poder tampão do solo.

O aumento na dose de nitrogênio vai ocasionar perdas, com comportamentos variáveis em função das características do solo. Pode apresentar efeito exponencial em um solo arenoso, ou perdas percentuais decrescentes em decorrência de uma maior capacidade de retenção de  $\text{NH}_4^+$  em solos argilosos.

A capacidade de troca catiônica vai determinar o número de sítios de adsorção para o  $\text{NH}_4^+$  e, o poder tampão, o grau de formação deste íon em equilíbrio com o  $\text{NH}_3$ . A interação destes fatores faz com que em alguns trabalhos sejam observados aumentos nas perdas com a elevação da CTC em solos alcalinos, enquanto que em solos ácidos as altas CTC contribuem para a sua diminuição, evidenciando a importância de tais características do solo na avaliação das perdas.

A incorporação do adubo promove a diminuição da volatilização de  $\text{NH}_3$  quando comparada à distribuição em superfície. O grau de contribuição desta prática vai

depender da forma de aplicação: os trabalhos revisados indicam que a mistura dos fertilizantes a camadas de solo é menos eficiente que a sua deposição em profundidade. A profundidade recomendável vai variar de acordo com a textura do solo. Os solos arenosos exigem uma incorporação mais profunda que os argilosos, onde a deposição em torno de 2 cm praticamente elimina as perdas em muitos casos.

Em geral a aplicação de fertilizantes sólidos a um solo seco, ocasionará perdas mínimas por volatilização, devido à não ocorrência de dissolução e/ou hidrólise do adubo. No entanto, alguns trabalhos relatam perdas neste caso, em decorrência da elevada umidade relativa do ar. Adubos em solução vão ter grandes perdas pois a baixa umidade do solo vai determinar altas concentrações de N amoniacal em solução, por dificultar a sua distribuição no perfil, facilitando ainda a sua difusão na fase gasosa.

Níveis crescentes de umidade, até atingir a capacidade de campo, muitas vezes provocam a diminuição das perdas, ocasionada pela maior diluição da solução do solo. Outras vezes entretanto, a literatura também registra o aumento da volatilização. Ao que parece, este fenômeno está associado à velocidade de secagem do solo, interrompendo a hidrólise da uréia nos níveis mais baixos de umidade. Quanto à saturação e inundação do solo, as perdas são menores do que em capacidade de campo.

A temperatura exerce uma influência direta ao aumentar o valor da constante de formação de amônia e a taxa de difusão dos gases. Vai interferir ainda na atividade biológica do solo e, conseqüentemente, na hidrólise da uréia. Também pode alterar a velocidade de secagem do solo participando, indiretamente, do efeito da umidade.

A aeração vai tomar parte na determinação do gradiente de potencial entre o  $\text{NH}_3$  do solo e do ar, alterando assim a taxa de difusão de  $\text{NH}_3$ . Em estudos utilizando métodos que não permitam o equilíbrio da atmosfera da câmara de volatilização com o ar exterior, este fator pode contribuir para o mascaramento dos resultados.

As observações acima indicam que o potencial de perder amônia de um solo é resultante do efeito combinado de todos os fatores inerentes a este, ao adubo e ao ambiente. O grau de participação de cada um, em interação com os demais, é que vai diferenciar os solos quanto à susceptibilidade a este fenômeno, e indicar as práticas mais adequadas ao propósito de minimizar os seus efeitos.

Neste trabalho, elegeram-se como fatores principais a serem estudados, a umidade inicial, dose e profundidade de aplicação, associados ao uso de duas fontes nitrogenadas muito susceptíveis às perdas por volatilização, utilizando três solos de características bastante diversas entre si.

### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. DESCRIÇÃO DO APARELHO COLETOR DE AMÔNIA.

Foi desenvolvido um sistema coletor de amônia do tipo semi-aberto estático, que permite utilização tanto em estudos de laboratório como em trabalhos no campo.

Na concepção dos aparelhos, procurou-se aproveitar algumas características do sistema desenvolvido por CHITOLINA & BOARETTO (1981), tais como: Impossibilidade de escorrimento para o solo de parte do ácido colocado na câmara de absorção de amônia; existência de um orifício lateral que permite o equilíbrio da pressão interna com o exterior; fácil manuseio, devido à determinação de  $\text{NH}_3$  ser feita no próprio coletor. Visando um baixo custo de confecção, foi evitado o uso de vidraria de laboratório, com a utilização de vasilhames de vidro comum.

O aparelho construído é composto de duas partes (Figura 1). A inferior tem formato de funil, com diâmetro das extremidades de 14,4 e 7,5 cm e altura de 9 cm, obtido através do corte de um pote de vidro com capacidade para 3,0 litros, utilizando-se a parte superior, ou seja, a boca do frasco. Sobre esta, envolvendo a abertura, é colocado um recipiente de 9,7 cm de diâmetro interno e 9,0 cm de altura, feito com garrafa usada da qual foi descartada

a parte superior. As duas partes são coladas com borracha de silicone, o que confere completa vedação e rigidez ao conjunto.

Para permitir o equilíbrio da pressão no interior da câmara com a do ambiente externo, é aberto um orifício com 0,5 cm de diâmetro, 3,5 cm acima da junção entre as duas partes. Neste, coloca-se um tubo plástico de 0,3 cm de diâmetro e 10 cm de comprimento, que passa cerca de 1,0 cm além da parede interna da câmara, ficando o restante na parte inferior, curvada para baixo. O detalhe da colocação do tubo adentrando em 1,0 cm o aparelho, impede perdas da solução colocada no coletor e/ou de água condensada em sua parede interna. O comprimento da outra extremidade visa eliminar a possibilidade de perdas durante a titulação. A fixação deste tubo também é feita com borracha de silicone, completando a montagem do aparelho.

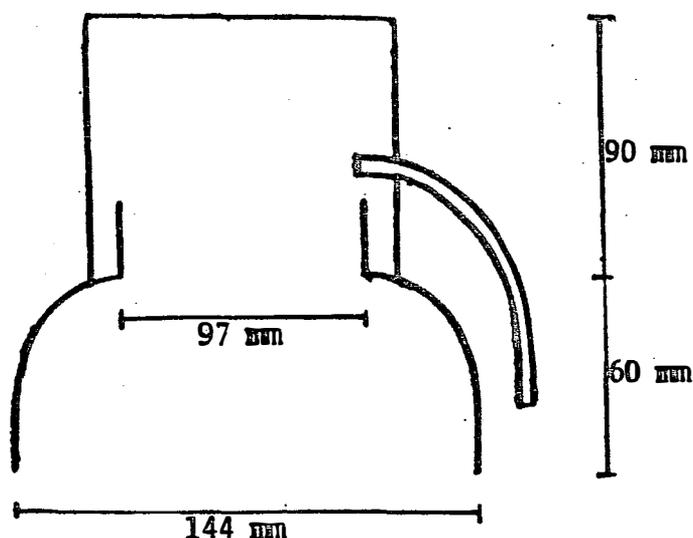


Figura 2. Corte vertical do aparelho coletor de amônia.

Quando da sua utilização, coloca-se no teto do coletor cerca de 3 gramas de lã de vidro ou lâminas de

papel de filtro, embebendo-as em seguida com quantidade determinada de ácido sulfúrico padronizado. A opção por lã de vidro ou papel de filtro será discutida adiante. O aparelho pode então ser colocado sobre o solo no campo, ou acoplado a um vaso com diâmetro similar à sua abertura, conforme exemplo mostrado na Figura 3, onde o vaso utilizado foi feito com a base do pote cuja boca foi retirada para a confecção do coletor.



Figura 3. Coletor de amônia sendo acoplado a um vaso contendo solo.

A determinação do  $\text{NH}_3$  volatilizado é feita

através da titulação do excesso de ácido, que não foi neutralizado pela amônia, juntando-se um indicador e cerca de 100 ml de água destilada. Esta operação é realizada no próprio aparelho, conforme mostra a Figura 4. Pode-se também retirar o conteúdo do aparelho e determinar o N recuperado por destilação em meio alcalino.



Figura 4. Vista dos coletores de amônia, antes (esquerda) e depois da titulação (direita).

### 3.2. CALIBRAÇÃO DO MÉTODO

Para determinar a eficiência do sistema desenvolvido, foram montados quatro experimentos, nos quais os coletores de amônia foram acoplados a vasos de vidro com capacidade para 2300 ml, iguais ao mostrado na Figura 3.

Dentro de cada vaso foram colocados copos de 50 ml contendo quantidades crescentes de nitrogênio em solução, na forma de sulfato de amônio, discriminadas na Tabela 1. A volatilização de amônia foi forçada através da adição de 5 ml de solução de hidróxido de sódio a 5% no experimento 1, e a 10% nos experimentos 2, 3 e 4. No final de cada ensaio, o conteúdo dos copos foi destilado em meio alcalino para determinar o nitrogênio residual, e, por diferença, o  $\text{NH}_3$  efetivamente volatilizado.

A eficiência do aparelho foi calculada pela relação entre a amônia volatilizada e a quantidade recuperada pelo sistema, sendo expressa em porcentagem. Todos os tratamentos foram realizados com três repetições, e, além destes, foram montados conjuntos onde não se colocava nitrogênio para volatilizar, servindo assim de prova em branco. A seguir é feito o detalhamento das especificidades de cada ensaio.

Tabela 1. Quantidades de nitrogênio utilizadas nos testes de eficiência dos coletores de amônia.

Experimento	mg N colocados					
	N1	N2	N3	N4	N5	N6
1	2,167	4,333	8,666	17,332	-	-
2	8,623	11,498	14,258	-	-	-
3	8,526	17,053	34,106	51,038	68,211	-
4	8,526	17,053	34,106	68,212	136,424	272,848

O experimento de número 1, teve quatro tratamentos, com níveis de nitrogênio variando de 2,167 a 17,332 mg. Os coletores continham 2,5 gramas de lã de vidro embebida em solução de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,997 N. Após 48 horas, os conjuntos foram abertos e a lã de vidro transferida para

tubos de Micro Kjeldahl de 200 ml junto com a água restante da lavagem do coletor, fazendo-se então a destilação em meio alcalino. A amônia foi recebida em solução de ácido bórico a 4% com os indicadores vermelho de metila e bromocresol verde, a qual foi titulada com  $H_2SO_4$  0,0876 N, determinando assim o nitrogênio recuperado pelo sistema.

Os experimentos 2, 3 e 4 tiveram três, cinco e seis tratamentos, com níveis de nitrogênio variando de 8,623 a 232,848 miligramas. Os coletores continham duas lâminas de papel de filtro embebidas em 5 ml de solução de ácido sulfúrico 0,4882 e 0,9919 para os experimentos 2 e 3, respectivamente. No de número 4, o papel de filtro foi embebido em 5 ml de  $H_2SO_4$  2,0386 N para os quatro primeiros níveis de nitrogênio e 4,0249 N para os dois últimos. Após dez dias foram feitas as determinações da amônia recuperada, titulando-se o excesso de ácido com soluções de hidróxido de sódio 0,0954 N, 0,1146 N e 0,2376 N. Como indicador foi usada mistura de vermelho de metila com bromocresol verde, por esta permitir melhor visualização do ponto de viragem. A titulação foi feita dentro do aparelho coletor.

### 3.3. ESTUDO DAS PERDAS DE AMÔNIA EM TRÊS SOLOS

#### 3.3.1. Descrição geral

Foram utilizadas duas fontes de nitrogênio – aquamônia e uréia em grão – para avaliar o efeito da dose, profundidade de aplicação do fertilizante e umidade inicial do solo nas perdas de  $NH_3$  por volatilização.

O trabalho consistiu de seis experimentos

instalados em casa de vegetação, com os seguintes solos:

i) Latossolo Roxo álico (DEMATTE 1973), proveniente de área de canavial da Usina da Barra S/A, Município de Barra Bonita - SP, equivalente na classificação americana (SOIL SURVEY STAFF, 1987) a Acrorthox.

ii) Areia Quartzosa distrófica (AQ), (DEMATTE, 1973) também retirada em área de canavial da Usina da Barra S/A, Município de Barra Bonita - SP. Equivale, segundo SOIL SURVEY STAFF (1987) a Quartzipsament.

iii) Vertissolo (V) procedente da Estação Experimental Regional do Recôncavo Baiano do IAA/PLANALSUCAR Município de São Sebastião do Passé - BA, coletado no terço médio de uma encosta de relêvo suavemente ondulado, em área de canavial, similar ao classificado em local próximo por SILVA & LEÃO (1976), como Aquic Chromuderts.

Os solos foram secos ao ar e peneirados em malha de 4 mm. As análises granulométricas foram feitas na Coordenadoria Regional Sul do IAA / PLANALSUCAR - Araras, SP. As análises químicas, no setor de química analítica do Departamento de Química - ESALQ / USP. A medição do pH em água e CaCl<sub>2</sub> utilizou a relação solo : solução de 1:2,5. O fósforo foi extraído pelo método da resina; o potássio com solução 0,05 N de H<sub>2</sub>SO<sub>4</sub>; Ca, Mg e Al com KCl 1N a pH = 7; H<sup>+</sup> + Al<sup>3+</sup> com solução tampão SMP a pH = 7,5. A CTC foi determinada com extrato de solo em acetato de amônio 1N a pH = 7, titulado com EDTA 0.01 M. Na Tabela 2, são apresentadas algumas de suas características físicas e químicas.

Os estudos com uréia constaram de experimentos fatoriais 3 X 3 X 3 para dose, umidade inicial e profundidade de aplicação, respectivamente. Os ensaios com

aquamônia foram fatoriais 3 X 3 X 2 para dose, umidade e profundidade. Todos os tratamentos foram repetidos três vezes.

Tabela 2. Principais características físicas e químicas dos solos empregados.

Solos		Latossolo Roxo álico (LRa)	Areia Quartzosa distrófica (AQ)	Vertissolo (V)
Areia		43	86	16
Silte	%	8	3	27
Argila		49	11	57
pH água		4,2	6,6	6,4
pH CaCl <sub>2</sub>		4,0	5,3	6,2
C %		0,47	0,47	0,90
P		14	7	18
K	ppm	96	200	168
Ca		1,10	1,40	28,80
Mg		0,50	0,20	11,00
Al		1,20	0,05	traços
H + Al	emg /	8,0	2,4	2,2
S	100g	1,85	2,11	40,23
T		9,85	4,51	42,43
CTC		9,0	4,9	50,1
V %		19	47	95

Os solos eram acondicionados em vasos de vidro com 2300 ml de capacidade e diâmetro de 14,4 cm, em quantidade suficiente para a obtenção de uma coluna de solo com 13 cm de altura, variando em peso de acordo com o solo utilizado, exceto no experimento com uréia no vertissolo, onde a coluna de solo tinha 9 cm, devido à menor disponibilidade de material.

No cálculo da quantidade de fertilizante a aplicar, foi considerado o efeito de concentração causado pela adubação em linha, comum à maioria das culturas. Foi escolhida como referência a da cana-de-açúcar, na qual, quando plantada no espaçamento de 1,40 m, existem 7142,86 metros lineares de sulco. Considerando o diâmetro do vaso (0,144 m), calculou-se inicialmente a quantidade proporcional de uréia a ser colocada.

O raciocínio acima conduziria a uma quantidade de 2,24 g de uréia por vaso, na dose de 50 kg N/ha. No entanto, este cálculo foi corrigido, considerando que a linha de adubação não é unidimensional: ocupa uma faixa de solo de largura variável. Para este trabalho, foi arbitrada a largura em 14,4 cm, por ser este o diâmetro do coletor. Calcula-se então uma área com comprimento e largura iguais a 14,4 cm. Esta, receberia a quantidade de uréia determinada no cálculo feito para a linha. Como a seção do vaso é circular, ocupando assim uma área menor do que a da faixa, a proporção entre eles vai determinar a quantidade de uréia a ser colocada, resultando no caso em 1,76 g de uréia por vaso para a dose de 50 kg N/ha e 3,52 g para 100 kg N/ha.

Para aquamônia, foram usadas soluções em volumes e concentrações que fornecessem níveis de nitrogênio com valores próximos aos aplicados por meio de uréia, nas

respectivas doses.

Nos tratamentos com dose de nitrogênio igual a zero, não existem diferenças a serem estudadas em função da profundidade. Contudo, para atender à exigência do modelo estatístico, foram montados tratamentos correspondentes para a dose zero; nas profundidades de 5 e 10 cm para aquamônia, e, 0, 2,5 e 5 cm nos experimentos com uréia. Na verdade, todos estes constaram de testemunhas com solo, sem adubo e em três diferentes umidades iniciais.

Nos tratamentos com solo seco ou em capacidade de campo (determinada segundo FERNANDES & SYKES, 1968), a pesagem da terra era feita diretamente dentro do vaso. No segundo caso, adicionava-se em seguida a quantidade de água destilada necessária para que o solo atingisse a capacidade de campo (CC). Nos tratamentos com umidades abaixo da CC, o solo era previamente pesado em bandeja, recebia a quantidade de água indicada para o tratamento, sendo então misturado intimamente para que o teor de umidade fosse uniforme em toda a amostra. Após este processo, eram transferidos para os vasos.

Nos experimentos com uréia, esta era uniformemente distribuída sobre o solo, por toda a área dos vasos. Nos tratamentos em profundidade era colocada parte do solo, distribuída a uréia e, em seguida, completado o volume da terra com camada suficiente para se obter a profundidade de aplicação desejada. Imediatamente após ser feita a aplicação do fertilizante, os coletores de amônia eram acoplados aos vasos, fixados com fita adesiva e transferidos para a casa de vegetação, onde eram distribuídos em blocos ao acaso.

Para os estudos com aquamônia, cada vaso

possuía um orifício lateral, em altura que permitia a injeção da solução a 5 ou 10 cm abaixo da superfície do solo. Estes orifícios foram previamente vedados com borracha de silicone, para evitar o vasamento da solução de amônia após a aplicação (ver Figura 5).



Figura 5. Coletor montado sobre vaso com solo. A seta indica o orifício para injeção de aquamônia a 5 cm de profundidade.

Os coletores eram montados sobre os vasos com solo e em seguida aplicava-se a aquamônia. Para tanto, foi usado um tubo de aço inoxidável com calibre de 1 mm e

comprimento de 16 cm, suficiente para atravessar todo o diâmetro do vaso. O tubo era acoplado a uma seringa hipodérmica de uso veterinário previamente aferida, e a solução aplicada da seguinte maneira: introduzia-se o tubo perpendicularmente à parede do vaso até que este atingisse a extremidade oposta ao orifício; era então retirado lentamente, enquanto se injetava a solução no volume indicado para o tratamento, permitindo assim uma distribuição uniforme da aquamônia em linha paralela à superfície do solo. Em seguida, os conjuntos eram levados para a casa de vegetação, sendo distribuídos também em blocos casualizados.

A Figura 6 apresenta uma vista geral da distribuição dos conjuntos dentro da casa de vegetação.



Figura 6. Distribuição dos conjuntos vasos-coletores na casa de vegetação

Os coletores de amônia continham dois ou três discos de papel de filtro com 11 cm de diâmetro, embebidos com 5 ou 10 ml de solução padronizada de ácido sulfúrico. A combinação entre número de discos, volume e normalidade do  $\text{H}_2\text{SO}_4$ , era definida de acordo com a expectativa de volatilização máxima de amônia em função dos tratamentos, estimada em testes preliminares e com a observação do comportamento das perdas no decorrer do experimento.

A cada dois dias os aparelhos coletores de amônia eram substituídos, salvo em casos nos quais as grandes perdas exigiam trocas diárias. Esta operação era feita rapidamente, com a cobertura do vaso pelo novo coletor simultânea à retirada do antigo (rever Figura 3), fazendo com que o vaso ficasse descoberto por um tempo de, no máximo, 2 segundos.

Os coletores retirados eram levados para o laboratório, onde recebiam cerca de 150 ml de água destilada, e 4 gotas de mistura dos indicadores bromocresol verde e vermelho de metila. Fazia-se então a titulação do excesso de ácido, com solução padronizada de hidróxido de sódio, dentro do próprio aparelho, mantendo-o sob agitação durante todo o processo, até a viragem do indicador mudando da cor vermelha para azul.

A quantidade de amônia recuperada era calculada pela diferença entre o número de equivalentes ácidos iniciais e remanescentes. O valor inicial era determinado através da titulação de três provas em branco, que consistiam de coletores instalados sobre vasos sem solo, utilizando-se a média das três repetições.

### 3.3.2. Estudos com Latossolo Roxo álico

#### 3.3.2.1. Experimento com aquamônia

Neste experimento, cada vaso recebeu 2300 g de solo. Nos tratamentos com dose de nitrogênio de 54,5 e 109 kg / ha, foram injetados nos vasos respectivamente 10,2 e 20,4 ml de solução de amônia 6,0524 N (12,10%). A Tabela 3 descreve em detalhe os tratamentos empregados. A duração do experimento foi de 10 dias.

Os coletores de amônia continham três discos de papel de filtro embebidos com 10 ml de solução de  $H_2SO_4$  2,0507 N. A substituição dos coletores era feita a cada 2 dias. A titulação do excesso de ácido foi efetuada com soluções de NaOH de concentrações próximas a 1 N, que eram padronizadas diariamente.

#### 3.3.2.2. Experimento com uréia

Utilizou-se as mesmas quantidades de solo por vaso e papel de filtro nos coletores, bem como as mesmas soluções de  $H_2SO_4$  e NaOH do experimento com aquamônia. O ensaio foi conduzido durante 8 dias.

Nos tratamentos com dose de nitrogênio de 50 e 100 kg/ha, foram aplicados respectivamente 1,76 e 3,52 g de uréia por vaso. As determinações da amônia volatilizada também eram feitas a cada 2 dias. A descrição dos tratamentos deste experimento encontra-se na Tabela 4.

Tabela 3. Descrição dos tratamentos do estudo com aquamônia no Latossolo Roxo álico.

Tratamento	---- Dose ----		Profundidade (cm)	Umidade <sup>1</sup> % CC
	kgN/ha	mgN/vaso		
NO 5cm 0%	0	0	-	0
NO 5cm 50%	0	0	-	50
NO 5cm 100%	0	0	-	100
NO 10cm 0%	0	0	-	0
NO 10cm 50%	0	0	-	50
NO 10cm 100%	0	0	-	100
N1 5cm 0%	54,5	864	5	0
N1 5cm 50%	54,5	864	5	50
N1 5cm 100%	54,5	864	5	100
N1 10cm 0%	54,5	864	10	0
N1 10cm 50%	54,5	864	10	50
N1 10cm 100%	54,5	864	10	100
N2 5cm 0%	109	1728	5	0
N2 5cm 50%	109	1728	5	50
N2 5cm 100%	109	1728	5	100
N2 10cm 0%	109	1728	10	0
N2 10cm 50%	109	1728	10	50
N2 10cm 100%	109	1728	10	100

1: % CC = Porcentagem da capacidade de campo.  
Valores iguais a zero = Terra seca ao ar.

Tabela 4. Descrição dos tratamentos dos estudos com uréia no Latossolo roxo álico e na Areia quartzosa.

Tratamento	---- Dose ----		Profundidade (cm)	Umidade <sup>1</sup> % CC
	gN/ha	mgN/vaso		
N0 0cm 0%	0	0	-	0
N0 0cm 50%	0	0	-	50
N0 0cm 100%	0	0	-	100
N0 2,5cm 0%	0	0	-	0
N0 2,5cm 50%	0	0	-	50
N0 2,5cm 100%	0	0	-	100
N0 5cm 0%	0	0	-	0
N0 5cm 50%	0	0	-	50
N0 5cm 100%	0	0	-	100
N1 0cm 0%	50	792	0	0
N1 0cm 50%	50	792	0	50
N1 0cm 100%	50	792	0	100
N1 2,5cm 0%	50	792	2,5	0
N1 2,5cm 50%	50	792	2,5	50
N1 2,5cm 100%	50	792	2,5	100
N1 5cm 0%	50	792	5	0
N1 5cm 50%	50	792	5	50
N1 5cm 100%	50	792	5	100
N2 0cm 0%	100	1584	0	0
N2 0cm 50%	100	1584	0	50
N2 0cm 100%	100	1584	0	100
N2 2,5cm 0%	100	1584	2,5	0
N2 2,5cm 50%	100	1584	2,5	50
N2 2,5cm 100%	100	1584	2,5	100
N2 5cm 0%	100	1584	5	0
N2 5cm 50%	100	1584	5	50
N2 5cm 100%	100	1584	5	100

1: % CC = Porcentagem da capacidade de campo.  
Valores iguais a zero = Terra seca ao ar.

### 3.3.3. Estudos com Areia Quartzosa distrófica

#### 3.3.3.1. Experimento com aquamônia

Em cada vaso foram colocados 2700 g de solo. As doses de 51,5 e 103 kg N/ha corresponderam à injeção de respectivamente 10,2 e 20,4 ml de solução 5,7177 N (11,44%) de  $\text{NH}_4\text{OH}$ . A duração do experimento foi de 14 dias. A descrição dos tratamentos encontra-se na Tabela 5.

Os coletores continham três discos de papel de filtro embebidos com 10 ml de solução de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  2,4011 N nos primeiros 8 dias, e 0,8214 N no período restante. A aferição da normalidade era feita titulando a NaOH contra a solução padronizada de  $\text{H}_2\text{SO}_4$ .

As perdas de amônia eram medidas a cada 2 dias, com exceção do tratamento "N2 5cm 0%", onde onde os coletores foram substituídos a cada 24 horas, nos primeiros 4 dias. Neste caso, quando da análise dos dados, utilizou-se os resultados das somas do primeiro com o segundo dia, e do terceiro com o quarto dia.

#### 3.3.3.2. Experimento com uréia

As mesmas quantidades de solo, papel de filtro,  $\text{H}_2\text{SO}_4$  e NaOH do experimento com aquamônia, foram usadas neste ensaio. Os tratamentos são iguais ao do Latossolo Roxo álico com uréia, descritos na Tabela 3. A duração do experimento foi de 14 dias.

No tratamento "N2 0cm 50%", os coletores foram trocados a cada 24 horas nos primeiros 4 dias.

Tabela 5. Descrição dos tratamentos do estudo com aquamônia na Areia Quartzosa.

Tratamento	---- Dose ----		Profundidade (cm)	Umidade <sup>1</sup> % CC
	gN/ha	mgN/vaso		
NO 5cm 0%	0	0	-	0
NO 5cm 50%	0	0	-	50
NO 5cm 100%	0	0	-	100
NO 10cm 0%	0	0	-	0
NO 10cm 50%	0	0	-	50
NO 10cm 100%	0	0	-	100
N1 5cm 0%	51,5	816	5	0
N1 5cm 50%	51,5	816	5	50
N1 5cm 100%	51,5	816	5	100
N1 10cm 0%	51,5	816	10	0
N1 10cm 50%	51,5	816	10	50
N1 10cm 100%	51,5	816	10	100
N2 5cm 0%	103	1633	5	0
N2 5cm 50%	103	1633	5	50
N2 5cm 100%	103	1633	5	100
N2 10cm 0%	103	1633	10	0
N2 10cm 50%	103	1633	10	50
N2 10cm 100%	103	1633	10	100

1: % CC = Porcentagem da capacidade de campo.

Valores iguais a zero = Terra seca ao ar.

### 3.3.4. Estudos com Vertissolo

Nestes estudos, os tratamentos com solo seco ao ar, foram substituídos pela adição de água a 10% da capacidade de campo.

#### 3.3.4.1. Experimento com aquamônia

A discriminação dos tratamentos deste ensaio encontra-se na Tabela 6. Foram utilizados 2000 g de solo por vaso. Nas doses de nitrogênio correspondentes a 42,7 e 85,4 kg/ha, foram injetados no solo respectivamente 10,2 e 20,4 ml de solução de amônia 4,7382 N (9,48%). A duração foi de 12 dias.

Nos primeiros dois dias, os coletores continham três discos de papel de filtro embebidos em 10 ml de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  1,0384 N. Do segundo ao quarto dias, utilizou-se 2 discos de papel de filtro com 5 ml do mesmo ácido. Em ambos os casos, a titulação foi feita com NaOH 0,32 N. A partir do quarto dia e até o final do experimento, as duas lâminas de papel de filtro foram embebidas com 5 ml de  $\text{H}_2\text{SO}_4$  0,5239 N, e a titulação feita com NaOH 0,16 N. A soda era padronizada diariamente. Os coletores foram substituídos de 2 em 2 dias.

#### 3.3.4.2. Experimento com uréia

Neste experimento, cada vaso recebeu 1400 g de solo, o que resultou numa coluna de 9 cm de altura. Foram adotados os mesmos procedimentos do experimento com aquamônia quanto a soluções, papel de filtro e periodicidade das determinações. Nas doses de 50 e 100 kgN/ha foram aplicados 1,76 e 3,52 g de uréia por vaso. A Tabela 7

detalha os tratamentos empregados neste ensaio, que foi conduzido por 18 dias.

Tabela 6. Descrição dos tratamentos do estudo com aquamônia no Vertissolo.

Tratamento	--- Dose ----		Profundidade (cm)	Umidade <sup>1</sup> % CC
	kgN/ha	mgN/vaso		
N0 5cm 0%	0	0	-	10
N0 5cm 50%	0	0	-	50
N0 5cm 100%	0	0	-	100
N0 10cm 0%	0	0	-	10
N0 10cm 50%	0	0	-	50
N0 10cm 100%	0	0	-	100
N1 5cm 0%	42,7	676	5	10
N1 5cm 50%	42,7	676	5	50
N1 5cm 100%	42,7	676	5	100
N1 10cm 0%	42,7	676	10	10
N1 10cm 50%	42,7	676	10	50
N1 10cm 100%	42,7	676	10	100
N2 5cm 0%	85,4	1353	5	10
N2 5cm 50%	85,4	1353	5	50
N2 5cm 100%	85,4	1353	5	100
N2 10cm 0%	85,4	1353	10	10
N2 10cm 50%	85,4	1353	10	50
N2 10cm 100%	85,4	1353	10	100

1: % CC = Porcentagem da capacidade de campo.

Tabela 7. Descrição dos tratamentos do estudo com uréia  
Vertissolo

Tratamento	---- Dose ----		Profundidade (cm)	Umidade % CC <sup>1</sup>
	gN/ha	mgN/vaso		
NO 0cm 0%	0	0	-	10
NO 0cm 50%	0	0	-	50
NO 0cm 100%	0	0	-	100
NO 2,5cm 0%	0	0	-	10
NO 2,5cm 50%	0	0	-	50
NO 2,5cm 100%	0	0	-	100
NO 5cm 0%	0	0	-	10
NO 5cm 50%	0	0	-	50
NO 5cm 100%	0	0	-	100
N1 0cm 0%	50	792	0	10
N1 0cm 50%	50	792	0	50
N1 0cm 100%	50	792	0	100
N1 2,5cm 0%	50	792	2,5	10
N1 2,5cm 50%	50	792	2,5	50
N1 2,5cm 100%	50	792	2,5	100
N1 5cm 0%	50	792	5	10
N1 5cm 50%	50	792	5	50
N1 5cm 100%	50	792	5	100
N2 0cm 0%	100	1584	0	10
N2 0cm 50%	100	1584	0	50
N2 0cm 100%	100	1584	0	100
N2 2,5cm 0%	100	1584	2,5	10
N2 2,5cm 50%	100	1584	2,5	50
N2 2,5cm 100%	100	1584	2,5	100
N2 5cm 0%	100	1584	5	10
N2 5cm 50%	100	1584	5	50
N2 5cm 100%	100	1584	5	100

1: % CC = Porcentagem da capacidade de campo.

### 3.4. TRATAMENTO ESTATÍSTICO DOS DADOS

#### 3.4.1. Calibração do método

Nos experimentos visando determinar a eficiência do sistema coletor de amônia volatilizada, foram determinadas média, erro padrão da média e coeficiente de variação dos dados obtidos.

#### 3.4.2. Estudos de perdas em três solos

Em todos os experimentos com solo, foram realizadas análises da variância para perdas totais em mg de N e em porcentagem do N aplicado.

Nos experimentos com aquamônia, para perdas de N em mg, fez-se análises de regressões polinomiais para o efeito da dose de nitrogênio e da umidade inicial do solo. O efeito da profundidade de aplicação do adubo, foi determinado através do teste de Tukey para comparação de médias, ao nível de 95% de probabilidade.

Nos experimentos com uréia, os efeitos de dose, profundidade e umidade do solo nas perdas de N em mg, foram avaliados por meio de análises de regressões polinomiais.

Em todos os experimentos, as perdas expressas em porcentagem do N aplicado, foram analisadas apenas para o efeito da dose, mediante a aplicação do teste de Tukey a 95% de probabilidade.

## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1. EFICIÊNCIA DO MÉTODO

A Tabela 8 mostra os resultados obtidos para recuperação de nitrogênio determinada por destilação do conteúdo dos coletores, que utilizaram lã de vidro como suporte para o ácido sulfúrico.

Tabela 8. Quantidades médias de nitrogênio recuperadas no experimento 1.

Colocados mg N	Volatilizados		Recuperados -- mg N --	C.V. Eficiência	
	%	-- mg N --		----- % -----	
2,167	81,1	1,758 ± 0,041	1,574 ± 0,123	13,49	89,30
4,333	85,8	3,720 ± 0,133	3,516 ± 0,163	8,05	94,42
8,666	71,9	6,234 ± 0,020	5,662 ± 0,108	3,30	90,81
17,332	85,0	14,737 ± 0,584	13,960 ± 0,128	1,58	94,99
Média	-	-	-	-	92,38

Os dados mostram a elevada eficiência do sistema, capaz de recuperar quantidades em torno de 90% da amônia volatilizada. Comparando os coeficientes de variação, nota-se que para as menores quantidades de N, o sistema perde um pouco a sua precisão, devido à influência dos erros

de determinação (erro relativo na concentração) nos resultados finais.

Observa-se ainda que parte da amônia colocada não volatilizou com a adição de 5 ml de NaOH a 5%, após 48 horas. Por esta razão, os experimentos 2, 3, e 4 foram conduzidos por dez dias, aumentando-se a concentração de NaOH para 20%, visando garantir a perda de toda a amônia colocada.

Embora o uso de lã de vidro e a determinação do nitrogênio recuperado por destilação satisfaçam às exigências do sistema quanto à eficiência, contraria um dos seus principais objetivos, que é a facilidade de operação. A lã de vidro apresenta reação alcalina, consumindo parte do ácido nela colocado, tornando necessário o uso de quantidades iguais, para evitar erros. Isto exige a pesagem exata de cada porção de lã, trabalho este que consome um certo tempo. Soma-se a este problema, o incômodo manuseio deste material.

A determinação do nitrogênio por destilação, além do maior dispêndio de tempo, reagentes e equipamento, pode se constituir numa fonte de erros, causados por perdas decorrentes da retirada do material e lavagem do coletor.

A utilização de papel de filtro e a determinação do nitrogênio recuperado por titulação do excesso de ácido sulfúrico, feitas nos experimentos 2, 3, e 4, permitiu a obtenção dos melhores resultados, mostrados na Tabela 9. Nesta, Os dados apresentam-se mais uniformes, conforme indicado pelos baixos coeficientes de variação. Os valores obtidos para porcentagem de recuperação de N (eficiência) são ainda maiores do que no primeiro experimento e próximos a 100%, devido às determinações terem

sido feitas dentro do próprio coletor, evitando perdas decorrentes do manuseio.

Tabela 9. Quantidades médias de nitrogênio recuperadas, determinadas por titulação do excesso de ácido.

----- mg N -----		----- % -----		
Colocados	Volatilizados	Recuperados	C.V.	Eficiência
E X P E R I M E N T O 2				
8,623	8,509 ± 0,000	8,233 ± 0,045	0,94	96,76
11,498	11,383 ± 0,000	11,203 ± 0,061	0,94	98,41
14,372	14,258 ± 0,000	13,840 ± 0,311	3,90	97,07
MÉDIA	-	-	-	97,41
E X P E R I M E N T O 3				
8,526	8,466 ± 0,003	7,235 ± 0,154	3,65	86,58
17,053	16,986 ± 0,009	15,869 ± 0,133	1,46	93,43
34,106	34,048 ± 0,000	32,112 ± 0,452	2,43	94,31
51,158	51,038 ± 0,021	48,487 ± 0,442	1,58	95,03
68,212	68,049 ± 0,044	63,265 ± 0,885	2,42	92,97
MÉDIA	-	-	-	92,46
E X P E R I M E N T O 4				
8,526	8,486 ± 0,000	8,649 ± 0,000	0,00	101,91
17,053	17,013 ± 0,000	16,188 ± 0,222	2,37	95,15
34,106	34,045 ± 0,000	34,040 ± 0,293	1,49	99,98
68,212	68,151 ± 0,000	66,639 ± 0,111	0,29	97,78
136,424	136,343 ± 0,007	133,430 ± 0,111	0,14	97,91
272,848	272,740 ± 0,007	265,114 ± 0,508	0,33	97,20
Média	-	-	-	98,32

A montagem e a coleta dos dados dos experimentos tornou-se mais simples e rápida, demandando

menos tempo e recursos materiais, indicando que a maneira ideal de utilizar o sistema coletor de amônia idealizado é com papel de filtro embebido em solução de ácido, titulando dentro do mesmo o excesso que não reagiu com a amônia.

Nos experimentos 2, 3 e 4, a quantidade de amônia que volatilizou dos copos foi de, em média, 99,5% do N colocado, indicando que os 5 ml de NaOH na concentração de 20% foram suficientes para provocar a perda de praticamente toda a amônia.

No experimento 4, a recuperação de 101,9% para o nível de 8,5 mg de N é explicada pela concentração do ácido utilizado que, devendo atender a uma faixa mais larga de nitrogênio a ser recuperada, torna menos precisas as determinações em valores muito baixos, devido ao proporcionalmente maior erro analítico. Este, pode ser para mais ou para menos, como se observa no mesmo tratamento do experimento 3, onde se determinou a mais baixa eficiência. Para evitar este inconveniente, podem ser usadas soluções ácidas de variadas concentrações, de acordo com a expectativa de perda de amônia em cada estudo.

Os níveis de nitrogênio volatilizados, de até 265,114 mg, mostram a larga amplitude de atuação deste método. Estudos com níveis abaixo ou acima destes, poderão ser realizados, desde que seja feito um ensaio prévio, em laboratório, para aferir a eficiência na faixa desejada.

Uma característica muito favorável deste coletor é a parte inferior em forma de funil, que impede o escorrimento para fora da água formada por condensação na sua parte superior, à qual, se mistura por difusão, parte do ácido colocado no papel de filtro. Esta solução, ficando retida no corpo do aparelho, evita os erros decorrentes das

perdas de ácido e amônia por ele neutralizada, o que poderia também alterar as condições iniciais do substrato em estudo.

## 4.2. ESTUDOS COM LATOSSOLO ROXO ÁLICO

Os valores obtidos para volatilização de amônia neste e nos demais experimentos, não foram objeto de nenhum tipo de correção que trouxesse os dados para valores correspondentes a uma eficiência de 100% do método de captação de amônia, como a feita, por exemplo, por LARA CABEZAS (1987). Tal prática foi dispensada no presente trabalho devido ao objetivo destes experimentos ter sido o de detectar tendências de perdas em função dos tratamentos empregados, visto que, sendo conduzidos em vasos, os valores absolutos não devem ser extrapolados para outras condições.

Assim sendo, os valores considerados são os efetivamente medidos nas parcelas experimentais, tendo sido relacionados diretamente com as quantidades de nitrogênio aplicadas ao solo.

### 4.2.1. Experimento com aquamônia

#### 4.2.1.1. Perdas diárias

Os valores médios para as perdas de nitrogênio neste experimento são apresentados na Tabela 21 do APÊNDICE. As figuras 7 e 8 ilustram o comportamento da volatilização de  $\text{NH}_3$  no decorrer do experimento. A discussão dos efeitos da dose, umidade inicial do solo e profundidade

de aplicação do fertilizante serão discutidos detalhadamente em itens subseqüentes. Os tratamentos que não receberam nitrogênio não foram incluídos nas figuras, devido aos valores de N volatilizado estarem sempre próximos de zero, indicando a inexistência de perdas detectáveis nestes casos.

A Figura 7 apresenta as perdas por volatilização, em miligramas de N, decorrentes da aplicação de aquamônia a 5 cm de profundidade. Observa-se que as maiores perdas ocorreram já na primeira coleta, ou seja, aos dois dias, representando em média 57% das perdas registradas no decorrer de todo o experimento. Isto indica que este fertilizante, possuindo nitrogênio já na forma amoniacal e em solução, permite que o processo de volatilização tenha início tão logo seja aplicado ao solo. Comportamentos

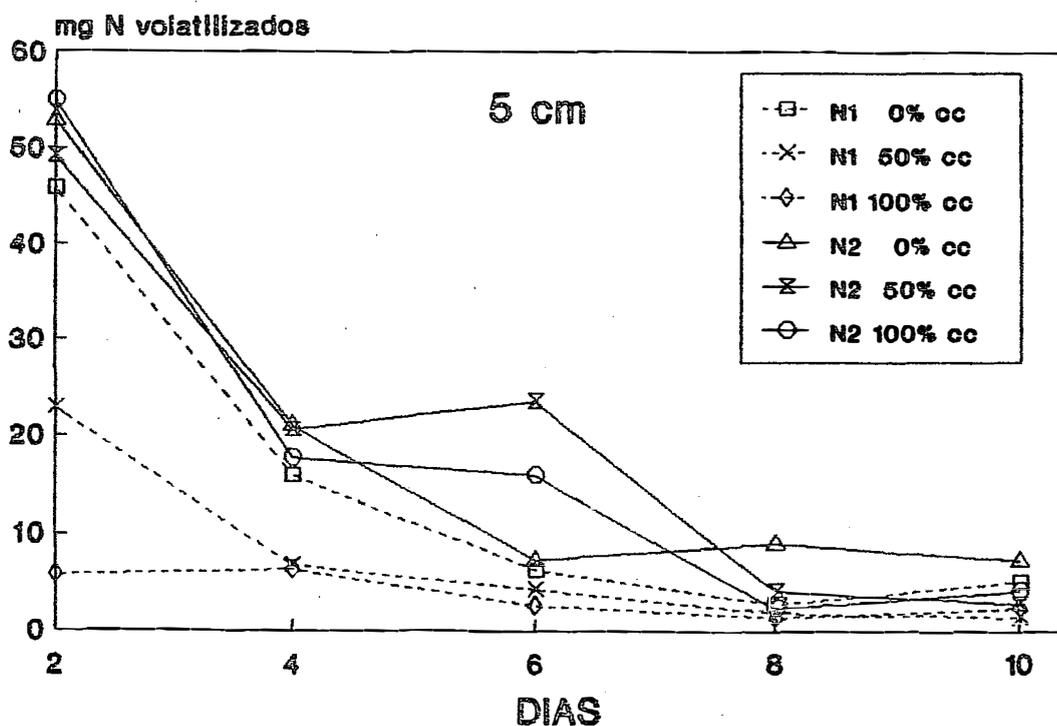


Figura 7. Perdas diárias de nitrogênio por volatilização de amônia decorrentes da aplicação de aquamônia em diferentes doses e umidades iniciais do solo a 5cm de profundidade em Latossolo Roxo álico.

semelhantes foram observados, entre outros, por CHAO & KROONTJE (1964) com aplicação de aquamônia ao solo, por FENN & KISSEL (1973 e 1974) com fluoreto de amônio e carbonato de amônio, e DAFTARDAR & SHINDE (1980) injetando amônia anidra no solo.

Entre o segundo e o quarto dia as perdas diminuíram drasticamente, com exceção do tratamento com a dose 1 de nitrogênio e umidade do solo a 100% da capacidade de campo (CC). Nestes, as perdas aos dois dias representaram 31% do total, mostrando que a umidade a 100% CC ocasionou um retardamento do processo de volatilização de  $\text{NH}_3$ . No sexto dia da condução do experimento, considerando a média dos tratamentos constantes desta figura, já haviam ocorrido 88,6% das perdas totais.

Observa-se ainda que as maiores perdas por volatilização coincidem com as maiores doses de nitrogênio e as menores umidades iniciais do solo.

A Figura 8 ilustra o comportamento das perdas diárias de amônia por volatilização após a aplicação de aquamônia na profundidade de 10 cm. Também neste caso foram excluídos da figura os tratamentos com dose zero de nitrogênio, dados aos seus inexpressivos valores, como se pode ver na Tabela 21 do APÊNDICE.

A exemplo do que ocorreu nos tratamentos a 5 cm de profundidade, o pico das perdas a 10 cm teve lugar aos dois dias, apresentando a partir daí um comportamento decrescente.

Comparando as Figuras 7 e 8, nota-se a pequena magnitude das perdas ocorridas com aplicação a 10 cm, que atingiu valores máximos próximos a 4 mg de N para

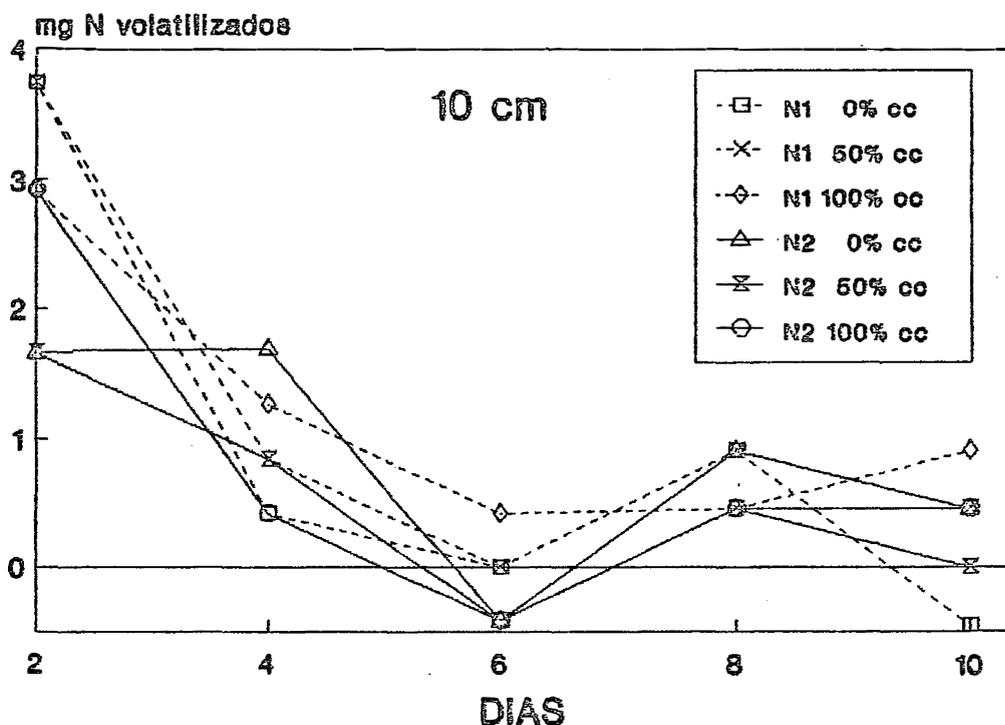


Figura 8. Perdas diárias de nitrogênio por volatilização de amônia decorrentes da aplicação de aquamônia em diferentes doses e umidades iniciais do solo a 10 cm de profundidade em Latossolo Roxo álico.

níveis de 1728 mg de N (dose maior). Observa-se portanto que a aplicação de aquamônia a 10 cm de profundidade serviu para praticamente eliminar as perdas. O elevado poder tampão deste solo, no qual o teor de H + Al é de 8,0 e.mg/100g (Tabela 2), certamente contribuiu com os baixos valores observados, principalmente quando aliada à aplicação mais profunda.

Ainda quanto à distribuição da perdas, é interessante notar que aos quatro dias estas já haviam praticamente cessado. A ocorrência de valores negativos a partir do sexto dia denota a inexistência de perdas detectáveis, sendo decorrentes de erro analítico (Erro Relativo de Concentração) comum em métodos titulométricos. Valores negativos para perdas de  $\text{NH}_3$  foram também medidos

por RODRIGUES & KIEHL (1986).

#### 4.2.1.2. Perdas totais

Os dados para perdas totais de  $\text{NH}_3$  expressas em mg de N e em porcentagem da dose aplicada encontram-se na Tabela 21 do APÊNDICE.

A análise da variância para as perdas totais em mg de N, que consta da tabela 22 do APÊNDICE, revelou efeitos altamente significativos para dose, profundidade de aplicação e umidade inicial do solo, bem como para a interação destes fatores e coeficiente de variação de 25,61%. A análise da variância dos dados expressos em porcentagem (APÊNDICE, Tabela 22) também mostrou graus de significância acima de 95% de probabilidade para os efeitos principais e respectivas interações, apresentando coeficiente de variação de 23,99%.

Os números obtidos para os coeficientes de variação resultam da grande quantidade de observações com valores próximos de zero ou mesmo negativos nos tratamentos onde as perdas foram negligíveis, permitindo uma grande contribuição dos erros analíticos na variabilidade dos dados. Estes erros, são tanto maiores quanto mais concentrada for a solução ácida utilizada para reter a amônia nos coletores, concentração esta, arbitrada em função da expectativa de volatilização máxima no experimento. Isto causa a perda de precisão na coleta de dados em níveis marginais.

A seguir, são discutidos os efeitos da dose, profundidade e umidade a partir do desdobramento da interação entre estes fatores.

### a) Efeito da dose de nitrogênio

A Tabela 10 apresenta as regressões lineares determinadas para perdas em mg de N em função dos níveis de nitrogênio aplicados nas profundidades de 5 e 10 cm e nas umidades iniciais do solo de 0, 50 e 100% da capacidade de campo (CC).

Nos tratamentos onde a aquamônia foi injetada a 5 cm de profundidade determinou-se efeito altamente significativo para as doses de N e elevados coeficientes de determinação. As regressões estão representadas graficamente na Figura 9. Nesta, observa-se que o aumento na dose ocasionou o crescimento das perdas absolutas de N. Nota-se ainda que na dose igual a zero não foram registrados dados consistentes de perdas, fato que se repetirá a 10 cm de profundidade e em todos os demais experimentos com aquamônia e uréia. Perdas negligíveis medidas em tratamentos que não receberam adubo são relatadas com frequência na literatura: Du PLESSIS & KROONTJE (1964), ANJOS & TEDESCO (1974), O'TOOLE et alii (1985), Du PREEZ & BURGER (1987).

A 10 cm de profundidade e para todas umidades iniciais do solo, não houve efeito significativo da dose de nitrogênio nas perdas de  $\text{NH}_3$  por volatilização, indicando que a injeção de aquamônia a esta profundidade neste solo foi suficiente para minimizar as perdas. Na Figura 10 foram traçados gráficos com as médias obtidas e nesta se observa os baixos valores das perdas em função da quantidade de N aplicada, o que explica a ausência de efeito neste caso.

Tabela 10. Regressões lineares para miligramas de N volatilizados em função da dose de nitrogênio na forma de aquamônia a diversas profundidades e umidades iniciais em Latossolo Roxo álico.

Profundidade	Regressão	F	R <sup>2</sup>
<b>5 cm</b>			
0% cc	$Y = 10,469327 + 0,055393X$	334,40**	0,91
50% cc	$Y = -4,036756 + 0,057728X$	363,19**	0,98
100% cc	$Y = -10,112378 + 0,055223X$	332,35**	0,89
<b>10 cm</b>			
0% cc	$Y = 2,275767 + 0,001475X$	0,24 <sup>ns</sup>	0,65
50% cc	$Y = 0,022817 + 0,002534X$	0,70 <sup>ns</sup>	0,31
100% cc	$Y = -0,181933 + 0,003271X$	1,17 <sup>ns</sup>	0,49

\*\* = Significância estatística a 99% de probabilidade  
 ns = Ausência de significância estatística

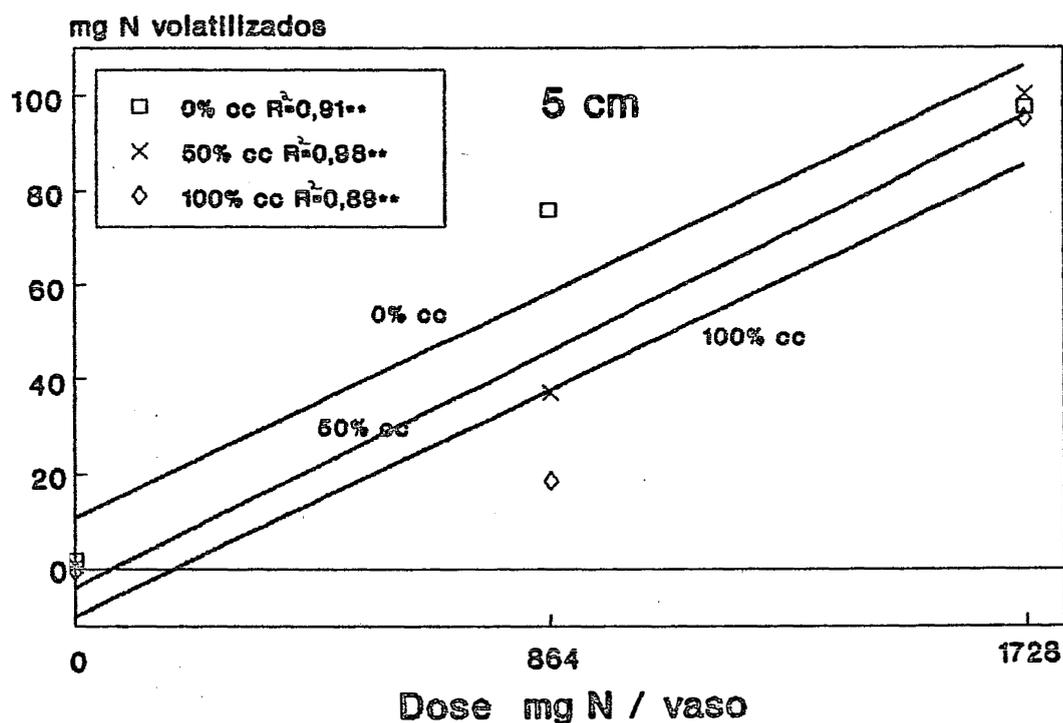


Figura 9. Efeito da dose de N-aquamônia aplicada a 5 cm no Latossolo Roxo álico com três diferentes umidades iniciais nas perdas de NH por volatilização.

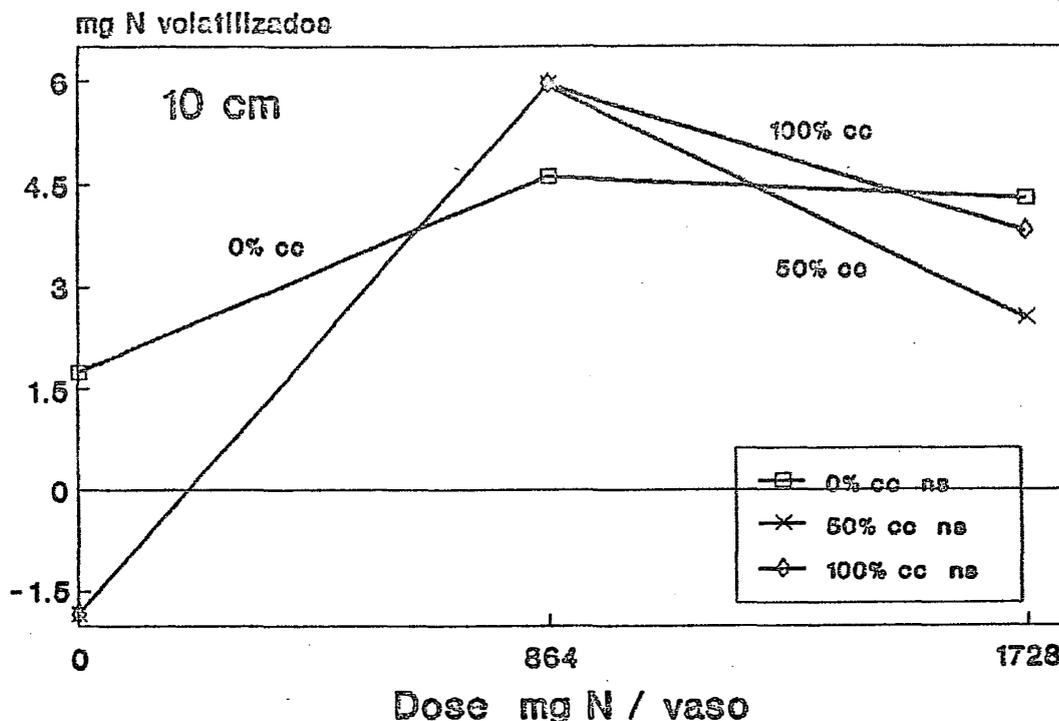
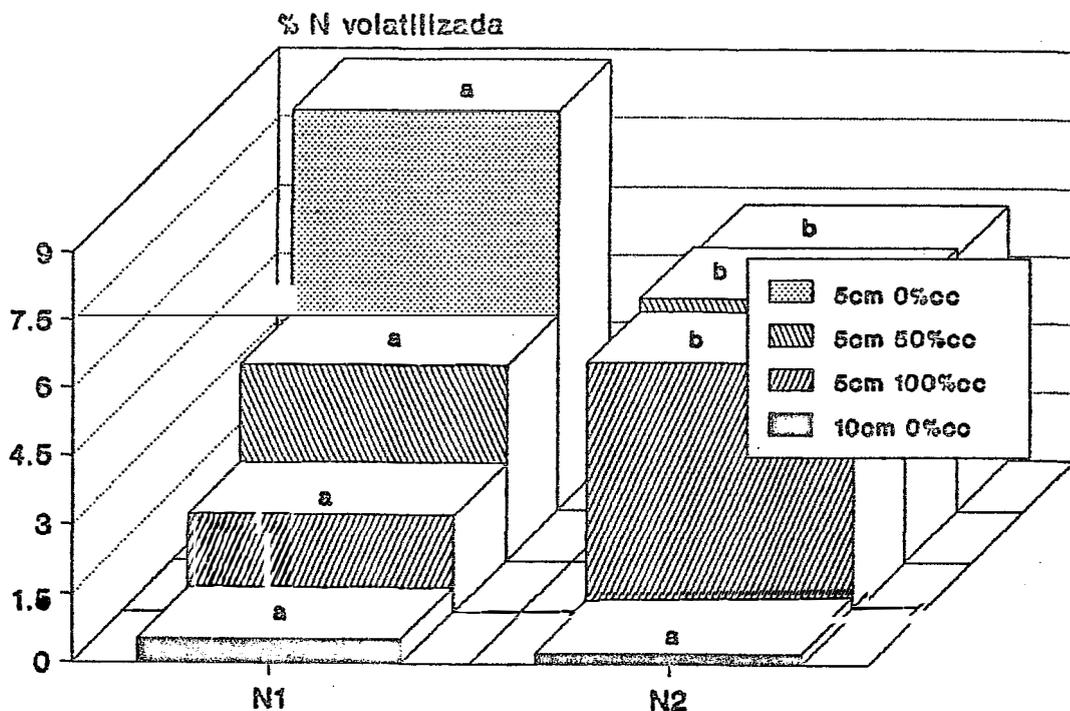


Figura 10. Perdas totais de  $\text{NH}_3$  no Latossolo Roxo álico em função da dose de N-aquamônia aplicada a 10 cm e a três diferentes umidades iniciais do solo.

Comparações das perdas de nitrogênio por volatilização de amônia expressas em porcentagem da dose aplicada são mostradas na Figura 11. Para aquamônia aplicada a 5 cm em solo seco as perdas na dose N1 foram significativamente maiores que as decorrentes da dose N2. Este efeito havia sido observado em solos eutróficos por HARGROVE et alii (1977) e STUMPE et alii (1984). No entanto, com solos de baixa CTC, em trabalhos de FENN & KISSEL (1977), CONNEL et alii (1979) e DENMEAD et alii (1985), o comportamento foi inverso, mostrando perdas percentuais significativamente maiores na dose mais alta, conforme ocorreu neste experimento para as umidades de 50% e 100% CC. A literatura consultada não oferece explicações para estas diferenças de efeitos. As maiores perdas percentuais na dose N2 seriam as mais prováveis de ocorrer no Latossolo Roxo álico pela sua baixa CTC devido, segundo KIEHL (1983), à rápida saturação da sua capacidade de retenção do íon  $\text{NH}_4^+$ ,



Letras iguais dentro da mesma unidade indicam ausência de diferenças significativas entre doses pelo teste de Tukey 95% de probabilidade.

Figura 11. Perdas percentuais de nitrogênio por volatilização após a aplicação de aquamônia em duas doses no Latossolo Roxo álico com diferentes umidades iniciais, a 5 e 10 cm de profundidade.

fazendo com que cada novo acréscimo se revertesse em fuga de amônia para a atmosfera.

Ainda na Figura 11 são mostradas as perdas percentuais decorrentes da aplicação de aquamônia a 10 cm em solo seco, as quais, não apresentaram entre si diferenças estatisticamente significativas, tendo sido apresentadas apenas para dar uma idéia da sua pequena dimensão. Este fato ocorreu também com os níveis de 50 e 100% CC motivo pelo qual não foram incluídos na figura.

### b) Efeito da profundidade de aplicação do fertilizante

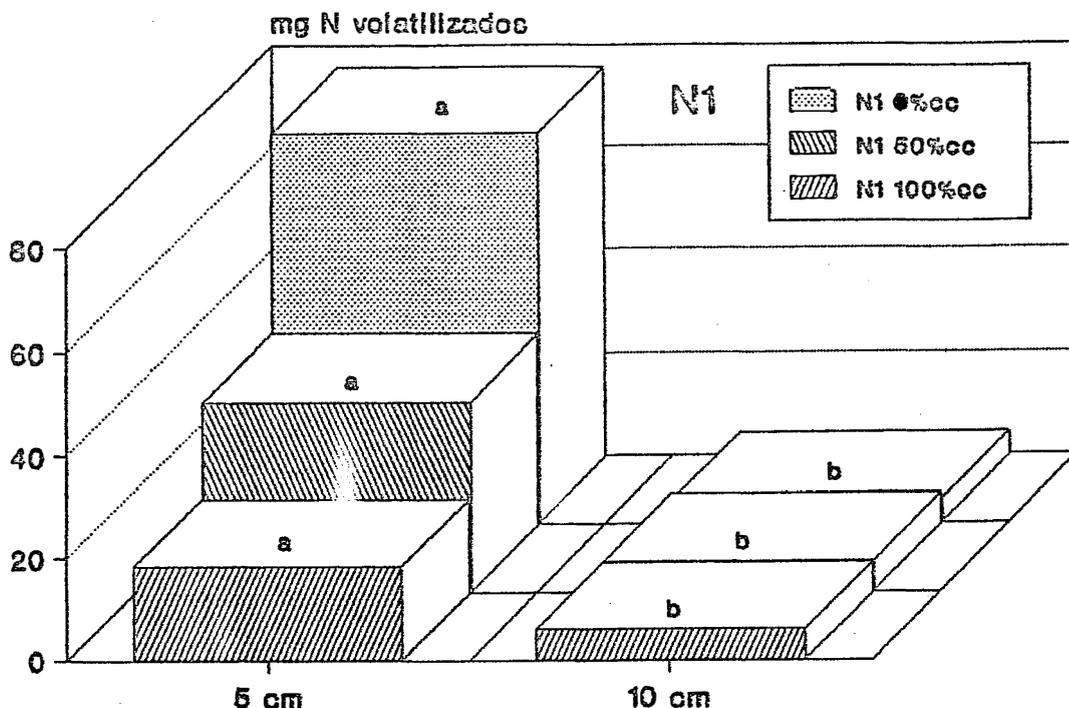
O item anterior, ao abordar o efeito da dose de N, mostrou também a interação entre este fator e a profundidade de aplicação do adubo que, fornecendo um maior volume de solo para adsorção do íon  $\text{NH}_4^+$ , diminui a formação e a perda de  $\text{NH}_3$  para a atmosfera.

Tendo sido estudados apenas dois níveis para a profundidade de aplicação de amônia, o efeito deste fator foi avaliado através do teste de Tukey para comparação de médias. Estes resultados são mostrados nas Figuras 12 e 13.

A Figura 12 apresenta as perdas por volatilização de  $\text{NH}_3$ , em mg de N, para a dose N1 (864 mg N/vaso), equivalente a 54,5 kg N/ha. Para os três níveis de umidade inicial do solo as perdas foram significativamente maiores a 5 cm do que a 10 cm de profundidade, confirmando a unanimidade existente na literatura consultada quanto às vantagens da aplicação profunda do fertilizante.

Embora sempre significativas, as diferenças entre as volatilizações de amônia a 5 e 10 cm de profundidade diminuíram em função do aumento da umidade inicial do solo, fato que será discutido no item relativo a este fator.

Para o nível N2, onde foram aplicados 1728 mg de N por vaso correspondendo à dose de 109 kg N/ha, repetem-se as diferenças significativas entre as perdas em função da profundidade, conforme se vê na figura 13. Entretanto, de maneira diferente do que ocorreu na dose N1, as perdas a 5 cm de profundidade apresentaram valores semelhantes dentro

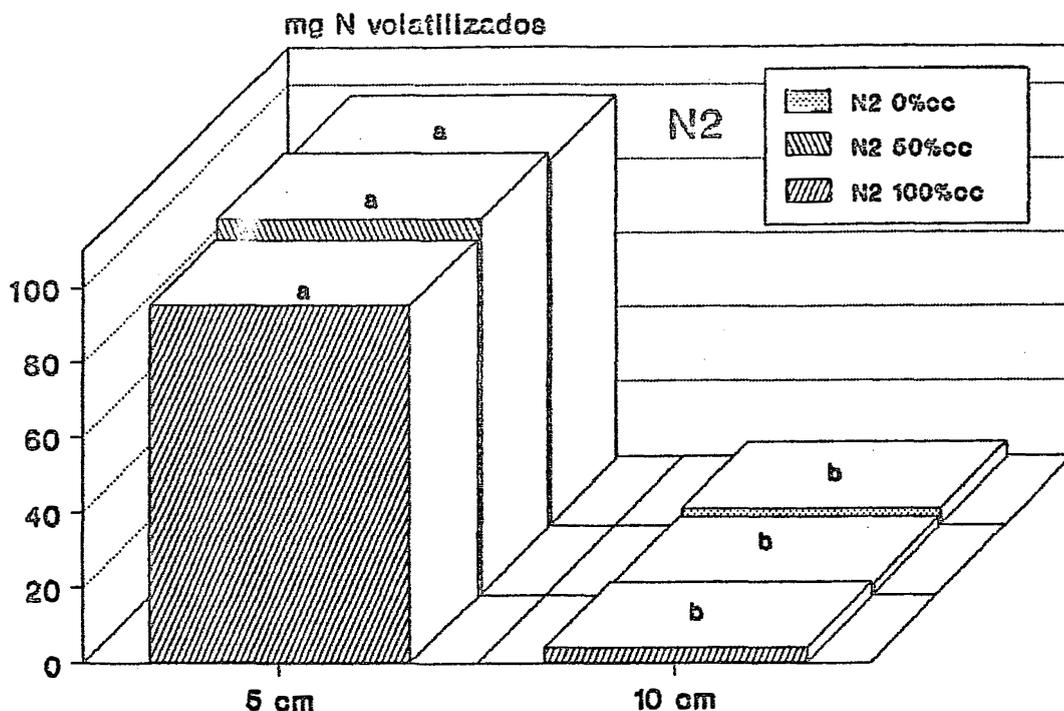


Letras diferentes dentro da mesma unidade indicam existência de diferenças significativas entre profundidades pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade.

Figura 12. Perdas de nitrogênio por volatilização após a aplicação de aquamônia a duas profundidades no Latossolo Roxo álico na dose N1 (864 mg N/vaso) e em três diferentes umidades iniciais do solo.

das três umidades iniciais do solo.

A 10 cm, os valores medidos para as perdas na dose N2 estiveram próximos daqueles decorrentes da dose menor de nitrogênio, confirmando que a aplicação da aquamônia a esta profundidade controlou de maneira efetiva a volatilização de  $\text{NH}_3$  neste solo.



Letras diferentes dentro da mesma unidade indicam existência de diferenças significativas entre profundidades pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade.

Figura 13. Perdas de nitrogênio por volatilização após a aplicação de aquamônia a duas profundidades no Latossolo Roxo álico na dose N2 (1728 mg N/vaso) e em três diferentes umidades iniciais do solo.

### c) Efeito da umidade inicial do solo

A Tabela 11 mostra as regressões lineares determinadas para o efeito da umidade inicial do solo nas perdas de  $\text{NH}_3$  dentro das doses 1 e 2 de nitrogênio e das profundidades de 5 e 10 cm. Mais uma vez não são avaliados os efeitos dentro da dose zero de nitrogênio, devido às perdas negligíveis observadas.

Neste solo só ocorreu efeito significativo para umidade na dose N1 aplicada a 5 cm de profundidade, que

Tabela 11. Regressões lineares para miligramas de N volatilizadas em função da umidade inicial do solo, a duas doses de N e duas profundidades de aplicação de aquamônia no Latossolo Roxo álico.

Dose	Regressão	F	R <sup>2</sup>
<b>N 1</b>			
5 cm	Y = 72,442538 - 0,574971X	120,66**	0,96
10 cm	Y = 4,836594 + 0,013354X	0,07 <sup>ns</sup>	0,76
<b>N 2</b>			
5 cm	Y = 98,766962 - 0,024910X	0,23 <sup>ns</sup>	0,23
10 cm	Y = 3,779289 - 0,004679X	0,01 <sup>ns</sup>	0,07

\*\* = Significância estatística a 99% de probabilidade  
 ns = Ausência de significância estatística

apresentou ainda um elevado coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,96$ ). A 10 cm já não houve efeito significativo para a umidade, fato que se repete na dose N2 tanto a 5 cm como a 10 cm de profundidade. Assim sendo, a Figura 14 mostra o gráfico da regressão obtida dentro da dose N1 a 5 cm e, para os demais níveis, são apresentados gráficos ponto a ponto ligando as médias observadas.

A interação da umidade inicial do solo com aprofundidade de aplicação do fertilizante determinada por CHIN & KROONTJE (1963), OVERREIN & MOE (1967) e indicada na Figura 12, ao se discutir profundidade, pode ser observada claramente na Figura 14. Na dose N1 aplicada a 5 cm houve uma nítida influência da umidade inicial do solo, cujo aumento ocasionou significativa diminuição das perdas de  $NH_3$ . A 10 cm de profundidade a ausência de efeito para umidade nesta dose indica que o aprofundamento da aplicação dispensou a contribuição da umidade no controle da

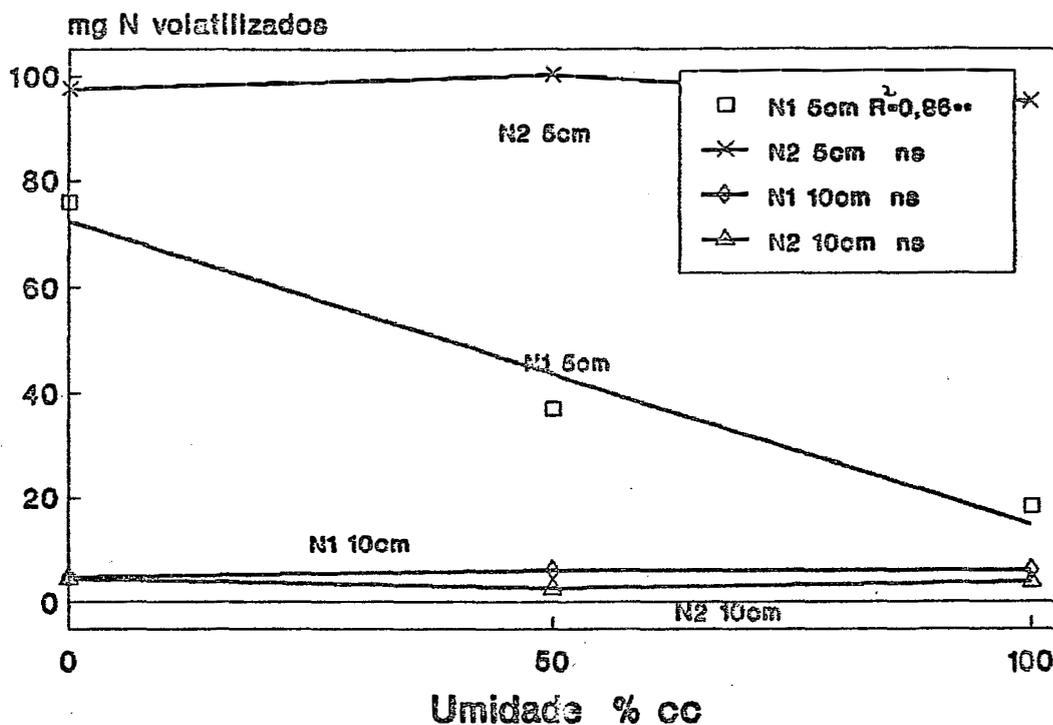


Figura 14. Efeito da umidade inicial do solo nas perdas de amônia do Latossolo Roxo álico a partir da aplicação de aquamônia em duas diferentes doses e profundidades.

volatilização de amônia.

Observando agora o comportamento da dose N2, nota-se a ausência de efeito da umidade tanto a 5 cm como a 10 cm de profundidade. A 10 cm, a não existência de resposta deve-se ao fato da aplicação profunda, por si só, ter sido suficiente para controlar as perdas. Já na dose N2 a 5 cm, a grande quantidade de amônia colocada próxima à superfície do solo e possuindo este uma baixa CTC, fez com que o aumento da umidade não fosse capaz de provocar a diminuição das perdas, que foram as mais altas deste experimento e semelhantes entre si no solo seco e umedecido a 50 e 100% da capacidade de campo.

Tais observações indicam a concordância do

observado na dose N1 a 5cm com os trabalhos de PRASAD (1976), FENN & ESCARZAGA (1976) e FLEISHER et alii (1987), nos quais o aumento da umidade diminuiu claramente as perdas de  $\text{NH}_3$ . Já a ausência de efeito da umidade para N1 a 10 cm e N2 a 5 e 10 cm indicam claramente a interdependência dos fatores dose, profundidade e umidade do solo na determinação do comportamento das perdas de  $\text{NH}_3$  por volatilização.

#### 4.2.2. Experimento com uréia

##### 4.2.2.1. Perdas diárias

No experimento com uréia no Latossolo Roxo álico os valores médios para perdas de  $\text{NH}_3$  constam da Tabela 24 do apêndice.

As Figuras 15, 16 e 17 representam graficamente o comportamento das perdas nos dias decorridos do experimento para os tratamentos onde a uréia foi aplicada, respectivamente, em superfície, a 2,5 cm e a 5 cm de profundidade, não tendo sido incluídos os tratamentos com dose de nitrogênio igual a zero.

As três figuras mostram que os maiores valores para volatilização de amônia ocorreram já na primeira coleta de dados, ou seja, aos dois dias. Estas representaram, na média geral do experimento, 89,7% das perdas totais, restando assim valores inexpressivos para as medidas feitas nas coletas subseqüentes.

É interessante ressaltar as pequenas perdas ocorridas neste experimento, as quais atingiram valores máximos abaixo de 3,5 mg para quantidades aplicadas de 792 e 1584 mg de N por vaso. O fato deste solo apresentar pH em

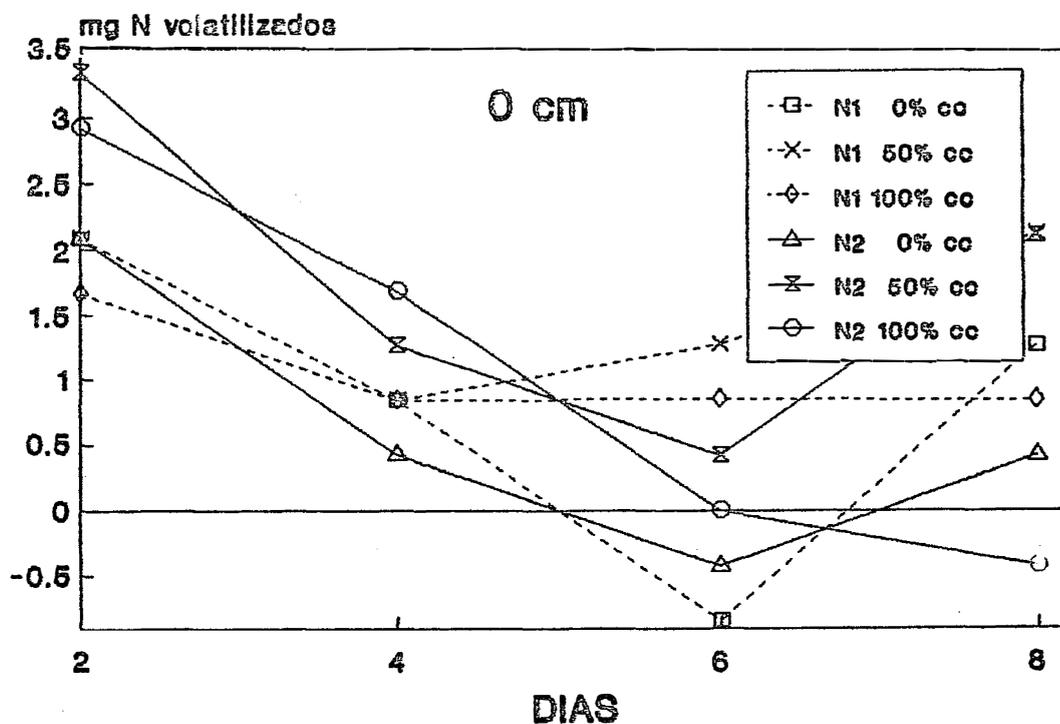


Figura 15. Perdas diárias de amônia, em mg de N, após aplicação superficial de uréia em Latossolo Roxo álico a diferentes doses e umidades iniciais do solo.

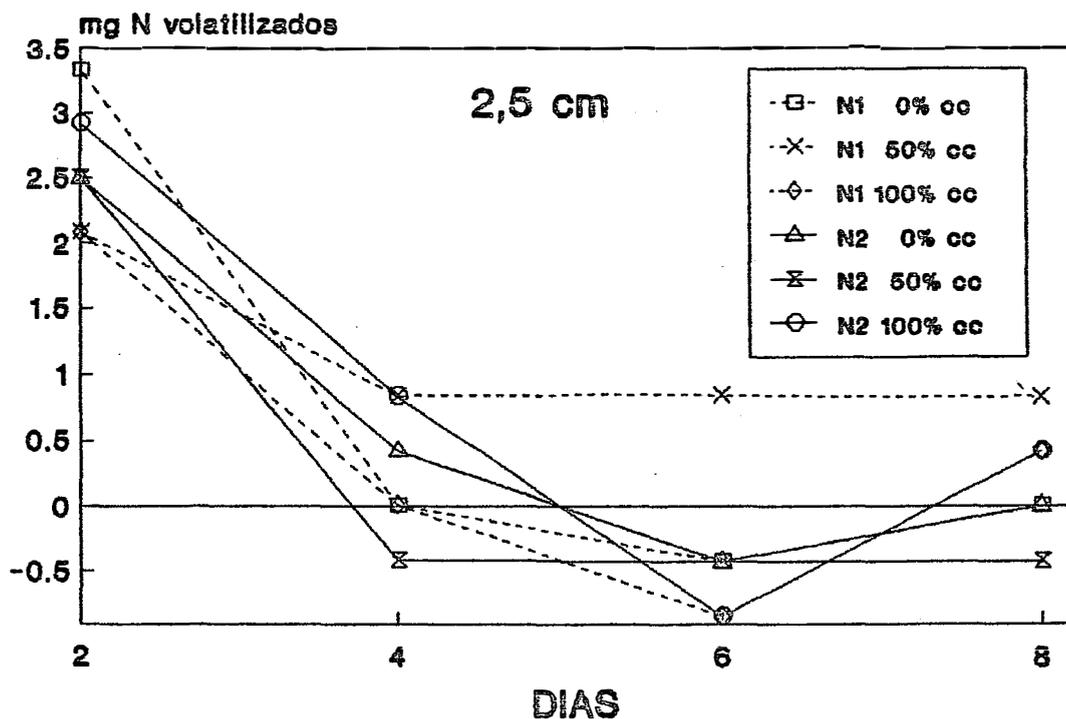


Figura 16. Perdas diárias de amônia, em mg de N, após aplicação de uréia a 2,5 cm em Latossolo Roxo álico a diferentes doses e umidades iniciais do solo.

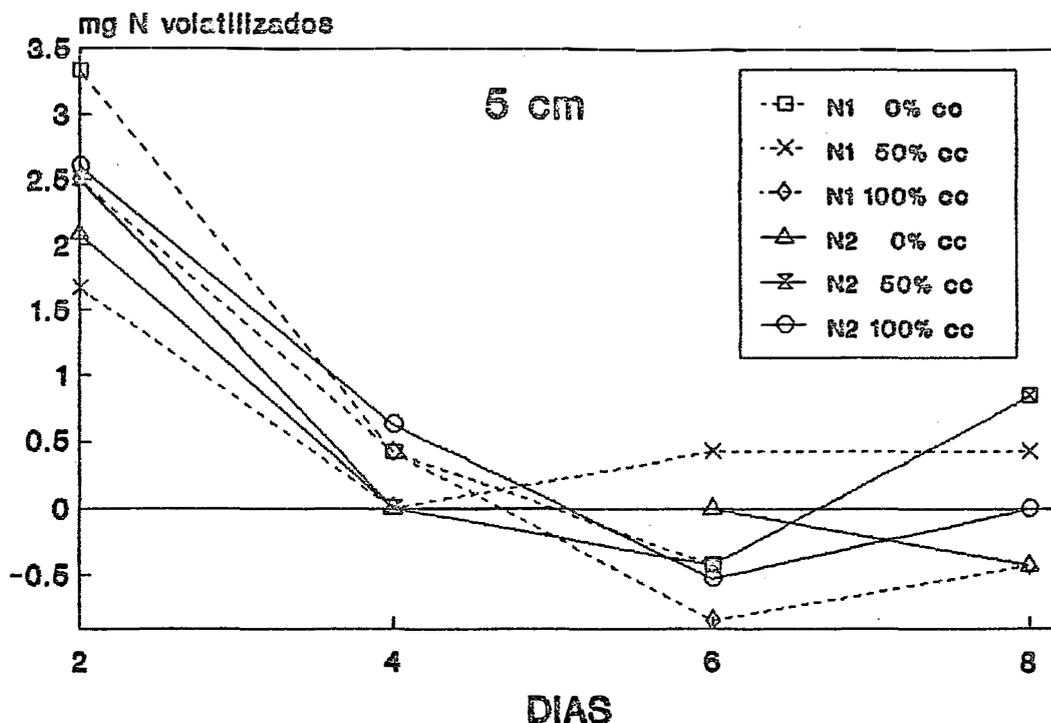


Figura 17. Perdas diárias de amônia, em mg de N, após aplicação de uréia a 5 cm de profundidade em Latossolo Roxo álico a diferentes doses e umidades iniciais do solo.

água igual a 4,2 e elevada capacidade tampão representada pela soma do H + Al igual a 8,0 e.mg/100g (Tabela 2 do item 3.3.1.) correspondendo a 81% da CTC efetiva ou valor "T", certamente contribuiu para as pequenas perdas ocorridas. Este efeito foi observado por vários autores, COLEMAN & THOMAS (1967), FERGUSSON et alii (1984), IZURRALDE et alii (1987) e BOTHA (1987), que determinaram a grande influência do poder tampão de solos ácidos na redução das perdas de amônia.

#### 4.2.2.2. Perdas totais

Os dados de perdas totais de  $\text{NH}_3$  neste experimento, expressos em mg de N e em porcentagem da dose

aplicada, encontram-se na Tabela 24 do APÊNDICE. As análises da variância para os dados em mg e em porcentagem são mostrados nas tabelas 25 e 26 do APÊNDICE e em ambos os casos, apresentam coeficientes de variação muito altos: 68,4% para perdas em mg e 53,9% para os dados em porcentagem. Estes elevados coeficientes estão relacionados com as poucas respostas obtidas para tratamentos neste ensaio, decorrendo portanto dos erros analíticos em torno das perdas nulas, conforme já comentado na discussão do experimento com aquamônia no mesmo solo. LIBARDI & REICHARD (1978) também determinaram coeficientes de variação muito altos com dados de um experimento conduzido em Terra Roxa estruturada no qual as perdas de  $\text{NH}_3$  por volatilização apresentaram valores inexpressivos.

A grande dispersão dos dados deste experimento permitiu apenas a observação dos efeitos principais de dose, profundidade e umidade do solo, não tendo sido significativas as interações entre estes fatores, cujos efeitos foram avaliados através de análises de regressões polinomiais, apresentadas na Tabela 12 e discutidos a seguir.

Tabela 12. Regressões polinomiais para miligramas de N volatilizados em função da dose de N, profundidade de aplicação e umidade inicial do solo, no experimento com uréia em Latossolo Roxo álico.

X	Regressão	F	R <sup>2</sup>
Dose N	$Y = 1,222307 + 0,001541X$	28,82**	0,65
Profundidade	$Y = 3,095106 - 0,261017X$	8,24**	0,78
Umidade	$Y = 2,325533 + 0,031003X - 0,000344X^2$	4,77*	1,00

\* = Significância estatística a 95% de probabilidade

\*\* = Significância estatística a 99% de probabilidade

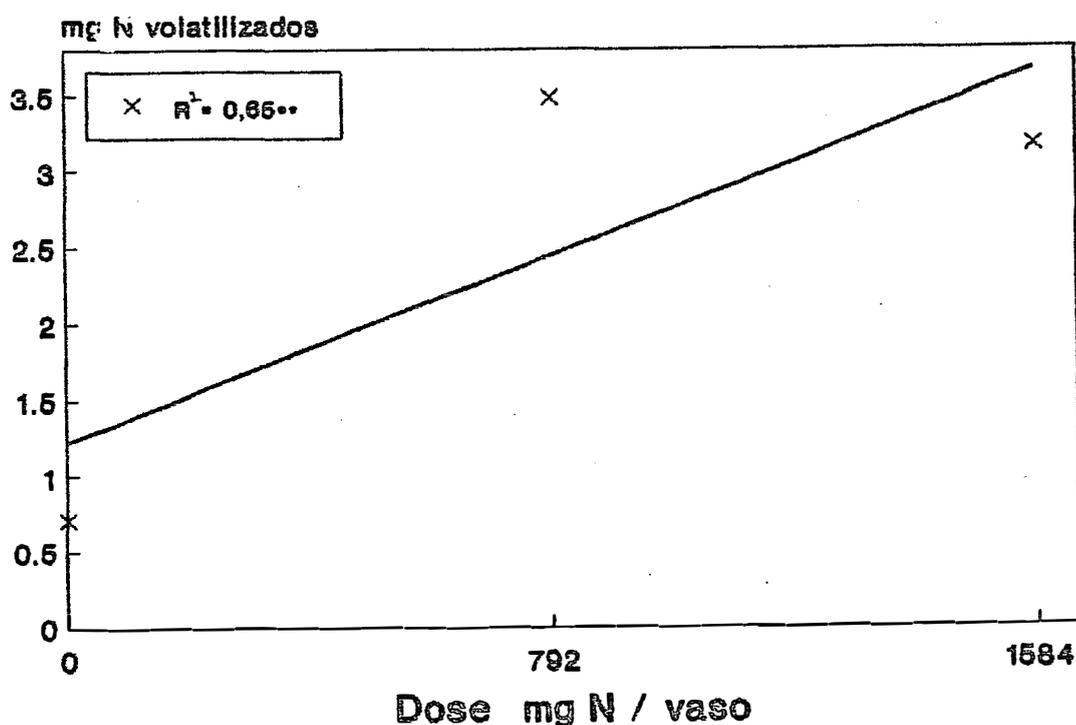
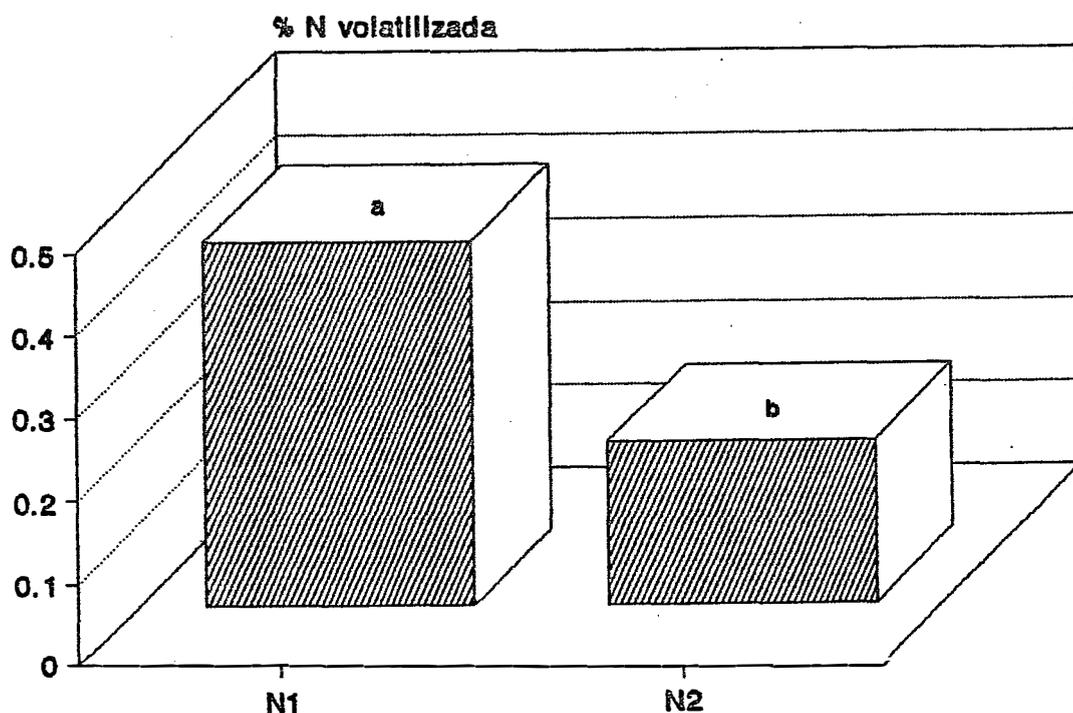


Figura 18. Efeito da dose de N nas perdas de amônia por volatilização no experimento com uréia no Latossolo Roxo álico.

### a) efeito da dose de nitrogênio

A Figura 18 mostra um efeito linear altamente significativo para dose de nitrogênio. No entanto, o baixo coeficiente de determinação ( $R^2 = 0,65$ ) revela a pouca sensibilidade da regressão determinada, decorrente da pequena dimensão das perdas em função da quantidade de N adicionada. A observação desta figura mostra, de fato, valores médios muito próximos para perdas nos níveis de 792 e 1584 mg de N por vaso e uma clara distância destes em relação à dose zero.

Quanto às perdas percentuais, comparadas na Figura 19, que as apresenta na média de todas as



Letras diferentes indicam existência de diferença significativa entre doses pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Figura 19. Perdas percentuais de nitrogênio por volatilização após a aplicação de uréia em duas doses no Latossolo Roxo álico.

profundidades de aplicação e umidades iniciais, a dose 1 de nitrogênio apresentou valor maior do que a dose N2, diferindo estatisticamente, comportamento diverso do esperado em um solo de baixa CTC, no qual, o acréscimo na dose muitas vezes ocasiona um sensível aumento na volatilização de  $\text{NH}_3$ , conforme já comentado quando da discussão do experimento com aquamônia. Deve-se considerar no entanto, os baixos valores medidos para as perdas percentuais, indicando a pouca importância prática das diferenças observadas.

b) Efeito da profundidade de aplicação do fertilizante

Na Figura 20 foi traçado o gráfico da regressão linear obtida para o efeito da profundidade,

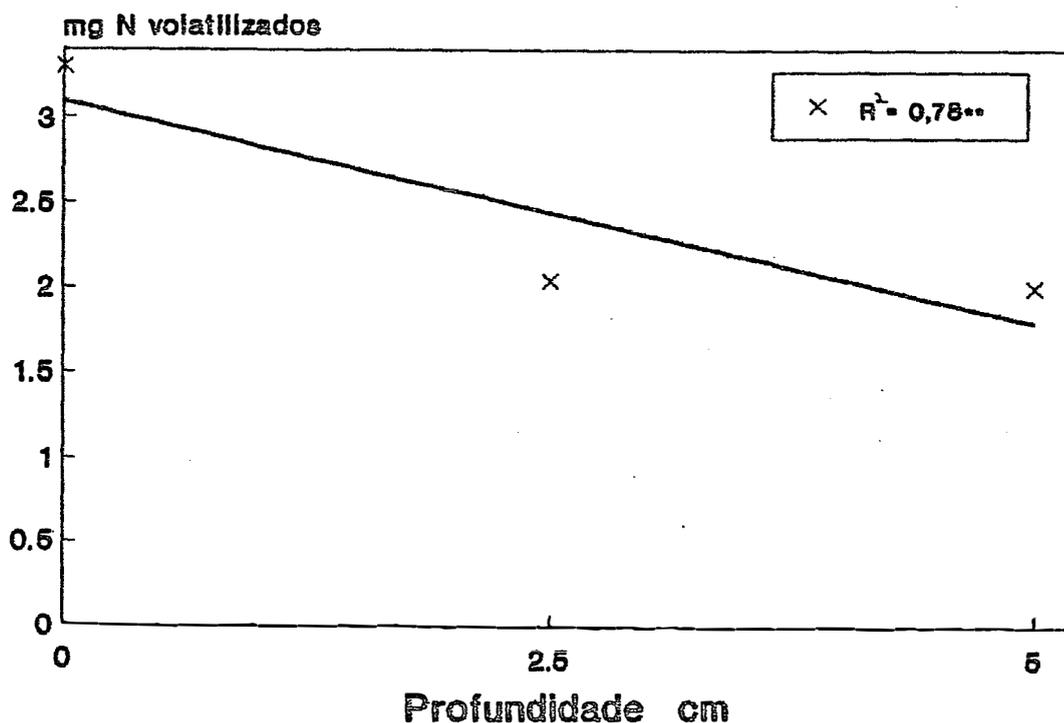


Figura 20. Efeito da profundidade de aplicação de uréia nas perdas de  $\text{NH}_3$  por volatilização, expressas em mg de N, no Latossolo Roxo álico.

considerando a média de todas as doses e umidades. O valor do  $R^2$  igual a 0,78 e a significância a 99% de probabilidade denotam um claro efeito da incorporação do fertilizante diminuindo as perdas. As médias observadas a 2,5 e a 5 cm, ao apresentar valores muito próximos, indicam que a aplicação de uréia a 2,5 cm de profundidade já foi suficiente para provocar significativa redução nas perdas de  $NH_3$  neste solo.

Trabalhos feitos, entre outros, por FENN & MIYAMOTO (1981), RAO & BATRA (1983), e Du PREEZ & BURGER (1987b) atestam a vantagem da aplicação de uréia em profundidade quando comparada à distribuição do adubo em superfície.

#### **c) Efeito da umidade inicial do solo**

No presente trabalho, os fatores dose de N, profundidade de aplicação do adubo e umidade inicial do solo foram testados em no máximo três níveis, ou seja: 0, 50 e 100 kg N/ha, 5 e 10cm ou 0, 2,5 e 5 cm de profundidade e 0 ou 10%, 50% e 100% da capacidade de campo. Quando se comparou dois níveis, fez-se através do teste de Tukey por não haver sentido em se determinar a equação de uma reta passando por apenas dois pontos. Ao se comparar três níveis, deu-se preferência às regressões lineares, pois as funções quadráticas embora em alguns casos oferecessem melhores ajustes, passariam sempre sobre todas as médias observadas, resultando invariavelmente numa correlação de 100% tornando este parâmetro inútil na avaliação da representatividade das curvas determinadas, restando para tal, apenas o grau de significância dado pelo teste de F. No entanto, para as perdas em função da umidade inicial do solo nos experimentos com uréia, os efeitos observados no Latossolo Roxo álico e

na Areia Quartzosa distrófica não sem encaixavam no modelo linear, sendo tipicamente quadráticos. Por esta razão, nestes experimentos, adotou-se para unidade modelos de regressões do segundo grau apesar do inconveniente da existência de apenas três pontos para determinar a curva.

A Figura 21 mostra o efeito da umidade inicial do solo nas perdas de  $\text{NH}_3$  por volatilização, tomando em conta a média de todas as doses e profundidades devido a, conforme já comentado, não ter havido significância na interação tripla (APÊNDICE, Tabela 25).

De maneira diferente da observada com aquamônia em solo seco, no qual foram medidas as maiores perdas, a uréia aplicada nestas condições apresentou menor

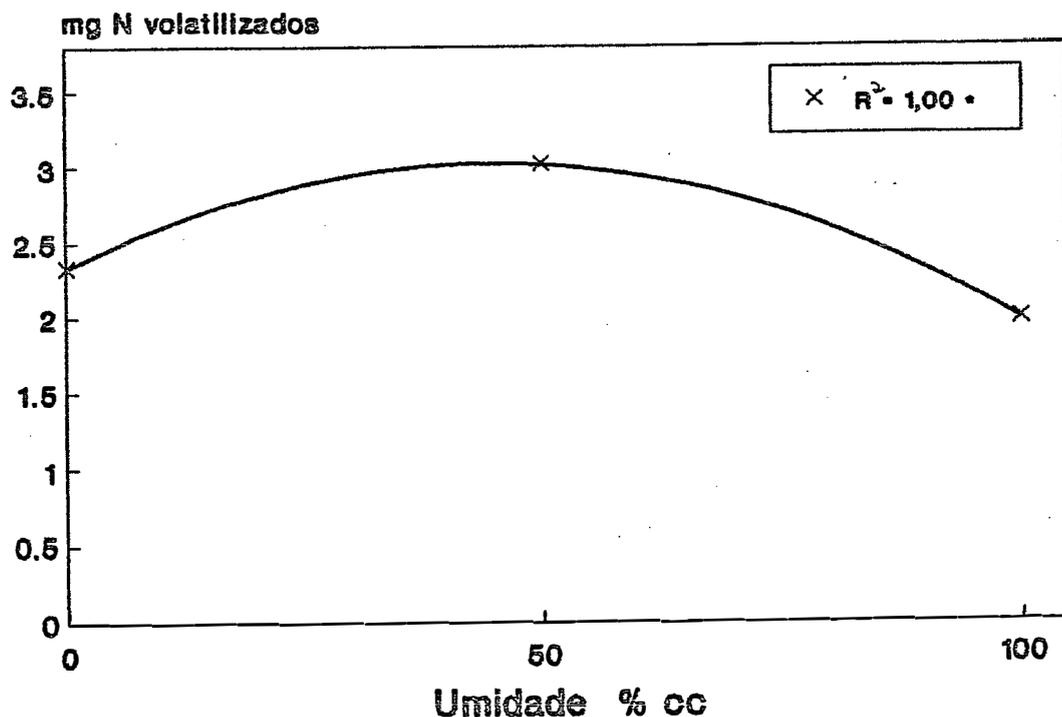


Figura 21. Efeito da umidade inicial do solo nas perdas de  $\text{NH}_3$  por volatilização, expressas em mg de N, no experimento com uréia em Latossolo Roxo álico.

perda de  $\text{NH}_3$  do que a 50% da capacidade de campo. Isto se deve à baixa umidade não ter permitido uma significativa dissolução e subsequente hidrólise da uréia, dificultando assim a mudança do nitrogênio amídico para a forma amoniacal, estando de acordo com o observado por FENN & ESCARZAGA (1976) e RAO & BATRA (1983).

A 50% da capacidade de campo foram medidas as maiores perdas de  $\text{NH}_3$ , por neste caso, haver umidade suficiente para a hidrólise de toda a uréia aplicada, conforme também observado por CRAIG & WOLLUM (1982), FLEISHER et alii (1987) e BLACK et alii (1987).

O aumento da umidade do solo de 50% para 100% CC permitiu o decréscimo das perdas devido à maior diluição da solução do solo e portanto, dispersão do íon  $\text{NH}_4^+$ , fato confirmado na literatura por PRASAD (1976), FENN & ESCARZAGA (1977) e BLACK et alii (1987).

### 4.3. ESTUDOS COM AREIA QUARTZOSA DISTRÓFICA

#### 4.3.1. Experimento com aquamônia

##### 4.3.3.1. Perdas diárias.

Os valores médios determinados para perdas de  $\text{NH}_3$  constam da Tabela 27 do APÊNDICE. Nas Figuras 22 e 23 é apresentado o comportamento das perdas no decorrer deste experimento, excluindo-se os tratamentos com dose de nitrogênio igual a zero.

A Figura 22 mostra as perdas médias por

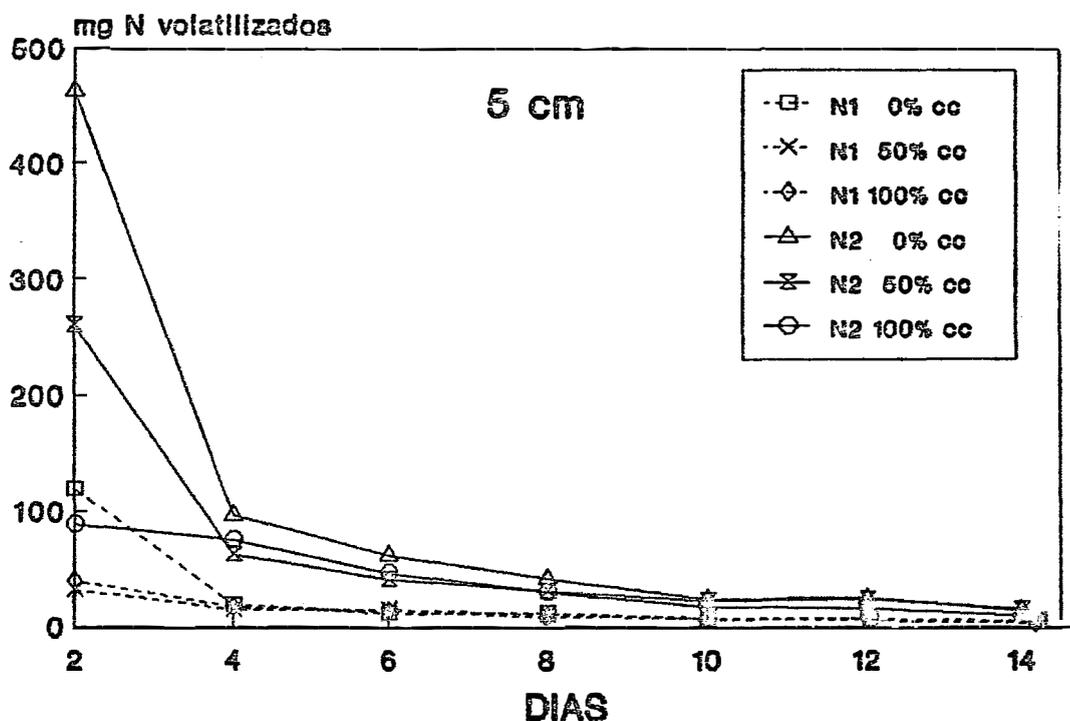


Figura 22. Perdas diárias de nitrogênio por volatilização de amônia decorrentes da aplicação de aquamônia em diferentes doses e umidades iniciais do solo a 5 cm de profundidade na Areia Quartzosa distrófica.

volatilização, em mg de N, ocorridas nos tratamentos onde a aquamônia foi injetada no solo a 5 cm de profundidade. De maneira semelhante ao que ocorreu com a aplicação deste adubo no Latossolo Roxo álico, as maiores perdas na Areia Quartzosa distrófica foram registradas na primeira coleta (2 dias), tendo representado, na média dos tratamentos desta Figura, 48,8% das perdas totais. A partir deste ponto, assumiram valores decrescentes e ao oitavo dia já havia sido perdido 86,2% do total registrado neste experimento. Mais uma vez as maiores perdas coincidiram com as maiores doses e menores umidades iniciais.

Na Figura 23, onde são mostrados os resultados obtidos para a injeção de aquamônia a 10 cm de profundidade, repete-se a ocorrência das maiores perdas aos

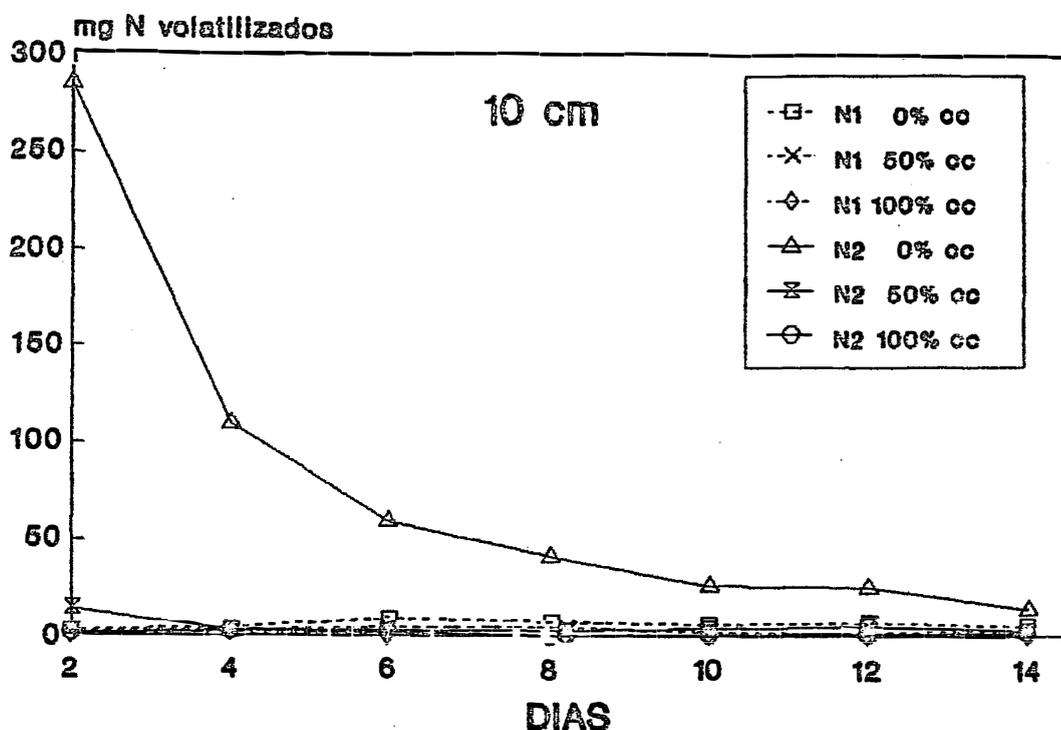


Figura 23. Perdas diárias de nitrogênio por volatilização de amônia decorrentes da aplicação de aquamônia em diferentes doses e umidades iniciais do solo a 10 cm de profundidade na Areia Quartzosa distrófica.

dois dias apenas para a dose N2 a 0% da capacidade de campo, que apresenta valores bastante elevados, e para N2 a 50% CC. Nos demais tratamentos a aplicação a 10 cm causou não apenas uma diminuição, mas também o retardamento das perdas. Na média geral desta figura, apenas 19,8% das perdas totais haviam ocorrido na primeira coleta, vindo a atingir 89,4% do total no décimo segundo dia.

No Experimento com Areia Quartzosa distrófica as perdas foram bem mais elevadas do que aquelas ocorridas no Latossolo Roxo álico. O mais baixo teor de argila (11%), menor CTC (4,9 e.mg/100g) e menor poder tampão (H + Al = 2,4 e.mg/100g) mostrados na Tabela 2 do item 3.3.1, são certamente as características da Areia Quartzosa que mais contribuíram para as elevadas perdas observadas. BOTHA

(1987) determinou perdas sempre mais altas em solos mais arenosos.

As perdas medidas nos tratamentos a 10 cm de profundidade também atestam a pequena capacidade de retenção de amônia deste solo. Comportamento semelhante é relatado por TERMAN (1979) com aplicação de amônia anidra em solo arenoso ácido para o qual foram registradas elevadas perdas de  $\text{NH}_3$  com a injeção a 15 cm de profundidade.

A dose  $\text{N}_2$  aplicada no solo seco ocasionou perdas muito grandes mesmo quando a aquamônia foi aplicada a 10 cm de profundidade. FLEISHER et alii (1987) explica este fenômeno como sendo devido à mobilidade do  $\text{NH}_3$  na fase gasosa ser dez mil vezes maior que na fase líquida, permitindo assim uma maior difusão da amônia no solo seco.

#### 4.3.1.2. Perdas totais

As médias determinadas para as perdas totais de nitrogênio por volatilização de amônia, expressas em miligramas de N e em porcentagem da dose aplicada são mostradas na Tabela 27 do APÊNDICE.

A análise da variância dos dados para perdas totais em mg de N, apresentada na Tabela 28 do APÊNDICE, revela efeitos altamente significativos para dose de nitrogênio, profundidade de aplicação do fertilizante, umidade inicial do solo e para as interações destes fatores. O coeficiente de variação foi de 12,18%. Os dados expressos em porcentagem também apresentaram na análise da variância, que consta da Tabela 29 do APÊNDICE, efeitos altamente significativos para os três fatores e respectivas interações, e coeficiente de variação de 10,01%.

A resposta para a maioria dos tratamentos neste experimento e a dimensão das perdas observadas contribuíram para a ocorrência de coeficientes de variação bem menores que aqueles observados nos estudos com Latossolo Roxo álico. A presença de grande número de dados consistentes para perdas de amônia e conseqüente menor número de valores com dispersos em torno das perdas nulas, fez com que os já comentados erros analíticos pouco influíssem na variação dos dados.

#### a) Efeito da dose de nitrogênio

As regressões lineares determinadas para o efeito da dose nas perdas de  $\text{NH}_3$  por volatilização dentro de cada uma das duas profundidades de aplicação e três umidades iniciais empregadas encontram-se na Tabela 13.

A Figura 24 mostra os gráficos para as perdas em função da dose nos tratamentos onde a aquamônia foi injetada a 5 cm de profundidade. Os efeitos lineares foram altamente significativos e com elevados coeficientes de determinação em todos os casos. Além da resposta crescente para dose nas perdas em miligramas, é interessante notar os altos valores medidos em relação às quantidades de N colocadas e que, mais uma vez, as perdas na dose zero de nitrogênio foram insignificantes independentemente da umidade inicial do solo. Esta, nos tratamentos que receberam aquamônia, ocasionou maiores perdas nos menores níveis de umidade, confirmando o comportamento anteriormente observado no experimento com este adubo no Latossolo Roxo álico e acentuando o efeito interativo da dose com a umidade inicial do solo.

Tabela 13. Regressões lineares para miligramas de N volatilizados em função da dose de nitrogênio na forma de aquamônia a diversas profundidades e umidades iniciais em Areia Quartzosa distrófica.

Profundidade	Regressão	F	R <sup>2</sup>
<b>5 cm</b>			
0% cc	$Y = -58,758976 + 0,441789X$	2738,60**	0,92
50% cc	$Y = -44,310534 + 0,277468X$	1080,25**	0,89
100% cc	$Y = -13,012607 + 0,169380X$	402,56**	0,96
<b>10 cm</b>			
0% cc	$Y = -77,760441 + 0,341388X$	1635,30**	0,80
50% cc	$Y = 2,081032 + 0,019342X$	5,25*	0,99
100% cc	$Y = 2,519078 + 0,001771X$	0,04 <sup>ns</sup>	0,46

\* = Significância estatística a 95% de probabilidade

\*\* = Significância estatística a 99% de probabilidade

ns = Ausência de significância estatística

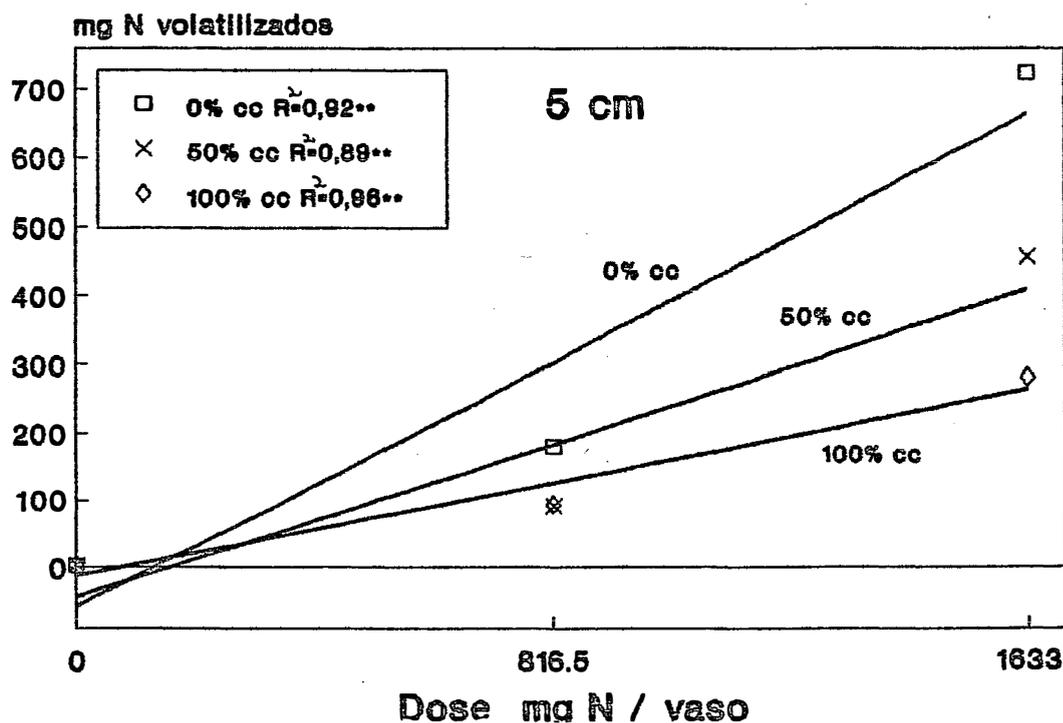


Figura 24. Efeito da dose de N-aquamônia aplicada a 5 cm na Areia Quartzosa com três diferentes umidades iniciais, nas perdas de amônia por volatilização.

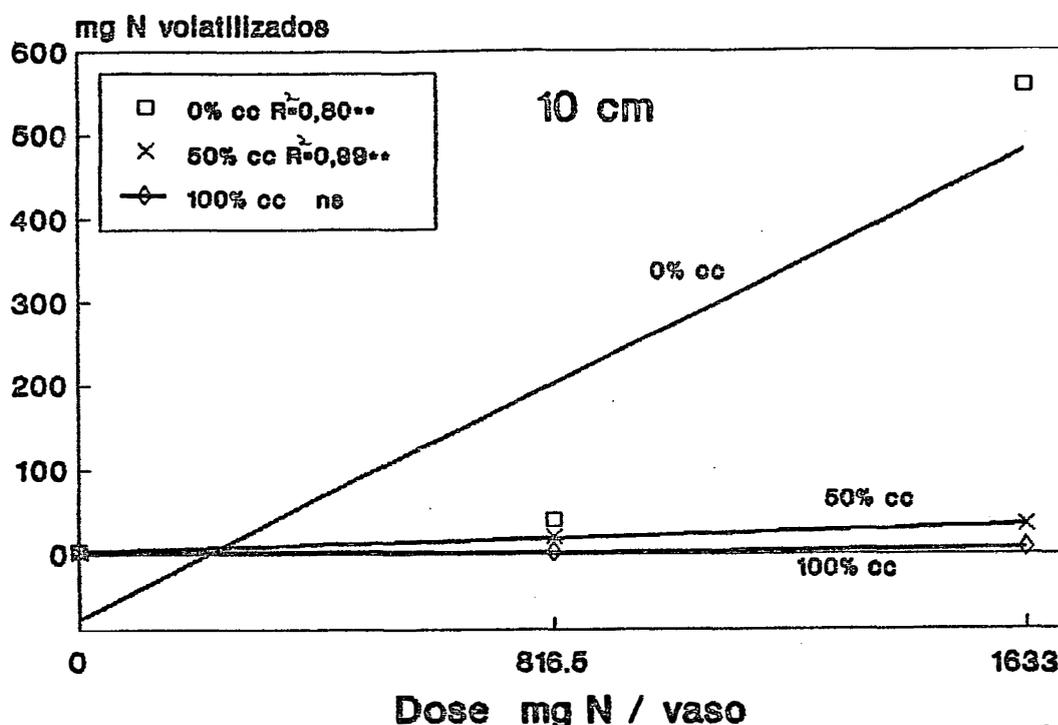
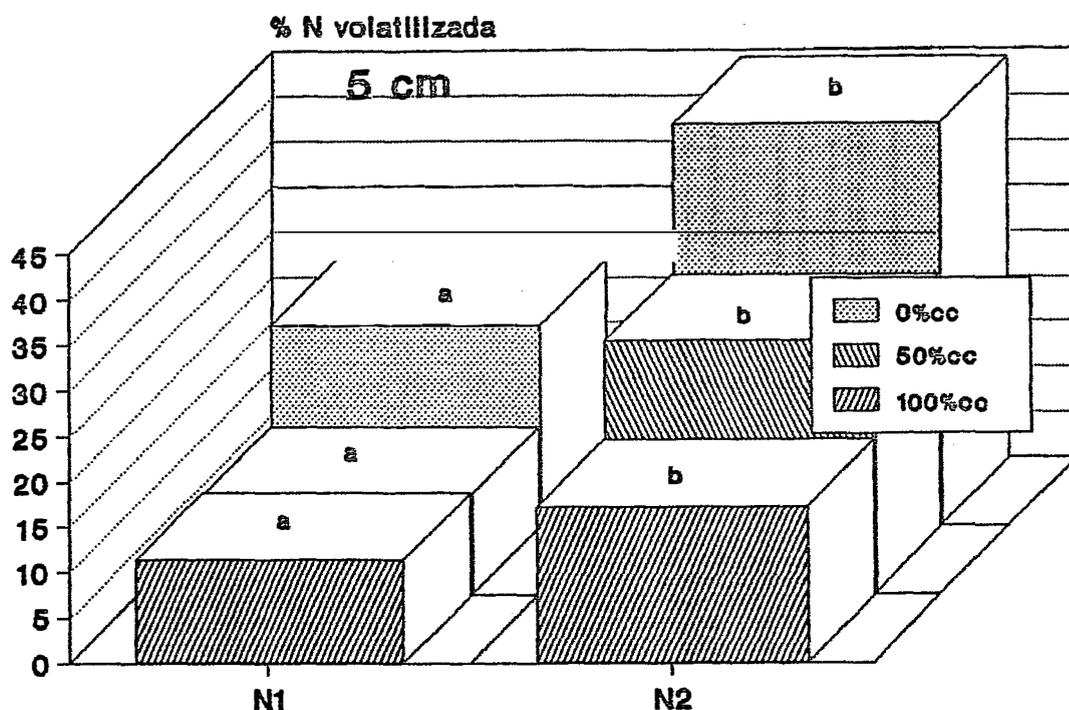


Figura 25. Efeito da dose de N-aquamônia aplicada a 10 cm na Areia Quartzosa com três diferentes umidades iniciais, nas perdas de amônia por volatilização.

Para a aplicação de aquamônia a 10 cm de profundidade (Figura 25) determinou-se o efeito altamente significativo da dose para os tratamentos com umidades iniciais de 0 e 50% da capacidade de campo. No solo seco, as perdas foram bem maiores do que a 50% e 100% CC, sendo que nesta última não houve significância para dose de N. Estas observações confirmam a ação conjunta do aprofundamento da aplicação do fertilizante e da elevação da umidade do solo na diminuição e até neutralização do efeito da dose de nitrogênio.

Quanto às perdas expressas em porcentagem da dose aplicada, a 5 cm de profundidade, a Figura 26 mostra que estas na dose N2 foram significativamente maiores do que na dose N1 em todos os níveis de umidade inicial, confirmando o comportamento típico de um solo de baixa CTC,

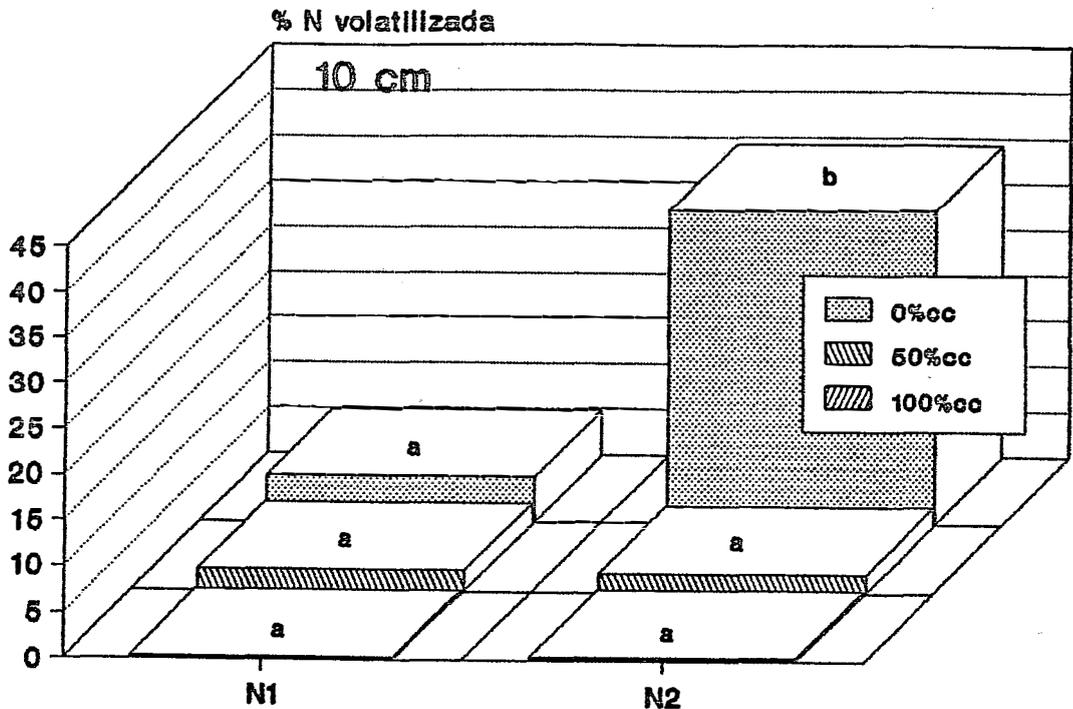


Letras iguais dentro da mesma unidade indicam ausência de diferenças significativas entre doses pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade.

Figura 26. Perdas percentuais de nitrogênio por volatilização após a aplicação de aquamônia em duas doses na Areia Quartzosa distrófica com diferentes unidades iniciais, a 5 cm de profundidade.

que ao esgotar, a sua pequena capacidade de reter amônia, pode aumentar as perdas para a atmosfera com novas adições de nitrogênio, fato observado por OVERREIN & MOE (1967) e DENMEAD et alii(1982). Vale observar ainda os elevados valores das perdas percentuais, que nas doses N1 e N2 foram de, respectivamente, 22 e 44% no solo seco, 11 e 28% no solo a 50% CC e, a 100% CC, de 11 e 17% do nitrogênio aplicado.

A aplicação mais profunda (10 cm) e a alta umidade do solo contribuiu para minorar as perdas comentadas acima conforme se observa na Figura 27, na qual, a dose N2 resultou em perdas significativamente maiores do que a dose N1 apenas para a aplicação de aquamônia em solo seco, que

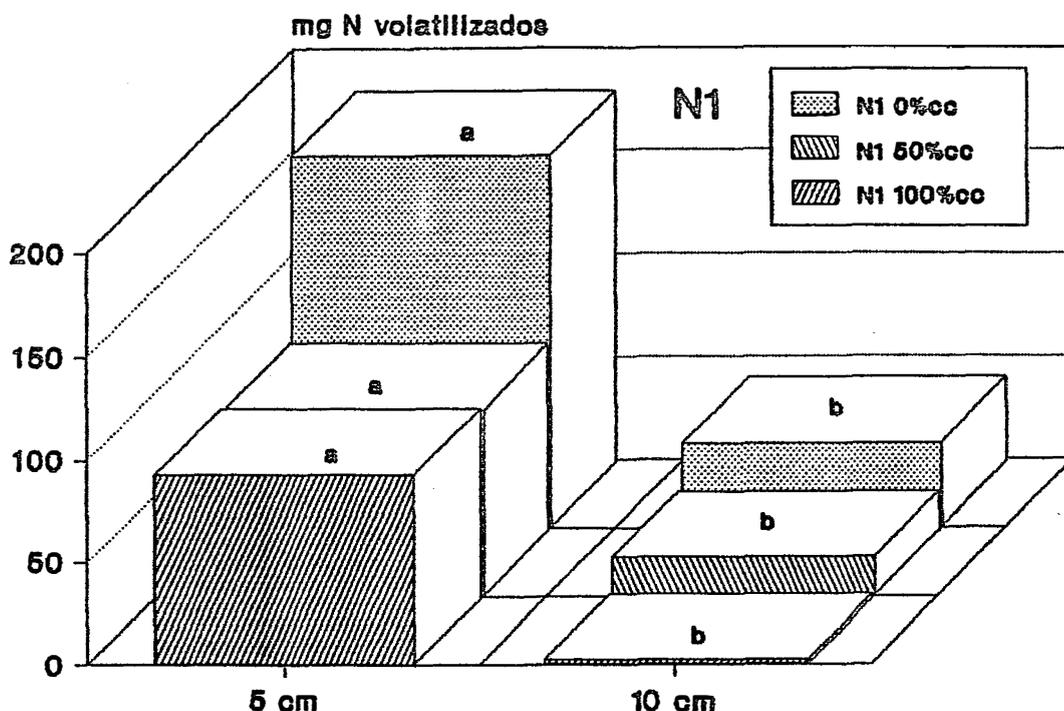


**Figura 27.** Perdas percentuais de nitrogênio por volatilização após a aplicação de aquamônia em duas doses na Areia Quartzosa distrófica com diferentes umidades iniciais, a 10 cm de profundidade.

foram de 5% para o nível N1 e de 34% do N aplicado na dose maior. A 50 e 100% da capacidade de campo, as perdas além de terem sido as mais baixas, não apresentaram diferenças significativas entre doses, representando para a umidade de 50% CC nos níveis N1 e N2, respectivamente 2,3 e 2,0% do nitrogênio aplicado. A 100% da capacidade de campo as perdas foram de 0,27% para N1 e de 0,30% na dose N2.

**b) Efeito da profundidade de aplicação do fertilizante.**

A Figura 28 apresenta as perdas de amônia por

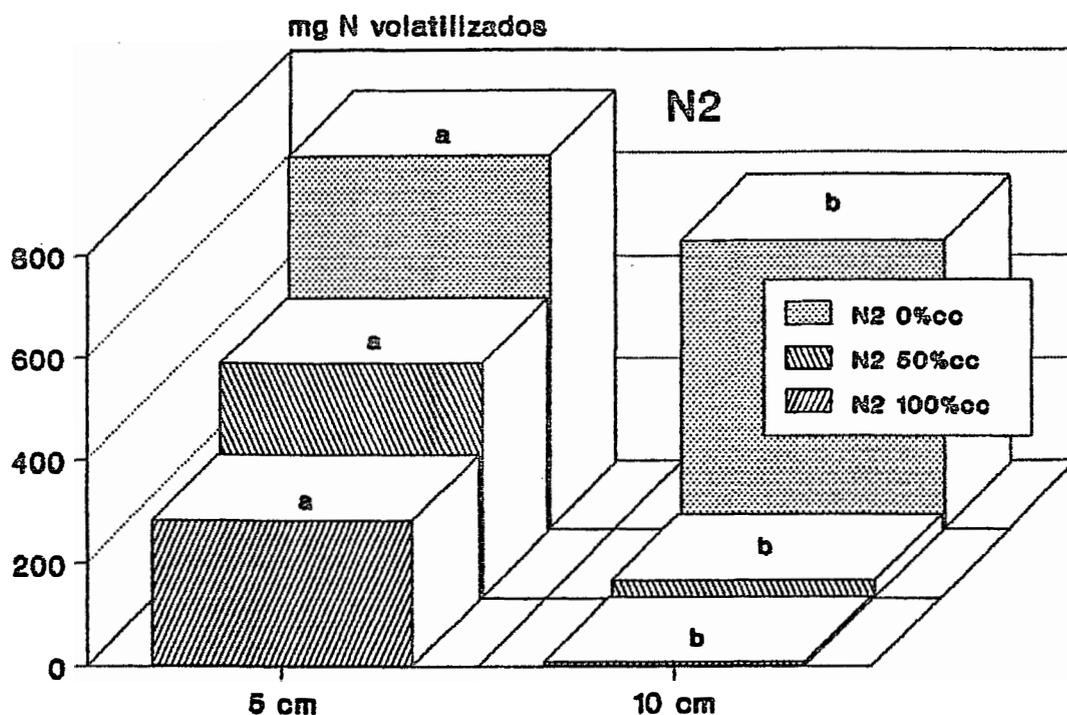


Letras diferentes dentro da mesma unidade indicam existência de diferenças significativas entre profundidades pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade.

Figura 28. Perdas de nitrogênio por volatilização após a aplicação de aquamônia a duas profundidades na Areia Quartzosa distrófica, na dose N1 (816,5 mg N/vaso) e em três umidades iniciais do solo.

volatilização, em mg de N, para aplicação de aquamônia na dose N1 (816,5 mg N/vaso) a 5 e 10 cm de profundidade e em três diferentes níveis de umidade inicial. Observa-se que, independentemente da umidade do solo, as perdas ocorridas quando da injeção de aquamônia a 5 cm foram significativamente mais altas do que as decorrentes da aplicação a 10 cm.

As perdas em função de profundidade de injeção de aquamônia na dose N2 (1633 mg N/vaso) apresentadas na Figura 29, mais uma vez mostraram reduções estatisticamente significativas da volatilização de amônia com o aprofundamento da aplicação do adubo. FENN & MIYAMOTO



Letras diferentes dentro da mesma unidade indicam existência de diferenças significativas entre profundidades pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade.

Figura 29. Perdas de nitrogênio por volatilização após a aplicação de aquamônia a duas profundidades na Areia Quartzosa distrófica, na dose N<sub>2</sub> (1633 mg N/vaso) e em três umidades iniciais do solo.

(1981) determinaram perdas de 74, 52, 13 e 0% do N colocado na forma de solução de amônia às profundidades de, respectivamente, 0, 2,5, 5 e 7,5 cm. É interessante notar, no caso da Areia Quartzosa, que a injeção a 10 cm ainda foi insuficiente para eliminar as perdas de NH<sub>3</sub>, evidenciando a pequena capacidade de retenção de amônia deste solo.

Observa-se ainda o efeito interativo da profundidade e umidade inicial do solo. A 10 cm, ocorreram perdas inexpressivas apenas para o nível de umidade correspondente a 100% da capacidade de campo.

### c) Efeito da umidade inicial do solo

As regressões lineares determinadas para o efeito da umidade inicial do solo nas perdas de amônia dentro das doses 1 e 2 de nitrogênio e das duas profundidades de aplicação empregadas constam da Tabela 14. A Figura 30 representa graficamente estas equações.

Neste experimento, a umidade inicial do solo ocasionou efeitos lineares e decrescentes altamente significativos em todas as regressões analisadas. Para as perdas na dose N2 a 5 cm, onde foi determinado um coeficiente de determinação ( $R^2$ ) igual a 0,98, observa-se que, de maneira diversa ao ocorrido no experimento com Latossolo Roxo álico, apesar das expressivas perdas ocorridas nos três níveis de umidade, esta contribuiu para a sua redução, ao promover uma maior diluição da solução do solo e oferecendo uma maior superfície de adsorção para o íon  $NH_4^+$ , conforme afirma PRASAD (1976).

Tabela 14. Regressões lineares para miligramas de N volatilizados em função da umidade inicial do solo, a duas doses de N e duas profundidades de aplicação de aquamônia em Areia Quartzosa distrófica.

Dose	Regressão	F	$R^2$
<b>N 1</b>			
5 cm	$Y = 164,381835 - 0,872603X$	40,06**	0,73
10 cm	$Y = 39,819828 - 0,385457X$	7,82**	0,99
<b>N 2</b>			
5 cm	$Y = 707,981571 - 4,437085X$	1035,91**	0,98
10 cm	$Y = 476,460793 - 5,534186X$	1611,52**	0,79

\*\* = significância estatística a 99% de probabilidade

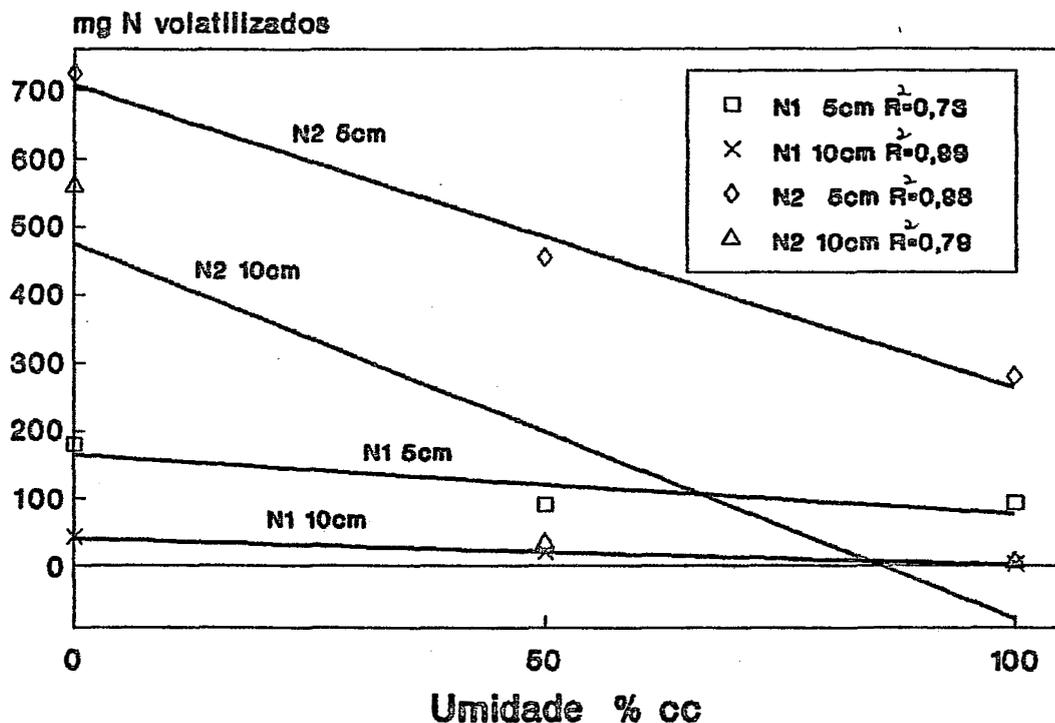


Figura 30. Efeito da umidade inicial do solo nas perdas de amônia da Areia Quartzosa distrófica a partir da aplicação de aquamônia em duas diferentes doses e profundidades.

Os mais baixos valores determinados para os  $R^2$  referem-se à dose N1 a 5 cm (0,73) e N2 a 10 cm (0,79). Para ambos, nota-se que as perdas ocorridas a 50 e 100% CC assumiram valores muito semelhantes entre si.

A ocorrência de efeito da umidade nos tratamentos a 10 cm de profundidade, fato que não ocorreu no Latossolo Roxo álico, revela mais uma vez a baixa capacidade de retenção de amônia da Areia Quartzosa distrófica e a maior permeabilidade aos gases de um solo arenoso, permitindo uma maior difusão de amônia, conforme afirmaram PARR & PAPENDICK (1966). Mostra ainda a interação entre umidade do solo e profundidade de aplicação do fertilizante, observada por OVERREIN & MOE (1967), a qual, chegou a quase

anular as perdas na dose 1 e 2 de nitrogênio quando o adubo foi aplicado a 10 cm de profundidade no solo com umidade a 100% da capacidade de campo.

#### 4.3.2. Experimento com uréia

##### 4.3.2.1. Perdas diárias

Os valores médios para perdas diárias no experimento com uréia na Areia Quartzosa distrófica são apresentados na Tabela 30 do APÊNDICE.

Na Figura 31 são mostradas as perdas em mg de N ocorridas nos tratamentos onde o adubo foi aplicado na superfície do solo, excluindo-se aqueles com dose zero de nitrogênio. Para as dose N1 e N2 aplicadas em solo seco (0% CC), as perdas apresentaram um comportamento constante durante todo o decorrer do experimento. Nos demais tratamentos, o pico das perdas ocorreu na primeira coleta de dados, aos dois dias, de maneira similar aos experimentos com aquamônia apresentados anteriormente. Perdas máximas ocorridas já nos primeiros dias após a aplicação superficial de uréia foram relatadas também por PERUCCI et alii (1982) 24 horas após a instalação do experimento, REYNOLDS & WOLF (1987) aos dois dias e KUCEY (1988) entre o segundo e o terceiro dia, todos trabalhando em condições de laboratório. Em campo, PINNA & VALDIVIA (1978) apresentam dados de perdas máximas aos dois dias decorridos da aplicação superficial de uréia em terreno cultivado com cana-de-açúcar.

A disponibilidade de água para a dissolução e hidrólise da uréia aliada à ausência de qualquer impedimento

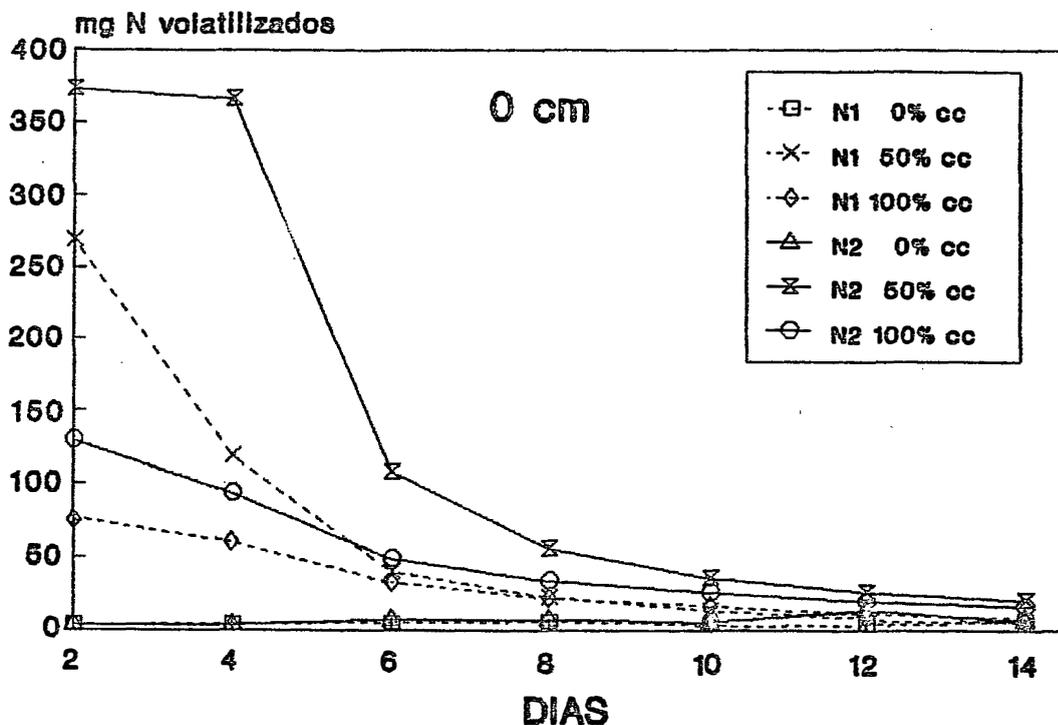


Figura 31. Perdas diárias de nitrogênio por volatilização de amônia decorrentes da aplicação superficial de uréia a diferentes doses e umidades iniciais do solo na Areia Quartzosa distrófica.

físico para a difusão do  $\text{NH}_3$ , justifica a magnitude das perdas iniciais de amônia proveniente da uréia quando esta é aplicada em superfície.

RODRIGUES & KIEHL (1986) determinaram o pico das perdas com a aplicação superficial de uréia, quatro dias após a instalação do experimento. Já a colocação do adubo a 5 cm de profundidade, fez com que as perdas máximas ocorressem entre o oitavo e o décimo dia.

O retardamento das perdas de  $\text{NH}_3$  decorrente da incorporação do adubo ao solo, em relação à aplicação superficial vista na Figura 31, pode ser observado nas figuras 32 e 33. A 2,5 cm, as maiores perdas ocorreram aos quatro dias. Com a aplicação do adubo a 5 cm de

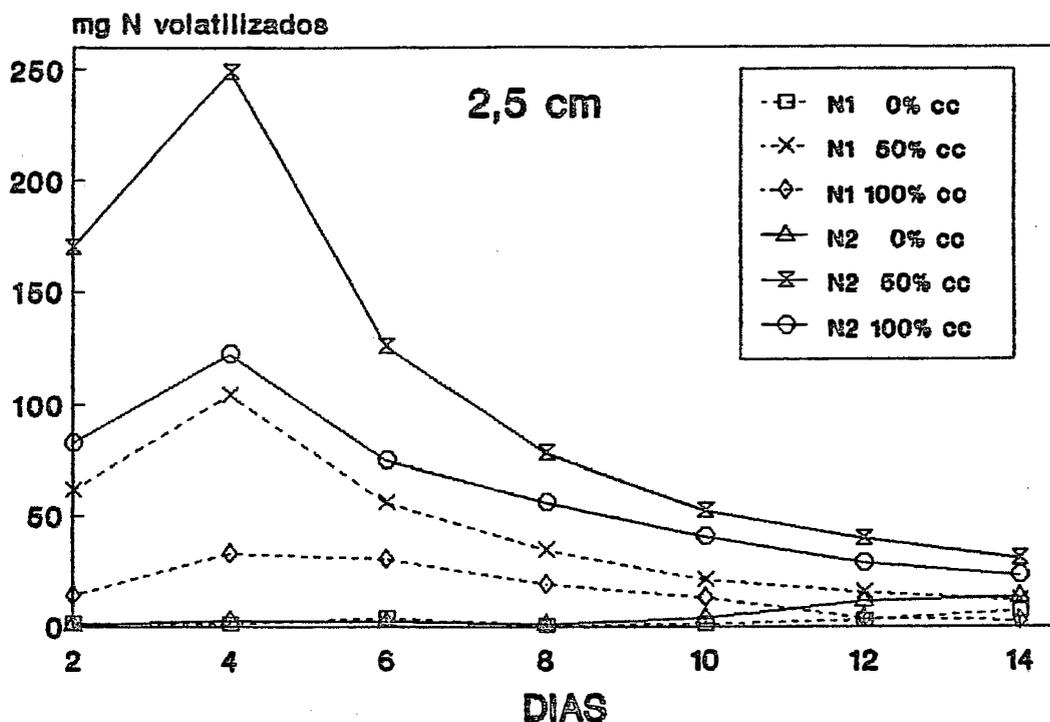


Figura 32. Perdas diárias de nitrogênio por volatilização de amônia decorrentes da aplicação de uréia a 2,5 cm de profundidade na Areia Quartzosa distrófica, a diferentes doses e umidades iniciais do solo

profundidade, estas situaram-se entre o sexto e oitavo dia após a instalação do experimento. Na média dos tratamentos constantes de cada figura, as perdas de  $\text{NH}_3$  a 0, 2,5 e 5 cm de profundidade foram de, respectivamente, 30,1, 14,1 e 6,8% das perdas totais determinadas para cada caso.

As Figuras 31, 32 e 33 permitem observar ainda que as maiores perdas coincidem com as maiores doses e dentro deste fator, com as menores profundidades de aplicação e com a umidade inicial de 50% da capacidade de campo.

O comportamento constante das perdas quando o adubo foi aplicado em solo seco, deveu-se provavelmente a uma pequena dissolução e hidrólise da uréia com umidade

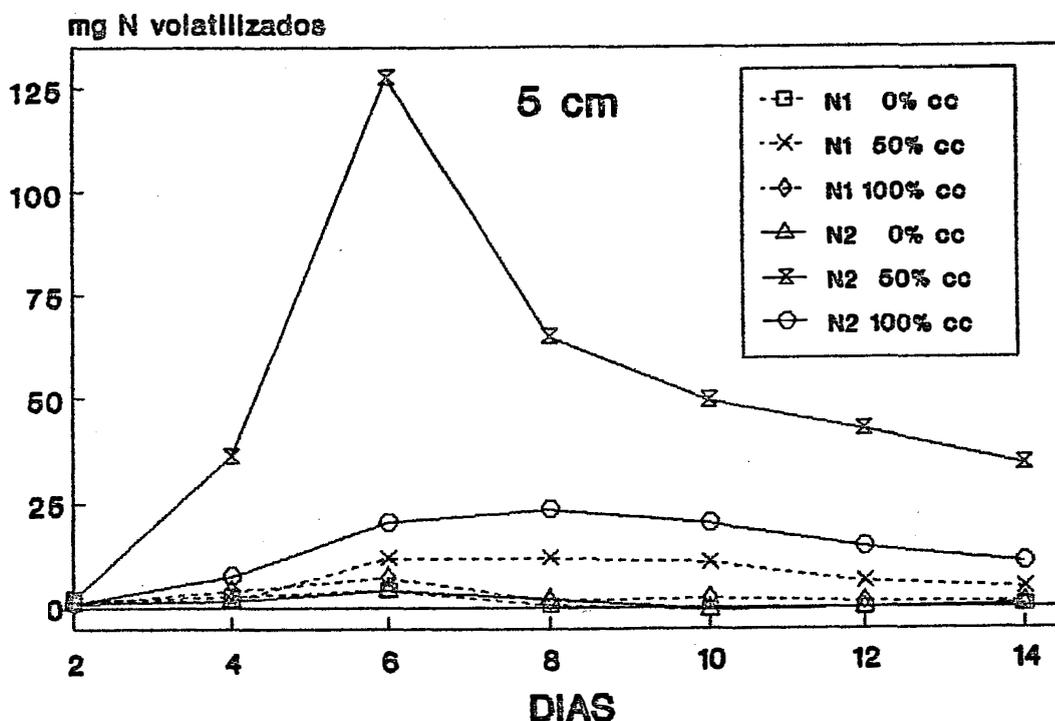


Figura 33. Perdas diárias de nitrogênio por volatilização de amônia decorrentes da aplicação de uréia a 5 cm de profundidade na Areia Quartzosa distrófica, a diferentes doses e umidades iniciais do solo.

forneçada pelo ar, possibilidade esta, confirmada em outros trabalhos por HARGROVE & KISSEL (1977) e TIKKO et alii (1987).

#### 4.3.2.2. Perdas totais

Os dados referentes às perdas totais de  $\text{NH}_3$  neste experimento, expressos em mg de N e em porcentagem da dose aplicada, constam da Tabela 30 do APÊNDICE.

A análise da variância para as perdas totais expressas em mg de N apresentada na Tabela 31 do APÊNDICE, mostra efeitos altamente significativos para os fatores dose de nitrogênio, profundidade de aplicação do fertilizante,

umidade inicial do solo e também para as respectivas interações. O coeficiente de variação foi determinado em 7,78%. Efeitos também altamente significativos para fatores e interações foram observados na análise dos dados de perdas percentuais (APÊNDICE, Tabela 32), para os quais o coeficiente de variação foi de 7,53%. Nota-se que a elevada resposta aos tratamentos, resultando em pequeno número de dados com valores marginais, permitiu a ocorrência de coeficientes de variação razoáveis neste experimento.

#### a) Efeito da dose de nitrogênio

As regressões lineares determinadas para o efeito da dose de N nas perdas de  $\text{NH}_3$  por volatilização dentro dentro das três profundidades e umidades empregadas são apresentadas na Tabela 15. A representação gráfica destas encontram-se na Figuras 34, 35 e 36.

A Figura 34 mostra os efeitos crescentes da dose de N com elevados graus de significância estatística e altos coeficientes de determinação para a aplicação de uréia na superfície do solo, nos três níveis de umidade empregados. Nota-se ainda que as maiores perdas ocorrem no solo com umidade a 50% da capacidade de campo, as menores a 0% CC e que a 100% CC as perdas assumiram valores intermediários, fatos estes que se repetirão a 2,5 e a 5 cm de profundidade. Este efeito será discutido em detalhe no item dedicado à umidade inicial do solo.

É interessante observar os elevados valores das perdas em relação às quantidades de nitrogênio aplicadas.

Tabela 15. Regressões lineares para miligramas de N volatilizados em função da dose de nitrogênio na forma de uréia a diversas profundidades e umidades iniciais em Areia Quartzosa distrófica.

Profundidade	Regressão	F	R <sup>2</sup>
<b>0 cm</b>			
0% cc	Y = 5,065911 + 0,026940X	17,45**	0,95
50% cc	Y = -3,727681 + 0,621188X	9279,65**	0,99
100% cc	Y = 16,000955 + 0,229503X	1266,67**	0,98
<b>2,5 cm</b>			
0% cc	Y = 2,072855 + 0,020773X	10,38**	0,99
50% cc	Y = -21,211557 + 0,469374X	5298,13**	0,99
100% cc	Y = -29,842578 + 0,268285X	1730,93**	0,93
<b>5 cm</b>			
0% cc	Y = 3,406422 + 0,004237X	0,43 <sup>ns</sup>	0,77
50% cc	Y = -41,868194 + 0,224067X	1207,38**	0,85
100% cc	Y = -7,081389 + 0,059568X	85,33**	0,87

\*\* = Significância estatística a 99% de probabilidade

ns = Ausência de Significancia estatística

O efeito da dose nas perdas de NH<sub>3</sub> com a aplicação de uréia a 2,5 cm de profundidade e a três níveis de umidade, apresentado na Figura 35, apresentam mais uma vez elevados graus de significância e altos valores para os coeficientes de determinação (R<sup>2</sup>). Observa-se também as grandes perdas registradas, com exceção dos tratamentos em solo seco, indicando que a aplicação a 2,5 cm não foi suficiente para minimizar a volatilização de amônia neste solo.

A baixa capacidade de retenção de amônia da Areia Quartzosa distrófica fica mais uma vez patente através da observação da Figura 36, que retrata o efeito da dose com

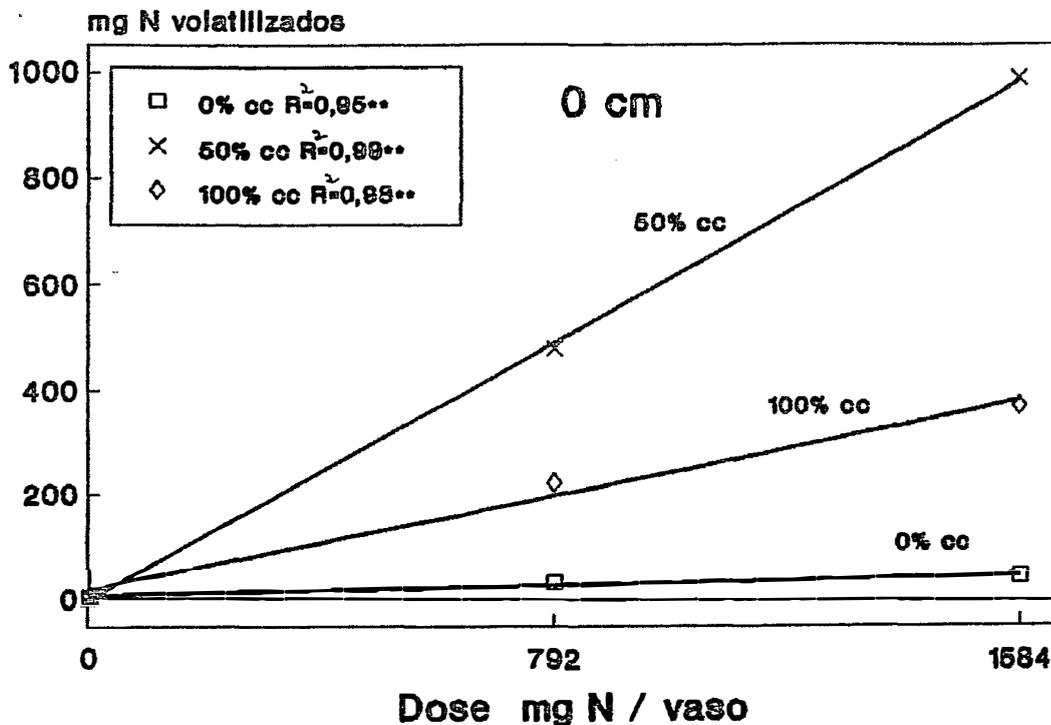


Figura 34. Efeito da dose de N-uréia aplicada em superfície, nas perdas de amônia da Areia Quartzosa distrófica, com três diferentes umidades iniciais.

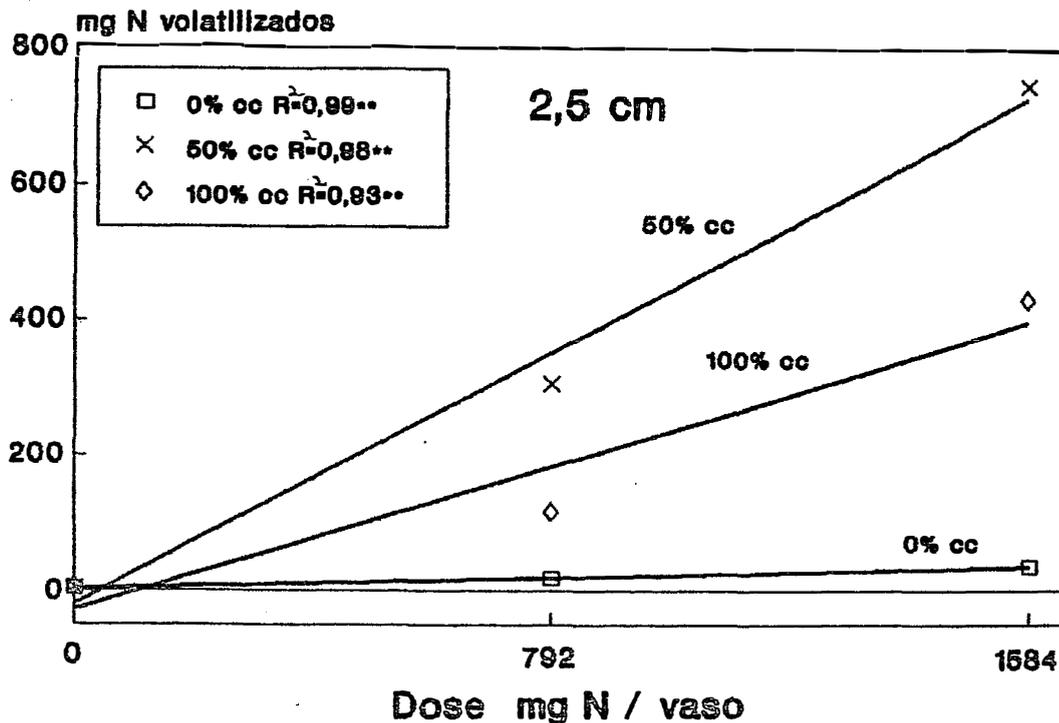


Figura 35. Efeito da dose de N-uréia aplicada a 2,5 cm nas perdas de amônia da areia Quartzosa distrófica, com três diferentes umidades iniciais.

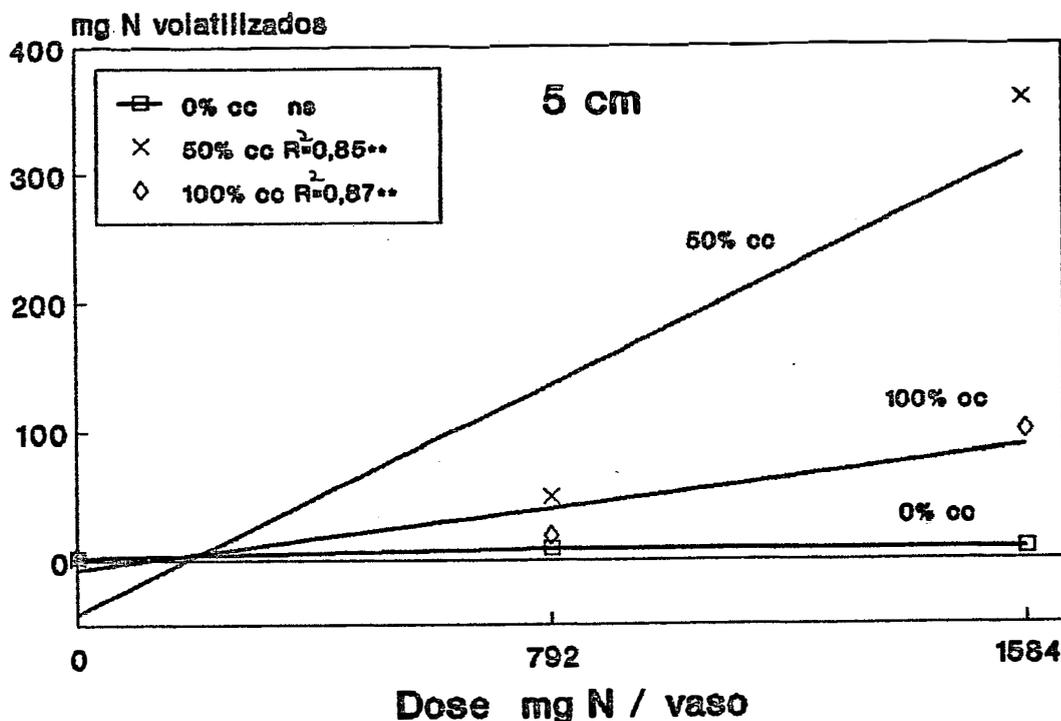
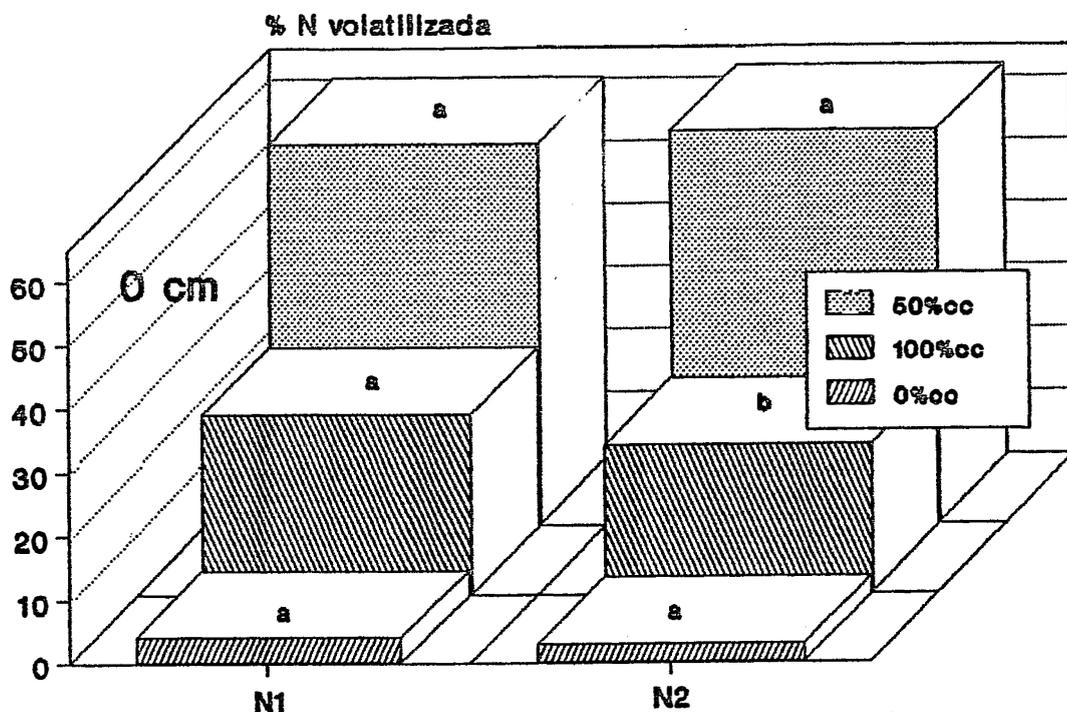


Figura 36. Efeito da dose de N-uréia aplicada a 5 cm nas perdas de amônia da areia Quartzosa distrófica, com três diferentes umidades iniciais.

a aplicação de uréia a 5 cm de profundidade. Ainda neste caso, foram medidas expressivas perdas de nitrogênio em relação à dose empregada, nas umidades de 50 e 100% da capacidade de campo, nas quais foram determinados efeitos altamente significativos para dose e valores também muito elevados para os  $R^2$ . No solo seco não ocorreu efeito significativo para dose.

Na Figura 37 são comparados os valores, em porcentagem do N aplicado, das perdas ocorridas nas doses 1 e 2 de nitrogênio colocadas na superfície do solo.

Para o solo seco, não foi detectada diferença significativa entre doses. A umidade insuficiente para permitir a hidrólise da maior parte da uréia, justifica os



Letras diferentes dentro da mesma unidade indicam existência de diferenças significativas entre doses, pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade.

Figura 37. Perdas percentuais de nitrogênio por volatilização após a aplicação superficial de uréia em duas doses na Areia Quartzosa distrófica, com diferentes umidades iniciais.

baixos valores observados para as perdas percentuais, que foram de 4,0% na dose N1 e 2,8% na dose N2. Embora pequenas, a ocorrência de perdas detectáveis neste caso deve-se à contribuição da umidade do ar para a hidrólise de parte da uréia adicionada, conforme já comentado.

Encontrando-se o solo em 50% da capacidade de campo, as perdas foram de 60,3% e 62,2% da dose aplicada respectivamente nos níveis N1 e N2, que não diferiram estatisticamente entre si. Valores elevados de volatilização em função da aplicação superficial de 120 kg de N-uréia, foram observados por RODRIGUES & KIEHL (1986) em um

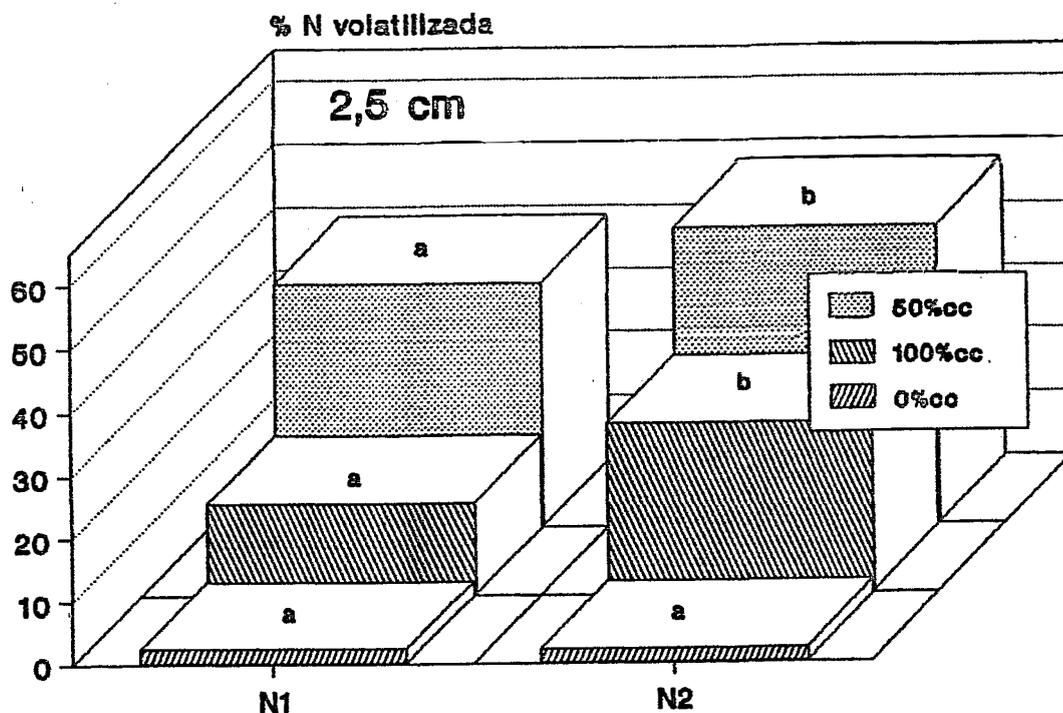
Podzólico Vermelho-amarelo distrófico, que perdeu 95% do N aplicado.

Embora com valores próximos, as perdas nas doses 1 e 2 de nitrogênio diferiram estatisticamente no solo com umidade a 100% da capacidade de campo, revelando maiores perdas percentuais na dose N1 (28,2%) do que na dose N2 (23,2% do N aplicado).

A semelhança estatística a 50% CC e a diferença significativa em favor da dose N1 a 100% CC, provavelmente está ligada à secagem do solo no decorrer do experimento, fato este não medido porém observado visualmente, que pode ter diminuído a taxa de hidrólise da uréia principalmente na dose maior. Este efeito da secagem do solo limitando as perdas foi observado por BOUWMEESTER et alii (1985) e REYNOLDS & WOLF (1987).

As perdas percentuais decorrentes da aplicação de uréia a 2,5 cm de profundidade, que constam da Figura 38, foram significativamente maiores na dose N2, exceto quando o adubo foi aplicado no solo seco, no qual foram registrados os menores valores. Os maiores percentuais volatilizados ocorreram nos tratamentos com o solo umedecido a 50% da capacidade de campo: 38,5% para a dose N1 e 47,0% do N aplicado para a dose N2. A 100% CC as perdas nas doses 1 e 2 de nitrogênio foram de, respectivamente, 14,7 e 27,4%. Novamente se observa que o esgotamento da pequena capacidade de reter amônia da Areia Quartzosa, causa o aumento das perdas mesmo quando avaliadas em proporção da dose aplicada.

A 5 cm de profundidade, as perdas na dose N2 (22,5%) foram significativamente maiores do que as determinadas no nível N1, que corresponderam a 6,1% da dose aplicada, para o solo umedecido a 50% da capacidade de

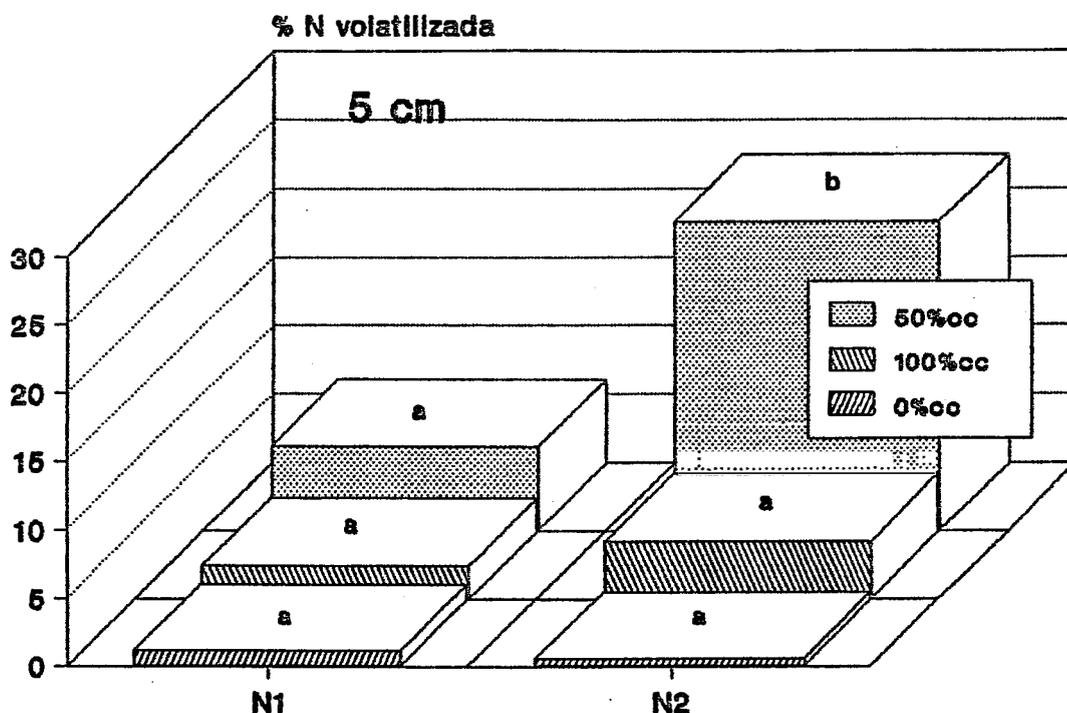


Letras diferentes dentro da mesma umidade indicam existência de diferenças significativas entre doses, pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade.

**Figura 38.** Perdas percentuais de nitrogênio por volatilização após a aplicação de uréia a 2,5 cm em duas doses na Areia Quartzosa distrófica, com diferentes umidades iniciais.

campo, conforme mostra a Figura 39. Perdas elevadas a esta profundidade em um solo arenoso, foram também observadas por RODRIGUES FILHO & KIEHL (1986). Estes autores determinaram que 34,7% do N foi perdido por volatilização com a aplicação de uréia a 5 cm em um Podzólico Vermelho-amarelo.

Ainda na Figura 39, observa-se a ausência de diferenças significativas entre doses dentro dos níveis de umidade de 0 e 100% da capacidade de campo. Para 0% CC este efeito resulta da pequena taxa de hidrólise da uréia. Já no solo a 100% CC, constata-se a ação conjunta do aumento na profundidade e umidade reduzindo as perdas de amônia.



Letras diferentes dentro da mesma unidade indicam existência de diferenças significativas entre doses, pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade.

Figura 39. Perdas percentuais de nitrogênio por volatilização após a aplicação de uréia a 5 cm em duas doses na Areia Quartzosa distrófica, com diferentes umidades iniciais.

#### b) Efeito da profundidade de aplicação do fertilizante

Na Tabela 16 são apresentadas as regressões lineares determinadas para o efeito da profundidade de aplicação de uréia nas perdas de  $\text{NH}_3$ , dentro das doses 1 e 2 de nitrogênio e dos três níveis de umidade inicial do solo. Observa-se que a profundidade revelou efeitos significativos em todas as situações analisadas.

Tabela 16. Regressões lineares para miligramas de N volatilizados em função da profundidade de aplicação da uréia em duas doses de N e três umidades iniciais da Areia Quartzosa distrófica.

Dose	Regressão	F	R <sup>2</sup>
<b>N 1</b>			
0% cc	Y = 31,062628 - 4,591927X	5,05*	0,98
50% cc	Y = 491,460728 - 85,788046X	1763,47**	0,99
100% cc	Y = 221,303509 - 40,767919X	398,25**	0,99
<b>N 2</b>			
0% cc	Y = 47,750021 - 7,192510X	12,40**	0,94
50% cc	Y = 1010,275838 - 125,807878X	3792,54**	0,98
100% cc	Y = 432,289206 - 53,835060X	694,46**	0,59

\* = Significância estatística a 95% de probabilidade

\*\* = Significância estatística a 99% de probabilidade

A Figura 40 ilustra o comportamento das perdas em função da profundidade, nos tratamentos onde foi empregada a dose 1 de nitrogênio (792 mg/vaso). Observa-se a drástica redução das perdas em função do aprofundamento da aplicação do adubo, embora isto não tenha sido suficiente para eliminar a volatilização de NH<sub>3</sub>, principalmente nos níveis de umidade correspondentes a 50 e 100% da capacidade de campo. Este grande potencial de perder amônia da Areia Quartzosa distrófica é observado de maneira ainda mais evidente na Figura 41, que apresenta o efeito da profundidade dentro da dose N2 (1584 mg N/vaso), para a qual, perdas expressivas foram determinadas até na profundidade de 5 cm com o solo umedecido a 50% e 100% da capacidade de campo.

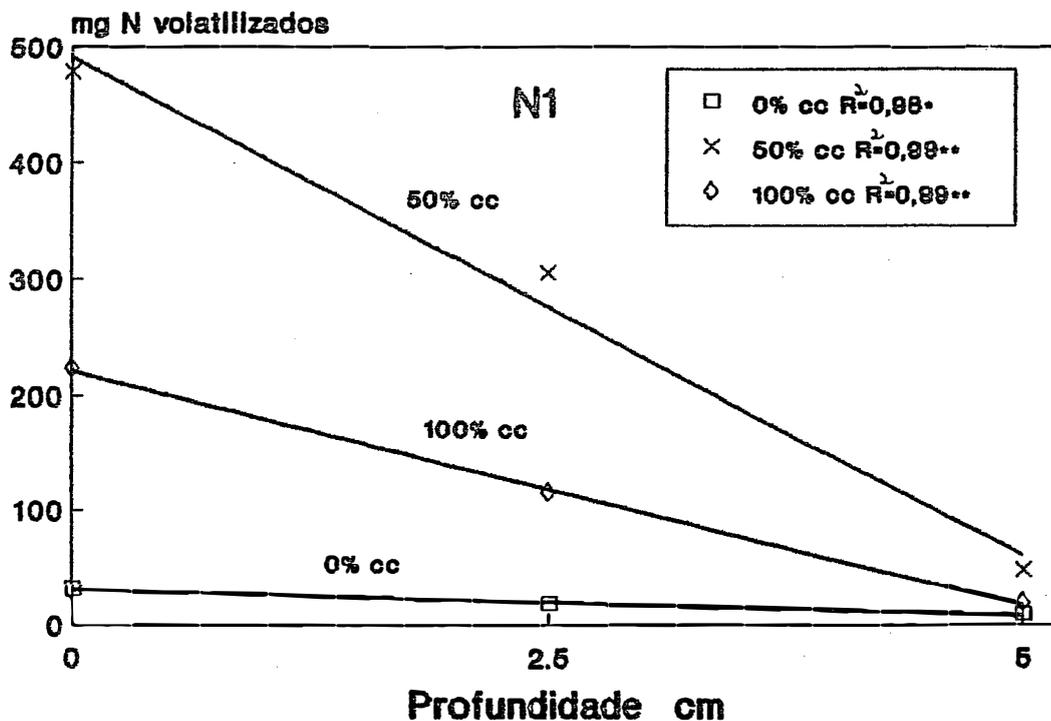


Figura 40. Efeito da profundidade de aplicação de uréia na dose N1 (792 mg N/vaso), nas perdas de amônia da Areia Quartzosa distrófica, com três diferentes umidades iniciais.

Embora a incorporação profunda do adubo neste experimento não tenha sido suficiente para eliminar as perdas de amônia, fica evidente a grande contribuição desta prática para a sua redução, que ocorreu de maneira acentuada, com mostraram as Figuras. 40 e 41. A literatura consultada confirma invariavelmente o efeito redutor das perdas causado pelo aumento da profundidade de aplicação do fertilizante, relatado entre outros, por FEEN & KISSEL (1976), CONNEL et alii (1979), BANSAL & OMANWAR (1981), RAO & BATRA (1983) e Du PREEZ & BURGER (1987b).

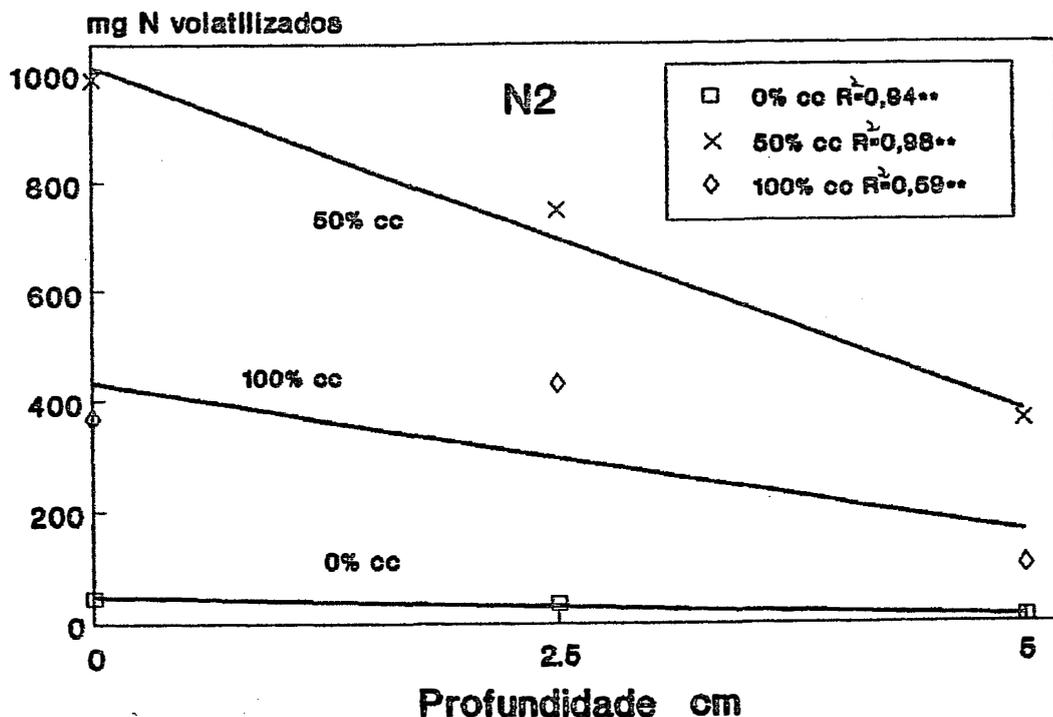


Figura 41. Efeito da profundidade de aplicação de uréia na dose N2 (1584 mg N/vaso), nas perdas de amônia da Areia Quartzosa distrófica, com três diferentes umidades iniciais.

### c) Efeito da umidade inicial do solo

A Tabela 17 mostra as regressões determinadas para o efeito da umidade inicial do solo nas perdas de  $\text{NH}_3$  por volatilização para os níveis 1 e 2 de nitrogênio e nas três umidades iniciais do solo.

A avaliação do efeito da umidade foi feita através da análise de regressões quadráticas, por razões já colocadas quando da discussão acerca deste fator no experimento com uréia no Latossolo Roxo álico. Embora a ocorrência de valores para os  $R^2$  sempre iguais a 1,00 devido

Tabela 17. Regressões quadráticas para miligramas de N volatilizados em função da umidade inicial do solo, em duas doses de N e três profundidades de aplicação de uréia na Areia Quartzosa.

Dose	Regressão	F	R <sup>2</sup>
<b>N 1</b>			
0 cm	$Y = 31,857201 + 15,916248X - 0,140055X^2$	1566,71**	1,00
2,5cm	$Y = 17,993666 + 10,492938X - 0,095116X^2$	722,60**	1,00
5 cm	$Y = 8,897567 + 1,485823X - 0,013838X^2$	15,29**	1,00
<b>N 2</b>			
0 cm	$Y = 45,012266 + 34,403904X - 0,311845X^2$	7767,34**	1,00
2,5cm	$Y = 35,244034 + 24,463649X - 0,205323X^2$	3367,19**	1,00
5 cm	$Y = 9,049266 + 13,012971X - 0,121257X^2$	1174,38**	1,00

\*\* = significância estatística a 99% de probabilidade

às curvas terem sido determinadas com apenas três pontos, anularem a utilidade deste parâmetro na avaliação dos efeitos, o elevado grau de significância determinado pelo teste de F, acima de 99% para todas as regressões analisadas, denotam a clara resposta que ocorreu para a umidade neste experimento.

As Figuras 42 e 43 representam graficamente as regressões determinadas. Em ambas, são notados os pequenos valores de perdas ocorridos no solo seco, dado à pouca hidrólise da uréia, conforme também observado, entre outros, por RAO & BATRA (1983) e TIKKO et alii (1987).

O nível inicial de 50% CC, provendo a umidade necessária para a hidrólise da uréia, promoveu as maiores perdas em todos os casos. A partir daí, ou seja, a 100% da

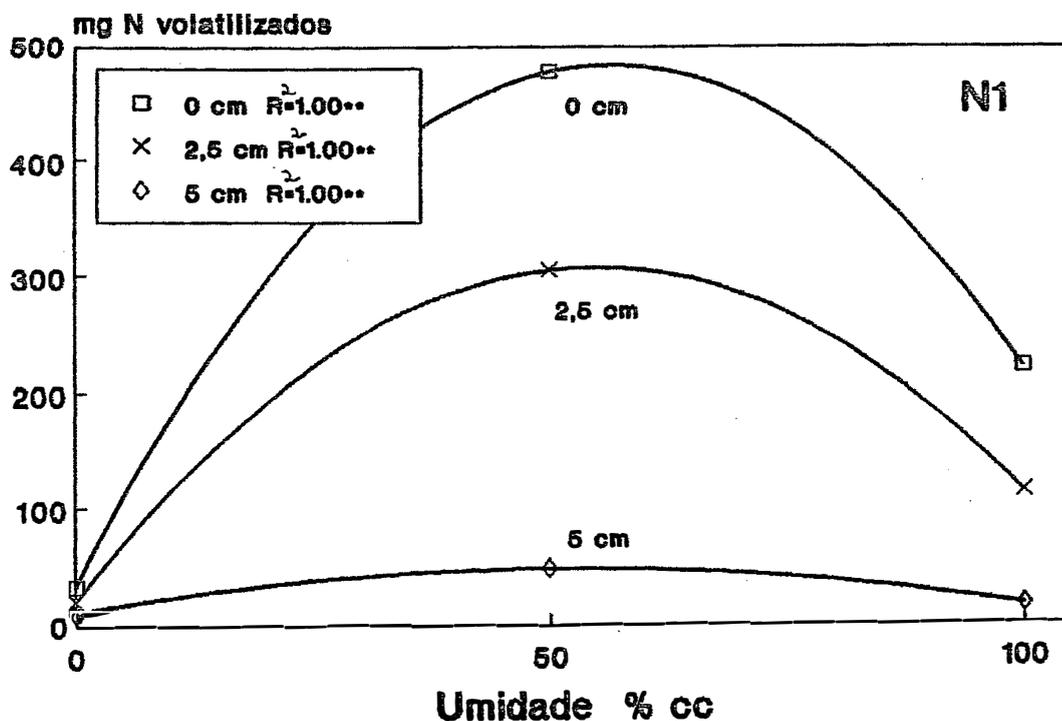


Figura 42. Efeito da umidade inicial do solo nas perdas de amônia da Areia Quartzosa distrófica, para uréia aplicada na dose N1 em três profundidades.

capacidade de campo, a diluição da solução do solo e a dispersão do íon  $\text{NH}_4^+$  por um maior volume, facilitando o seu acesso a maior número de cargas negativas e assim incrementando a sua adsorção, ocasionou a sensível redução das perdas. Este efeito foi observado em vários trabalhos, entre os quais, PRASAD (1976), FENN & ESCARZAGA (1976 e 1977), BLACK et alii (1987) e FLEISHER et alii (1987).

A observação das Figuras 42 e 43 permite ainda constatar o elevado grau de interdependência dos fatores dose, profundidade e umidade, que faz o comportamento de cada um variar em função de alterações nos demais. As maiores perdas coincidiram com as menores profundidades de aplicação e com as maiores doses. No

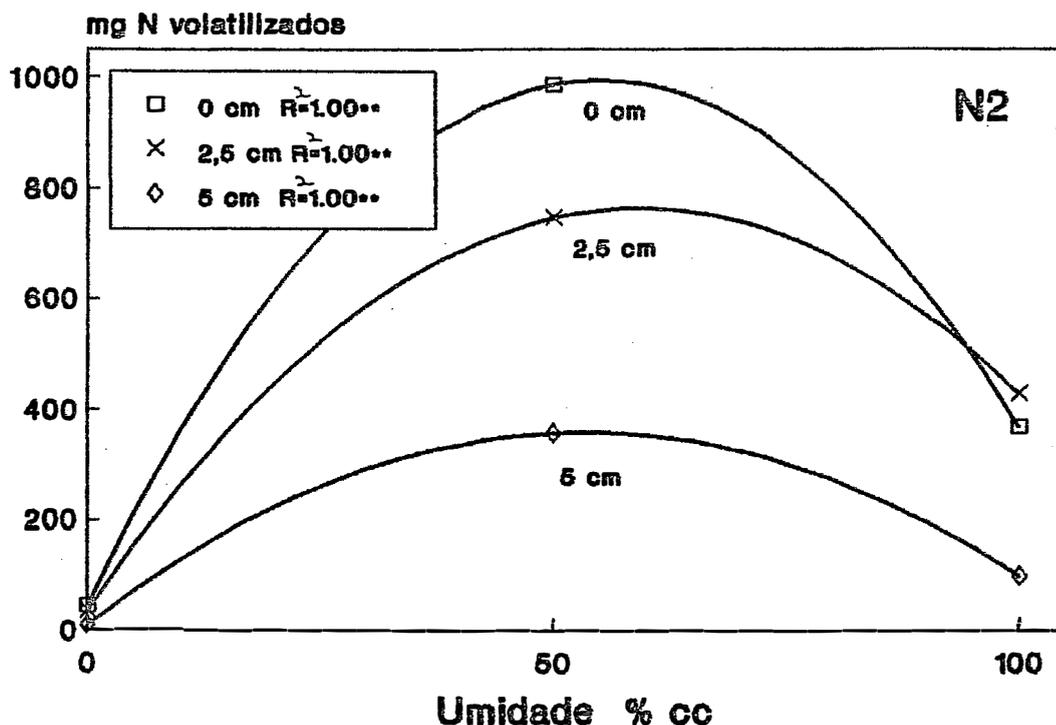


Figura 43. Efeito da umidade inicial do solo nas perdas de amônia da Areia Quartzosa distrófica, para uréia aplicada na dose N2 em três profundidades.

entanto, o simples aprofundamento da aplicação, não foi suficiente para eliminar as perdas neste solo, que foram influenciadas também pela umidade. Assim sendo, a análise de um destes fatores de maneira isolada, mostra-se insuficiente para determinar as práticas necessárias para minimizar as perdas de amônia por volatilização.

#### 4.4. ESTUDOS COM VERTISSOLO

##### 4.4.1. Experimento com aquamônia

Os dados médios de perdas diárias de  $\text{NH}_3$  ocorridas neste experimento, expressos em mg de N, bem como os valores acumulados (perdas totais) em mg de N e em porcentagem da dose aplicada, constam da Tabela 33 do APÊNDICE. Esta, apresenta invariavelmente dados inexpressivos, dispersos e com grande número de valores negativos.

Apesar do uso nos coletores de soluções ácidas mais diluídas e em menores quantidades visando manter a elevada eficiência do método em baixos níveis de perdas, procedimento descrito no item 3.3.4.1, não foram medidos valores apreciáveis.

As Tabelas 33 e 34 do APÊNDICE apresentam as análises de variância das observações para perdas totais em mg de N e em porcentagem da dose aplicada, as quais revelaram coeficientes de variação respectivamente de 137,98% e 124,51%, atestando a inconsistência dos dados obtidos. Não merece portanto nenhuma atenção o único efeito significativo determinado, que ocorreu para a interação dose versus umidade, quando no entanto, estas não apresentaram significância estatística individualmente.

Diante do relatado acima, pode-se afirmar que neste experimento não ocorreram perdas detectáveis de amônia. Altos valores para coeficientes de variação (CV) quando da observação de valores nulos para as perdas de amônia foram também medidos por LIBARDI & REICHARD (1978) usando uréia enriquecida com  $\text{N}^{15}$ , indicando que os altos CV correspondem à não ocorrência de perdas em níveis razoáveis.

Duas características do Vertissolo contribuem para explicar a ausência de perdas. O teor de argila de 57% e a CTC de 50,1 e.mg/100g conferem ao solo estudado uma elevada capacidade de retenção de  $\text{NH}_4^+$  e também um grande poder tampão, que vai evitar grandes alterações no pH com a adição de um adubo com reação alcalina, como é o caso da aquamônia. A profundidade mínima de aplicação do fertilizante neste experimento, de 5 cm, mostrou-se então suficiente para permitir a retenção pelo solo de toda a amônia colocada.

A elevada taxa de retenção de nitrogênio amoniacal em solos de alta CTC é relatada por vários autores: HUNT & ADAMSEN (1985), O'TOOLE et alii (1985), IZZURRALDE et alii (1987) e MARTENS & BREMER (1989).

A ausência de perdas de  $\text{NH}_3$  proveniente da aquamônia neste ensaio revela uma resposta vantajosa em termos práticos. Indica a aptidão do Vertissolo para receber aplicações deste adubo sem que ocorram perdas de grande monta por volatilização de amônia, implicando no maior aproveitamento do nitrogênio pelas culturas.

#### 4.4.2. Experimento com uréia

##### 4.4.2.1. Perdas diárias

Os valores médios obtidos para as perdas diárias de  $\text{NH}_3$  por volatilização, em mg de N e em porcentagem da dose aplicada são apresentados na Tabela 35 do APENDICE.

Na Figura 44 são mostradas as perdas médias em mg para os tratamentos nos quais a uréia foi aplicada na

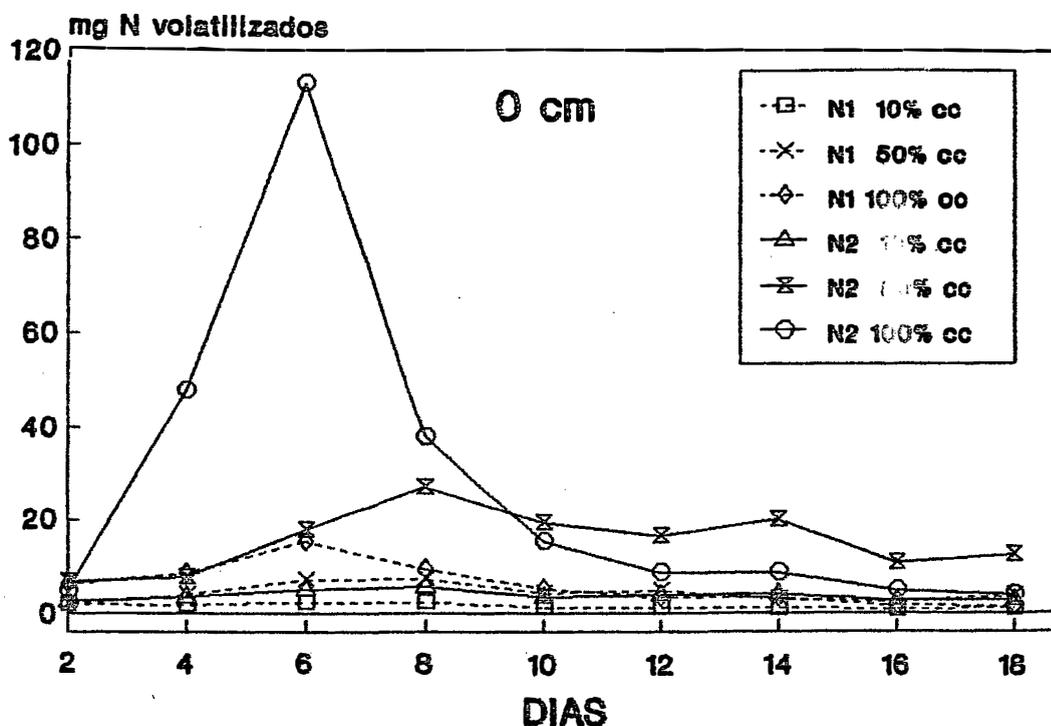


Figura 44. Perdas diárias de nitrogênio por volatilização de amônia decorrentes da aplicação superficial de uréia no Vertissolo, a diferentes doses e umidades iniciais do solo

superfície do solo. Nesta, pode ser observado que as maiores perdas ocorreram entre o sexto e o oitavo dia. A partir do décimo dia estas assumiram valores semelhantes dentro de cada tratamento até o final do experimento. Revela-se então uma liberação mais lenta da amônia pelo Vertissolo, quando comparado com a Areia Quartzosa distrófica e o Latossolo Roxo álico, nos quais as maiores perdas ocorreram dois dias após a aplicação da uréia. Comportamento similar foi observado por KIEHL (1989) em estudo no qual as maiores perdas de amônia proveniente da uréia aplicada em Vertissolo ocorreram entre o quinto e o décimo segundo dia, de maneira mais lenta que nos outros solos estudados, a saber: Terra Roxa estruturada, Latossolo Roxo eutrófico e Areias Quartzosas.

Considerando a média dos tratamentos que

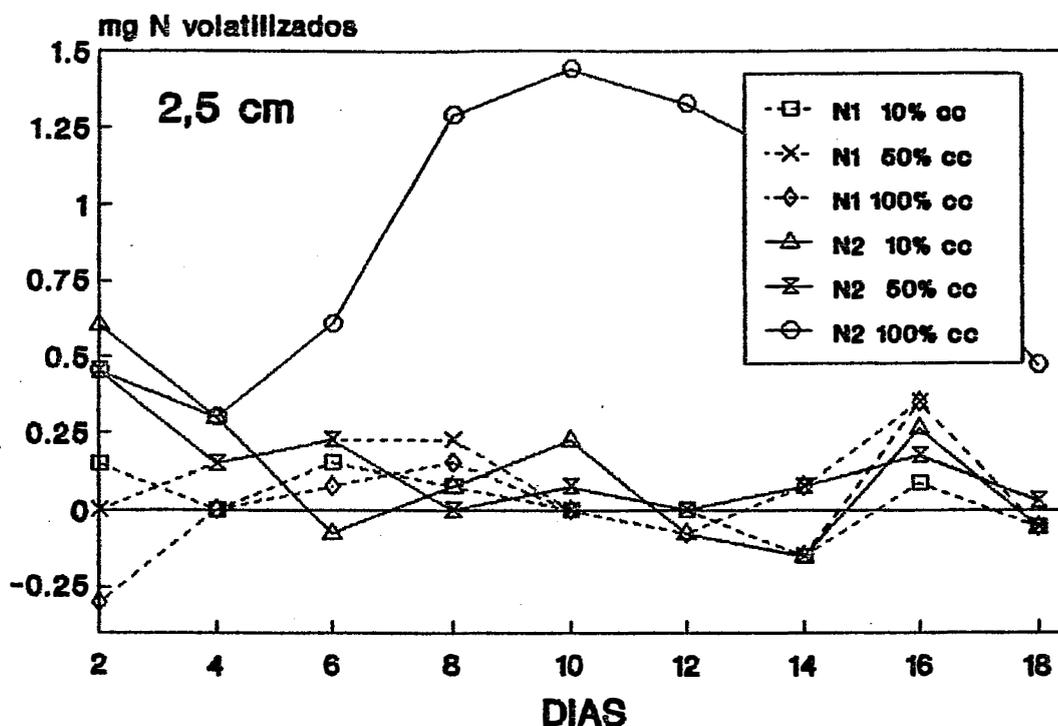


Figura 45. Perdas diárias de nitrogênio por volatilização de amônia decorrentes da aplicação de uréia a 2,5 cm de profundidade no Vertissolo, a diferentes doses e umidades iniciais do solo

constam da Figura 44, foram perdidos aos dois dias apenas 7,6% da amônia volatilizada no decorrer do experimento. Aos dez dias as perdas representavam 70% do total. Deve-se notar ainda que as maiores perdas foram medidas para o tratamento com a dose 2 de nitrogênio e umidade inicial do solo correspondente a 50% da capacidade de campo.

A lentidão registrada na volatilização de  $\text{NH}_3$  foi acentuada pela aplicação da uréia a 2,5 cm de profundidade, conforme se pode ver na Figura 45, para o tratamento com dose N2 e umidade inicial em 100% CC. Neste, aos dois dias, as perdas foram de 5,7% do total medido. O pico ocorreu ao décimo segundo dia da instalação do experimento, tendo neste ponto atingido apenas 51,5% do total, valor que chegou a 82,5% no décimo quarto dia. Os

demais tratamentos constantes desta figura não apresentaram valores consistentes para perdas de  $\text{NH}_3$ .

A aplicação da uréia a 5 cm de profundidade não permitiu a ocorrência de perdas em valores palpáveis. Por esta razão foi dispensado o uso de uma figura para apresentá-los.

#### 4.4.2.2. Perdas totais

Os dados médios de perdas totais de nitrogênio por volatilização de amônia, expressos em mg de N e em porcentagem da dose aplicada são apresentados na Tabela 35 do APÊNDICE.

A análise da variância para os dados em mg de N, que consta da Tabela 36 do APÊNDICE, revelou efeitos altamente significativos para dose de N, profundidade de aplicação do fertilizante, umidade inicial do solo e para as interações destes fatores. O coeficiente de variação foi determinado em 11,12%. Para os dados expressos em porcentagem, os efeitos foram também altamente significativos para os fatores e suas interações, apresentando um coeficiente de variação de 11,85%.

Embora a dimensão dos dados obtidos no experimento com uréia no Vertissolo seja menor que as do mesmo experimento na Areia Quartzosa distrófica, os coeficientes de variação mostram valores razoáveis. Isto se deve à alta sensibilidade do sistema coletor de amônia ter sido mantida através do uso de soluções ácidas mais diluídas, de acordo com a menor expectativa de volatilização máxima para este solo, determinada em teste preliminares.

## a) Efeito da dose de nitrogênio

As regressões lineares determinadas para as perdas de  $\text{NH}_3$  em função da dose constam da Tabela 18. No caso da uréia aplicada superficialmente, os efeitos foram altamente significativos e os coeficientes de determinação iguais a 0,98, 0,93 e 0,90 para os níveis de umidade de, respectivamente, 10, 50 e 100% da capacidade de campo. Na profundidade de 2,5 cm, só houve significância para o efeito da dose no nível de umidade inicial de 100% CC. Para a aplicação de uréia a 5 cm não houve efeito para dose,

Tabela 18. Regressões lineares para miligramas de N volatilizados em função da dose de nitrogênio aplicada na forma de uréia a diversas profundidades e umidades iniciais no Vertissolo.

Profundidade	Regressão	F	R <sup>2</sup>
<b>0 cm</b>			
10% cc	$Y = -0,748833 + 0,020534X$	315,07**	0,98
50% cc	$Y = -9,380222 + 0,086468X$	5586,77**	0,93
100% cc	$Y = -22,629389 + 0,154422X$	17818,28**	0,90
<b>2,5 cm</b>			
10% cc	$Y = 0,353889 + 0,000359X$	0,10 <sup>ns</sup>	0,42
50% cc	$Y = 1,080028 - 0,000028X$	0,0006 <sup>ns</sup>	0,007
100% cc	$Y = -0,984778 + 0,004821X$	17,36**	0,74
<b>5 cm</b>			
10% cc	$Y = 0,369944 + 0,000485X$	0,18 <sup>ns</sup>	0,82
50% cc	$Y = 1,096333 - 0,000028X$	0,0006 <sup>ns</sup>	0,009
100% cc	$Y = 0,265389 + 0,000143X$	0,02 <sup>ns</sup>	0,58

\*\* = Significância estatística a 99% de probabilidade

ns = Ausência de significância estatística

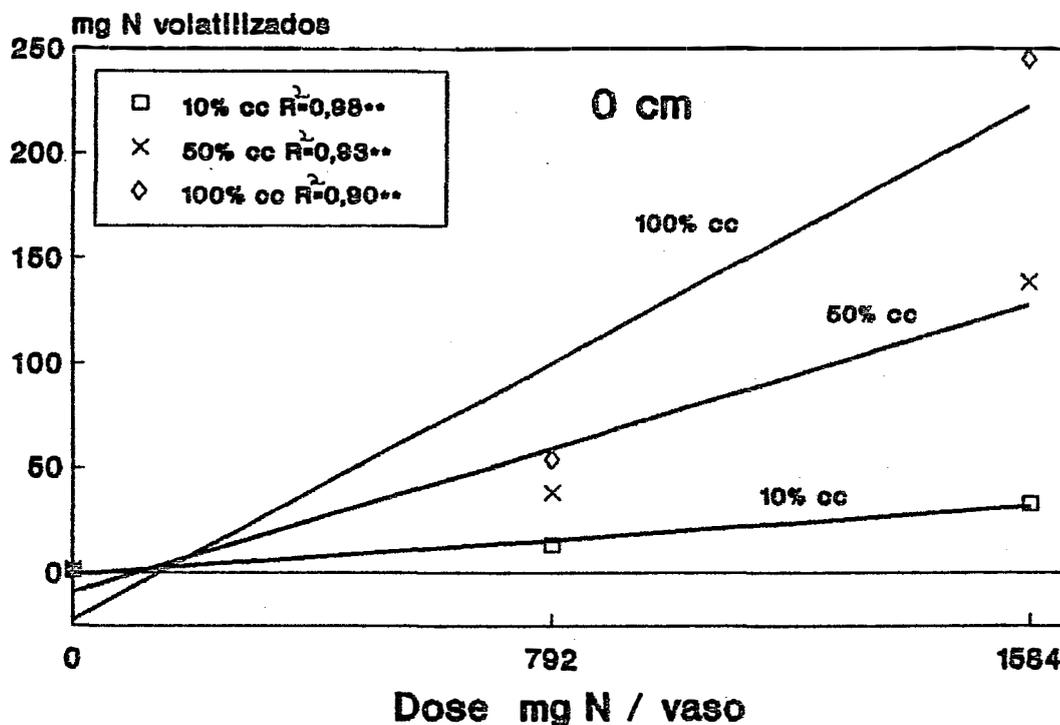


Figura 46. Efeito da dose de N-uréia aplicada em superfície, nas perdas de amônia do Vertissolo com três diferentes umidades iniciais.

devido à não ocorrência de perdas detectáveis neste caso.

As Figuras 46 e 47 ilustram o efeito da dose nas profundidades de 0 e 2,5 cm. Nesta última, como não houve significância para dose nas umidades iniciais de 10 e 50% CC, são apresentados para estes dois casos gráficos ligando as médias observadas.

Nas Figuras 46 e 47 observa-se, além dos efeitos crescentes, que as maiores perdas devido ao aumento das doses ocorreram dentro dos maiores níveis de umidade inicial do solo, evidenciando a interação entre estes dois fatores. É interessante notar que as maiores perdas nas maiores umidades, diferem do comportamento observado nos experimentos com uréia em Latossolo Roxo álico e Areia

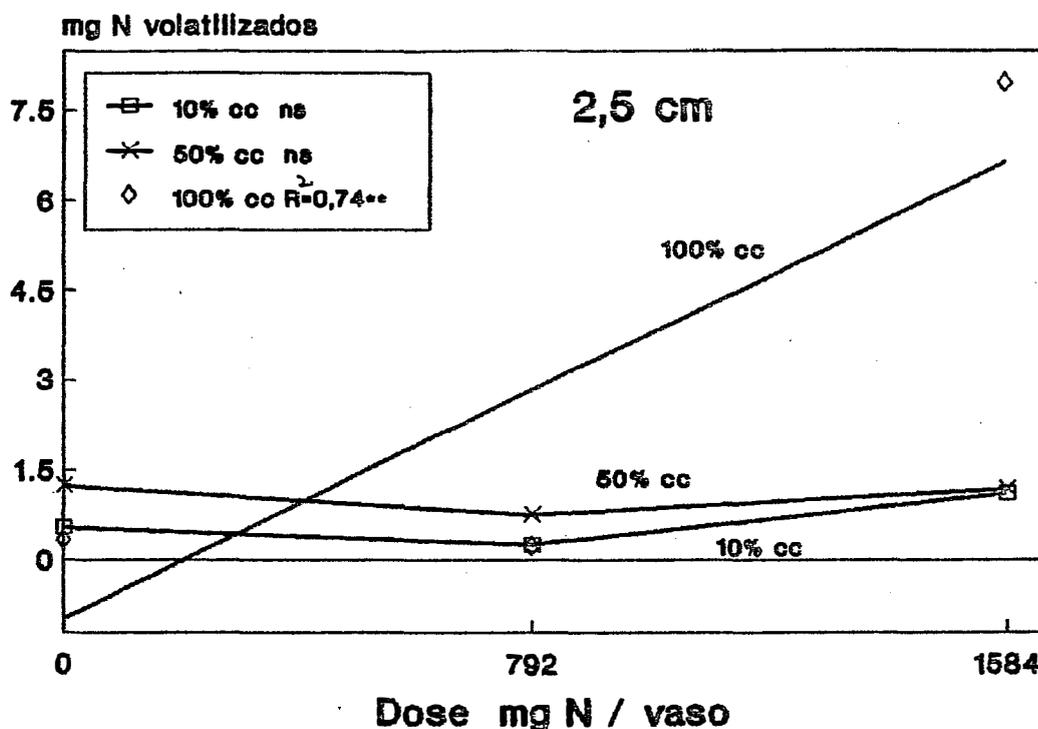
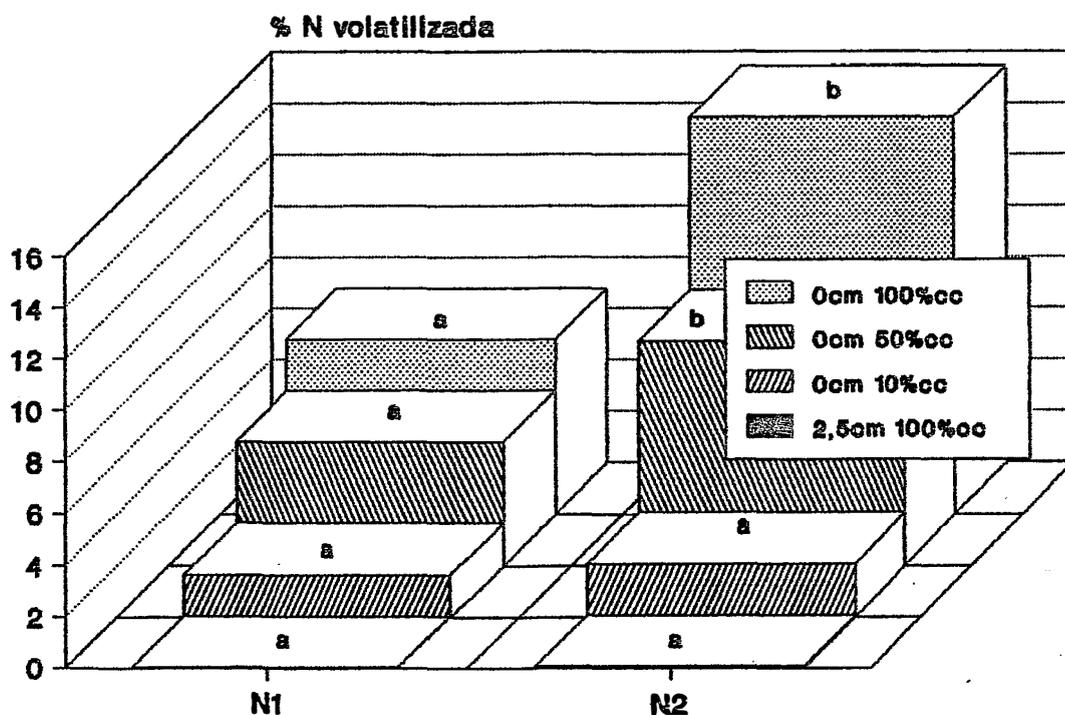


Figura 47. Efeito da dose de N-uréia aplicada a 2,5 cm de profundidade nas perdas de amônia do Vertissolo, com três diferentes umidades iniciais.

quartzosa distrófica, nos quais os maiores valores eram medidos sempre no nível de 50% da capacidade de campo.

A interação dose X profundidade X umidade pode ser vista claramente na Figura 47. A aplicação de uréia a 2,5 cm, resultou em efeito significativo para dose a 100% CC mas com valores de perdas sensivelmente menores do que neste tratamento em superfície. Quanto às umidades iniciais de 10% e 100% CC, a aplicação do adubo a 2,5 cm anulou o efeito da dose de N.

Na Figura 48 podem ser comparadas as perdas nas doses N1 e N2 em termos de porcentagem do nitrogênio aplicado. Em superfície, nas três umidades iniciais do solo e a 2,5 cm, na umidade correspondente a 100% CC.



Letras diferentes dentro da mesma unidade indicam existência de diferenças significativas entre doses, pelo teste de Tukey a 95% de probabilidade.

Figura 48. Perdas percentuais de nitrogênio por volatilização, após a aplicação de uréia em duas doses no Vertissolo, a diferentes profundidades e umidades iniciais.

Para uréia aplicada em superfície na umidade de 100% da capacidade de campo, as perdas nas doses N1 e N2 foram de respectivamente 6,79 e 15,46%, diferindo significativamente entre si. Também a 50% CC ocorre diferença significativa entre N1 e N2. Neste caso as perdas proporcionais foram de 4,78% para o nível 1 e de 8,72% na dose maior.

Estas observações contrariam o observado por HARGROVE & KISSEL (1979), que determinaram decréscimo significativo das perdas percentuais em função da aplicação superficial de níveis crescentes de nitrogênio na forma de

uréia em um Vertissolo. Já STUMPE et alii (1984) relatam, também em Vertissolo, que a aplicação superficial de uréia em doses equivalentes a 25, 50 e 100 kg N/ha resultou em perdas com valores próximos a 21% nos três casos.

Diante das divergências encontradas na literatura, é possível considerar que, neste experimento, apesar da elevada CTC do solo, a aplicação superficial do adubo permitindo o seu contato direto com a atmosfera, não oferece nenhum impedimento físico para a fuga de  $\text{NH}_3$ . Também não facilita a difusão do íon  $\text{NH}_4^+$  por um maior volume de solo, o que aumentaria a sua adsorção. Isto fez com que as perdas pudessem ocorrer em quantidades expressivas, principalmente na maior dose.

Em superfície e a 10% da capacidade de campo, as perdas nas doses N1 e N2 foram de respectivamente 1,65 e 2,08% do N aplicado, valores estes que não diferiram estatisticamente entre si. É provável que neste nível de umidade não tenha havido hidrólise de toda a uréia aplicada, impedindo assim a expressão do efeito da dose.

Para a aplicação de uréia a 2,5 cm de profundidade, a Figura 48 mostra apenas as perdas a 100% CC, das quais se observam os baixos valores e a ausência de diferenças significativas entre as perdas percentuais na dose N1 e N2, que foram de respectivamente 0,03 e 0,50% da dose colocada. Isto acentua o efeito interativo de dose e profundidade no controle das perdas de  $\text{NH}_3$  por volatilização.

b) Efeito da profundidade de aplicação do fertilizante

As regressões lineares determinadas para as perdas de  $\text{NH}_3$  em mg de N em função da profundidade de aplicação de uréia nas doses 1 e 2 de nitrogênio e nos três níveis de umidade empregados constam da Tabela 19. Nesta, observa-se que em todas as doses e umidades, a profundidade apresentou efeitos altamente significativos.

Tabela 19. Regressões lineares para miligramas de N volatilizados em função da profundidade de aplicação da uréia em duas doses de N e três umidades iniciais no Vertissolo.

Dose	Regressão	F	R <sup>2</sup>
<b>N 1</b>			
10% cc	Y = 10,886500 - 2,504600X	46,70**	0,73
50% cc	Y = 31,678334 - 7,415067X	409,36**	0,75
100% cc	Y = 44,838222 - 10,700800X	852,53**	0,75
<b>N 2</b>			
10% cc	Y = 27,663777 - 6,351733X	300,38**	0,75
50% cc	Y = 115,364553 - 27,401999X	5590,42**	0,75
100% cc	Y = 206,665336 - 48,875334X	17785,22**	0,77

\*\* = Significância estatística a 99% de probabilidade

As Figuras 49 e 50 mostram os gráficos das regressões determinadas para, respectivamente, as doses 1 e 2 de nitrogênio. As duas figuras ilustram o efeito decrescente nas perdas com o aumento da profundidade. Observa-se ainda as maiores perdas coincidindo com a dose mais alta e com os maiores níveis de umidade inicial do solo.

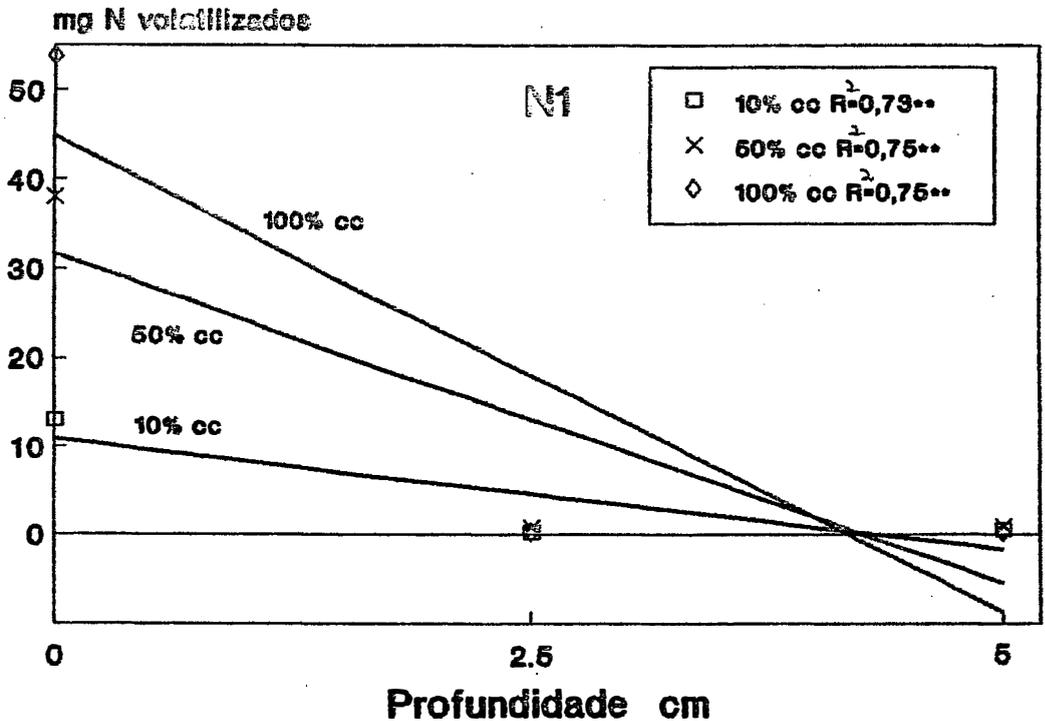


Figura 49. Efeito da profundidade de aplicação de uréia na dose N1 (792 mg N/vaso), nas perdas de amônia do Vertissolo com três diferentes unidades iniciais.

A literatura consultada é unânime quanto às vantagens da aplicação profunda do fertilizante, relacionada com a diminuição das perdas de amônia. O que vale ser ressaltado neste experimento é o fato da aplicação a 2,5 cm já ter sido suficiente para praticamente eliminar as perdas. Em apenas um tratamento (N2, 2,5cm, 100% CC) estas apresentaram valores consistentes e, mesmo assim, de pouca monta: 7,96 mg de N ou 0,50% da dose de 1584 mg N/ vaso.

Convém lembrar que no experimento com Areia Quartzosa distrófica foram medidas perdas expressivas de amônia com aplicação de uréia a até 5 cm de profundidade. Esta constatação ressalta a elevada capacidade de retenção de nitrogênio amoniacal apresentada pelo Vertissolo.

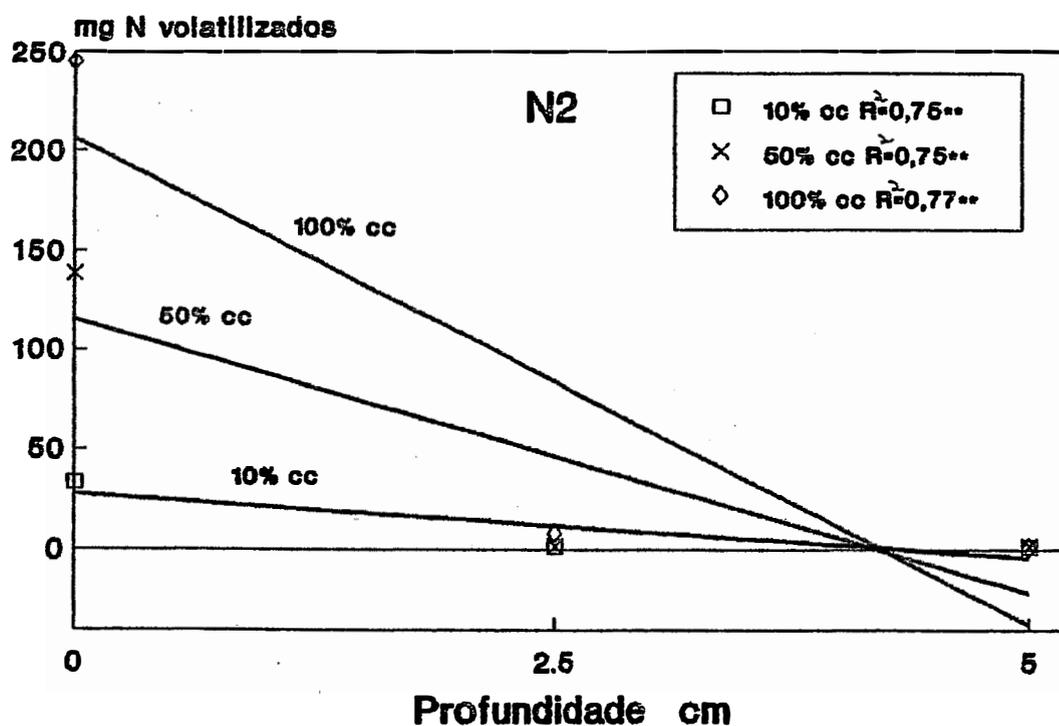


Figura 50. Efeito da profundidade de aplicação de uréia na dose N2 (1584 mg N/vaso), nas perdas de amônia do Vertissolo com três diferentes umidades iniciais.

### c) Efeito da umidade inicial do solo

A Tabela 20 apresenta as regressões lineares obtidas para o efeito da umidade inicial do solo nas perdas de amônia. Este, só foi significativo nos níveis N1 e N2 em superfície e N2 a 2,5 cm de profundidade. De maneira diferente do que ocorreu no Latossolo Roxo álico e na Areia Quartzosa distrófica, o efeito da umidade no Vertissolo foi tipicamente linear e crescente.

A Figura 51 ilustra estes efeitos. Nesta, além das regressões significativas, foi traçado gráfico

Tabela 20. Regressões lineares para miligramas de N volatilizados em função da umidade inicial do solo, para duas doses de N e três profundidades de aplicação de uréia no Vertissolo.

Dose	Regressão	F	R <sup>2</sup>
<b>N 1</b>			
0 cm	$Y = 11,079426 + 0,446729X$	483,39**	0,96
2,5cm	$Y = 0,453661 - 0,000831X$	0,002 <sup>ns</sup>	0,02
5 cm	$Y = 0,719924 - 0,003419X$	0,028 <sup>ns</sup>	0,34
<b>N 2</b>			
0 cm	$Y = 13,603954 + 2,345701X$	13327,65**	0,99
2,5cm	$Y = -0,765798 + 0,078486X$	14,92**	0,81
5 cm	$Y = 1,414557 - 0,007906X$	0,15 <sup>ns</sup>	0,85

\*\* = significância estatística a 99% de probabilidade

ns = Ausência de significância estatística

ligando as médias observadas para o nível N2 a 2,5 cm para mostrar as perdas inexpressivas ocorridas neste caso.

Nos dois experimentos anteriores, ocorreram perdas muito baixas de amônia quando a uréia foi aplicada em solo seco. Visando avaliar o comportamento destas perdas em um solo umedecido, porém em pequeno grau, utilizou-se como nível mais baixo neste experimento a umidade correspondente a 10% da capacidade de campo. Como consequência, os valores medidos neste nível foram mais altos do que em solo seco nos outros ensaios, sem no entanto ocorrerem perdas de grande monta. Provavelmente a 10% CC não houve suprimento de umidade suficiente para hidrolizar toda a uréia colocada.

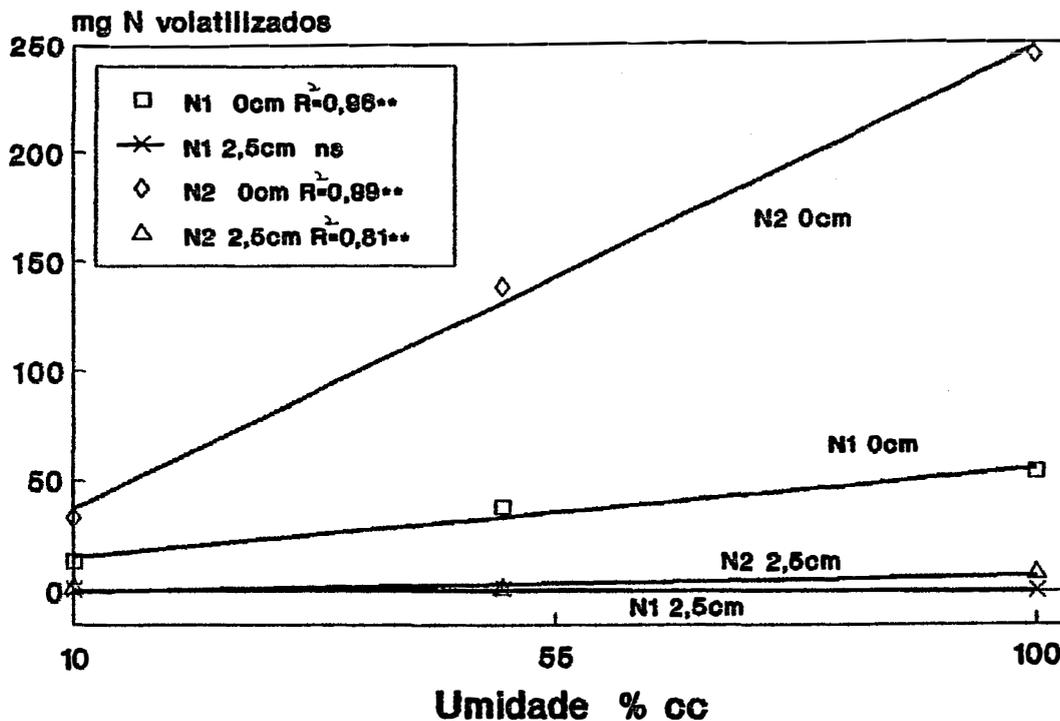


Figura 51. Efeito da umidade inicial do solo nas perdas de amônia do Vertissolo, para uréia aplicada em duas doses e a duas profundidades.

O efeito crescente da umidade inicial do solo foi altamente significativo, tendo apresentado ainda elevados coeficientes de determinação. Razões para este comportamento diferenciado do Vertissolo não se encontram bem explicadas na literatura. KHENGRE & SAVANT (1976) aplicando  $\text{NH}_3$  anidra a um Vertissolo, observaram que o coeficiente de difusão de amônia cresceu com o aumento da umidade até a capacidade de campo. Entretanto, esta maior difusão pode ser interpretada como algo que possa facilitar as perdas, mas também como causadora de uma melhor distribuição no volume de solo, facilitando a adsorção do íon  $\text{NH}_4^+$ .

FENN & ESCARZAGA (1976) observaram pequenas

perdas em um solo seco ao ar (8% de umidade em peso) as quais cresceram deste nível até 31%. Daí até a saturação do solo (55%) as perdas diminuíram. BOUWMEESTER et alii (1985) determinaram uma elevação de 8% nas perdas com aumento da umidade de 21% (ponto de murcha permanente), para 31%. No entanto, nenhum dos dois trabalhos informam se a umidade de 31% corresponde à capacidade de campo dos solos estudados.

Tendo o Vertissolo a capacidade de reter fortemente a água, o nível de 50% CC pode não ter sido suficiente para permitir a hidrólise de toda a uréia aplicada, o que possivelmente só ocorreu com o solo a 100% da capacidade de campo.

Um outro fator que pode ser considerado na discussão do efeito ocorrido neste solo é a sua composição mineralógica, a qual, contém predominantemente montmorilonita na fração argila. NOMMIK & VAHTRAS (1982) informam que esta argila fixa  $\text{NH}_4^+$  pois, ao se contrair, prende o amônio entre as superfícies interlamelares. Ao ser umedecida, a expansão do mineral libera o  $\text{NH}_4^+$  fixado, que passa para a forma trocável.

No Vertissolo, encontrando-se úmido, a não fixação do  $\text{NH}_4^+$  pode sujeitar a perdas uma maior quantidade de amônia. No entanto, os autores citados acima não discorrem sobre uma eventual relação entre fixação de  $\text{NH}_4^+$  pela montmorilonita e a perda de amônia por volatilização, tratando-se portanto esta, de uma hipótese a ser verificada.

## 5. CONCLUSÕES

- a) O sistema para determinação de perdas por volatilização desenvolvido neste trabalho, revelou alta eficiência de recuperação da amônia, sendo ainda de fácil manuseio e de baixo custo de confecção e operação.
- b) A faixa de atuação do sistema, neste estudo, foi de até 265,11 mg de nitrogênio por coleta. Trabalhos em faixas diferentes desta devem merecer um estudo prévio de calibração, específico para cada caso.

A utilização do sistema citado acima em experimentos com diferentes solos permitiu as seguintes conclusões:

- c) Dentre os solos utilizados e de maneira geral, independente da forma de aplicação ou umidade, as maiores perdas sempre ocorreram na Areia Quartzosa distrófica, indicando que neste tipo de solo a aplicação de nitrogênio, através das fontes estudadas, deve ser feita levando em conta sua baixa capacidade de retenção de amônia, buscando práticas que diminuam a possibilidade de perdas por volatilização. O Vertissolo foi o que apresentou as menores perdas, evidenciando que, desde que a aplicação não seja feita em superfície, estas, independente das fontes estudadas, são negligíveis. Quanto ao Latossolo Roxo álico, as menores perdas ocorreram quando foi utilizada a uréia, até

certo ponto, independente da forma de aplicação e umidade. Neste solo, quando se utilizou aquamônia, mesmo para a maior profundidade estudada, não houve completa eliminação das perdas. Isto pode indicar que, para este tipo de solo, a fonte mais segura seja a uréia.

- d) Quanto aos efeitos da umidade e profundidade, com as duas fontes estudadas, não é possível dissociá-los. Isto indica que, para cada conjunto de fatores, devem ser verificadas as melhores condições de aplicação, como por exemplo no caso da utilização de aquamônia, onde as perdas foram sempre menores nos mais altos níveis de umidade.
- e) Em todos os casos, independente das fontes, tipo de solo, umidade e dose, a forma mais segura de aplicação do adubo foi a maiores profundidades.
- f) O aumento das doses de nitrogênio acarretou o acréscimo nas perdas de  $\text{NH}_3$ , na maioria dos casos estudados.
- g) Neste trabalho, ficou evidente o efeito da interação dos fatores dose de nitrogênio, profundidade de aplicação do fertilizante e umidade inicial do solo, determinando a magnitude das perdas de nitrogênio por volatilização de amônia.

## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ADAMSEN, F.J. & SABEY, B.R. Ammonia volatilization from liquid digested sewage sludge as affected by placement in soil. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 51(4): 1080-2, 1987.
- ANJOS, J.T. & TEDESCO, M.J. Perdas de nitrogênio, por volatilização de amônia, proveniente da uréia aplicada em solos cultivados. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 14., Santa Maria, 1973. *Anais*. Porto alegre, SBCS, 1974. p.232-41.
- ANJOS, J.T. & TEDESCO, M.J. Volatilização de amônia proveniente de dois fertilizantes nitrogenados aplicados em solos cultivados. *Cientifica*, Jaboticabal, 4(1): 49-55, 1976.
- AVNIMELECH, Y. & LAHER, M. Ammonia volatilization from soils: Equilibrium considerations. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 41(6): 1080-4, 1977.
- BANSAL, S.K. & OMANWAR, P.K. Effect of moisture and depth of fertilizer placement on nitrogen loss through  $\text{NH}_3$  volatilization. *Fertiliser News*, New Delhi, 26(10): 42-6, 1981.
- BEAUCHAMP, E.G.; KIDD, G.E.; THURTELL, G. Ammonia volatilization from liquid dairy cattle manure in the field.

*Canadian Journal of Soil Science*, Ottawa, 62(1): 11-9, 1982.

BLACK, A.S.; SHELOCK, R.R.; SMITH, N.P. Effect of timing of simulated rainfall on ammonia volatilization from urea, applied to soil of varying moisture content. *Journal of Soil Science*, Oxford, 38(2): 679-87, 1987.

BOTHA, A.D.P. Nitrogen losses of urea, UAN and LAN when applied to four different soils. *South African Journal of Plant and Soil*, Pretoria, 4(1): 43-6, 1987.

BOUWMEESTER, R.J.B.; VLEK, P.L.G.; STUMPE, J.M. Effect of environmental factors on ammonia volatilization from a urea-fertilized soil. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 49(2): 376-81, 1985.

BROADBENT, F.E. & STEVENSON, F.J. Organic matter interactions. In: McVICKAR, M.H. et alii, ed. *Agricultural Anhydrous Ammonia; Technology and use*. Memphis, Agricultural Ammonia Institute, 1966. cap.9, p.169-87.

BURESH, R.J.; VLEK, P.L.G.; & STUMPE, J.M. Labeled nitrogen research in semi-arid tropics; I. Greenhouse studies. *Plant and Soil*, The Hague, 80(1): 3-19, 1984.

CHAO, T. & KROONTJE, W. Relationships between ammonia volatilization and water evaporation. *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, 28(3): 393-5, 1964.

CHAUAN, H.S. & MISHRA, B. Ammonia volatilization from a flooded rice field fertilized with amended urea materials. *Fertilizer Research*, The Hague, 19(1): 57-63, 1989.

- CHIN, W, & KROONTJE, W. Urea hydrolysis and subsequent loss of ammonia. *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, 27(3): 316-8, 1963.
- CHITOLINA, J.C. & BOARETTO, A.E. Determinação de perdas de amônia por volatilização: Emprego de uma câmara em equilíbrio com o ar exterior. In: JORNADA CIENTÍFICA DA ASSOCIAÇÃO DOS DOCENTES DO CAMPUS DE BOTUCATU - UNESP, 10., Botucatu, 1981. *Anais*. Botucatu, ADCB, 1981. p.40.
- COLEMAN, N.T. & THOMAS, G.W. The basic chemistry of soil acidity. In: PEARSON, R.W. & ADAMS, F., ed. *Soil Acidity and Liming*. Madison, American Society of Agronomy, 1967. cap 1, p.1-41. (Series Agronomy, 12).
- CONNEL, J.H.; MEYER, R.D.; MEYER, J.L.; CARLSON, R.M. Gaseous ammonia losses following nitrogen fertilization. *California Agriculture*, Berkeley, 33(1): 11-2, 1979.
- CRAIG, J.R. & WOLLUM A.G. Ammonia volatilization and nitrogen changes after urea and ammonium nitrate fertilization of *Pinus taeda* L. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 46(2): 409-14, 1982.
- DAFTARDAR, S.Y. & SHINDE, S.A. Kinetics of ammonia volatilization of anhydrous ammonia applied to a vertisol as influenced by farm yard manure, sorbed cations and cation exchange capacity. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, New York, 11(2): 135-45, 1980.
- DEMATTE, J.L.I. *Levantamento semidetalhado dos solos da Usina da Barra S/A*. Piracicaba, Depto. de Solos, Geologia e Fertilizantes - ESALQ/USP, 1973. v.1, 246p.

- DENMEAD, O.T.; FRENEY, J.R.; SIMPSOM, J.R. Dynamics of ammonia volatilization during furrow irrigation of maize. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 46(2): 149-55, 1982.
- Du PLESSIS, M.C.F. & KROONTJE, W. The relationship between pH and ammonia equilibria in soils. *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, 28(6): 751-4, 1974.
- Du PREEZ, C.C. & BURGER, R. Du T. A proposed mechanism for the volatilization of ammonia from fertilized neutral to alkaline soils. *South African Journal of Plant and Soil*, Pretoria, 3(1): 31-4, 1986.
- Du PREEZ, C.C. & BURGER, R. Du T. Laboratory measurements of ammonia volatilization from five nitrogen-containing fertilizers after surface application at different rates on a neutral to alkaline soil. *South African Journal of Plant and Soil*, Pretoria, 4(1): 17-20, 1987a.
- Du PREEZ, C.C. & BURGER, R. Du T. Effect of application methods on ammonia volatilization from soils in a controlled environment. *South African Journal of Plant and Soil*, Pretoria, 4(2): 57-60, 1987b.
- FENN, L.B. Potash helps reduce ammonia loss in the field with surface-applied urea. *Better Crops*, Atlanta, 70:15-7, 1986.
- FENN, L.B. & ESCARZAGA, R. Ammonia volatilization from surface applications of ammonium compounds to calcareous soils: V. Soil water content and method of nitrogen application. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 40(4): 537-41, 1976.

- FENN, L.B. & ESCARZAGA, R. Ammonia volatilization from surface applications of ammonium compounds to calcareous soils: VI. Effects of initial water content and quantity of applied water. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 41(2): 358-63, 1977.
- FENN, L.B. & KISSEL, D.E. Ammonia volatilization from surface applications of ammonium compounds on calcareous soils: I. General theory. *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, 37(6): 855-9, 1973.
- FENN, L.B. & KISSEL, D.E. Ammonia volatilization from surface applications of ammonium compounds on calcareous soils: II. Effects of temperature and rate of ammonium nitrogen application. *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, 38(4): 606-12, 1974.
- FENN, L.B. & KISSEL, D.E. The influence of cation exchange capacity and depth of incorporation on ammonia volatilization from ammonium compounds applied to calcareous soils. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 40(3): 394-8, 1976.
- FENN, L.B.; MATOCHA, J.E.; WU, E. Soil exchange capacity effects on ammonia loss from surface-applied urea in the presence of soluble calcium. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 46(1): 78-81, 1982.
- FENN, L.B. & MIYAMOTO, S. Ammonia loss and associated reactions of urea in calcareous soils. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 45(3): 537-40, 1981.
- FENN, L.B.; TAYLOR, R.M.; MATOCHA, J.E. Ammonia losses from surface-applied nitrogen fertilizer as controlled by soluble calcium and magnesium: General Theory. *Soil*

*Science Society of America Journal*, Madison, 45(4): 777-81, 1981.

FERGUSON, R.B.; KISSEL, D.E.; KOELLIKER, J.K.; BASEL, W. Ammonia volatilization from surface-applied urea: Effect of hydrogen ion buffering capacity. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 48(3): 578-82, 1984.

FERNANDES, B. & SYKES, D.J. Capacidade de campo e retenção de água em três solos de Minas Gerais. *Revista Ceres*, Viçosa, 15(83): 1-39, 1968.

FERNANDO, V. & ROBERTS, G.R. Improvements in the method for determination of ammonia volatilized from soil fertilized with urea. *Plant and Soil*, The Hague, 42(1): 287-91, 1975.

FILIMONOV, D.A. & STREL'NIKOVA, R.A. Gaseous losses of ammonia following surface application of urea. *Soviet Soil Science*, Washington, 6(4): 426-32, 1974.

FILLERY, I.R.P. & VLEK, P.L.G. Reappraisal of the significance of ammonia volatilization as an N loss mechanism in flooded rice soils. *Fertilizer Research*, The Hague, 9(1-2): 79-98, 1986.

FLEISHER, Z.; KENIG, A.; RAVINA, I.; HAGIN, J. Model of ammonia volatilization from calcareous soils. *Plant and Soil*, The Hague, 103(2): 205-12, 1987.

FRENEY, J.R.; LEUNING, R.; SIMPSON, J.R.; DENMEAD, O.T.; MUIRHEAD, W.A. Estimating ammonia volatilization from flooded rice fields by simplified methods. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 49(4): 1049-54, 1985.

GANDHI, A.P. & PALIWAL, K.V. Mineralization and gaseous losses of nitrogen from urea and ammonium sulphate in salt-affected soils. *Plant and Soil*, The Hague, 45(1): 247-55, 1976.

GORDON, R.; LECLERC, M.; SCHUEPP, P.; BRUNKE, R. Field estimates of ammonia volatilization from swine manure by a simple micrometeorological technique. *Canadian Journal of Soil Science*, Ottawa, 68(2): 369-80, 1988.

HARGROVE, W.L. & KISSEL, D.E. Ammonia volatilization from surface applications of urea in the field and laboratory. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 43(2): 359-63, 1979.

HARGROVE, W.L.; KISSEL, D.E.; FENN, L.B. Field measurements of ammonia volatilization from surface applications of ammonium salts to a calcareous soil. *Agronomy Journal*, Madison, 69(3): 473-6, 1977.

HARPER, L.A.; CATCHPOLE, V.R.; DAVIS, R.; WEIR, K.L. Ammonia volatilization: Soil, plant, and microclimate effects on diurnal and seasonal fluctuations. *Agronomy Journal*, Madison, 75(2): 218-8, 1983.

HUNT, W.H. & ADAMSEN, F.J. Empirical representation of ammonium adsorption in two soils. *Soil science*, Baltimore, 139(3): 205-10, 1985.

IZAURREALDE, R.C.; KISSEL, D.E.; CABRERA, M.L. Titratable acidity to estimate ammonia retention. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 51(4): 1050-4, 1987.

KHENGRE, S.T. & SAVANT, N.K. Distribution pattern of

- inorganic nitrogen following anhydrous ammonia injection into a Vertisol. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 41(6): 1139-41, 1976.
- KIEHL, J.C. Uréia: São importantes as perdas de nitrogênio por volatilização. *Alcool e Açúcar*, São Paulo, 10: 28-32, 1983.
- KIEHL, J.C. Emprego de sais inorgânicos no controle da volatilização de amônia decorrente da aplicação de uréia no solo. Piracicaba, 1989. 108 p. (Livre Docência - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" / USP).
- KISSEL, D.E.; BREWER, H.L.; ARKIN, G.F. Design of a field sampler for ammonia volatilization. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 41(6): 1133-41, 1977.
- KISSEL, D.E.; CABRERA, M.L.; FERGUSON, R.B. Reactions of ammonia and urea hydrolysis products with soil. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 52(6): 1793-6, 1988.
- KUCEY, R.M.N. Ammonia loss following surface application of urea fertilizers to a calcareous soil. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, New York, 19(4): 431-45, 1988.
- LARA CABEZAS, W.A.R. Calibração de um método para estimar perdas por volatilização de  $N-NH_3$  de fertilizantes aplicados no solo. Piracicaba, 1987. 201p. (Mestrado - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz" / USP).
- LIBARDI, P.L. & REICHARD, K. Destino da uréia aplicada a um solo tropical. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, 2(1): 40-4, 1978.

- MAHENDRAPPA, M.K. & OGDEN, E.D. Patterns of ammonia volatilization from a forest soil. *Plant and Soil*, The Hague, 38(2): 257-65, 1973.
- MAKAROV, B.N. & MAKAROV, N.B. Gaseous nitrogen losses from soil and fertilizers. *Soviet Soil science*, Washington, 8(6): 672-704, 1976.
- MARSHAL, V.G. & DEBELL, D.S. Comparison of four methods of measuring volatilization losses of nitrogen following urea fertilization of forest soils. *Canadian Journal of Soil Science*, Ottawa, 60(3): 549-63, 1980.
- MARTENS, D.A. & BREMNER, J.M. Soil properties affecting volatilization of ammonia from soils treated with urea. *Communications in Soil Science and Plant Analysis*, New York, 20 (15-16): 1645-57, 1989.
- MATIAZZO, M.E. & GLÓRIA, N.A. Efeito da vinhaça na acidez do solo. *STAB*, Piracicaba, 4(2): 35-40, 1985.
- MATOCHA, J.E. Ammonia volatilization and nitrogen utilization from sulfur-coated ureas and conventional fertilizers. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 40(4): 597-601, 1976.
- McINNES, K.J.; FERGUSON, R.B.; KISSEL, D.E.; KANEMASU, E.T. Ammonia loss from application of urea-ammonium nitrate solution to straw residue. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 50(4): 769-74, 1986.
- McINNES, K.J.; KISSEL, D.E.; KANEMASU, E.T. Estimating ammonia flux: A comparison between the integrated horizontal flux method and theoretical solutions of the

- diffusion profile. *Agronomy Journal*, Madison, 77(6): 884-9, 1985.
- MENGUEL, K. & SHERER, H.W. Release of nonexchangeable (fixed) soil ammonium under field conditions during the growing season. *Soil Science*, Baltimore, 135(4): 226-32, 1981.
- MIELNICZUK, J. *O Potássio no solo*. 3.ed. Piracicaba, Instituto da Potassa, 1981. 79p. (Boletim Técnico, 2).
- MIKKELSEN, D.S.; DE DATTA, S.K.; OBCEMEA, W.N. Ammonia volatilization from flooded rice soils. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 42(5): 725-30, 1978.
- MILLS, H.A.; BARKER, A.V.; MAYNARD, D.N. Ammonia volatilization from soils. *Agronomy Journal*, Madison, 66 (3): 355-8, 1974.
- MORAGHAN, J.T.; REGO, T.J.; BURESH, R.J.; VLEK, P.L.G.; BURFORD, J.R.; SINGH, S.; SAHRAWAT, K.L. Labeled nitrogen fertilizer research with urea in the semi-arid tropics. *Plant and Soil*, The Hague, 80(1): 21-33, 1984.
- NELSON, D.W. Gaseous losses of nitrogen other than through denitrification. In: STEVENSON, F.J., ed. *Nitrogen in Agricultural Soils*. Madison, American Society of Agronomy, 1982. cap.9, p.327-63. (Series Agronomy, 22).
- NOMMIK, H. Assessment of volatilization loss of ammonia from surface-applied urea on forest soil by  $N^{15}$  recovery. *Plant and Soil*, The Hague, 38(3): 589-603, 1973.
- NOMMIK, H. & VAHTRAS, K. Retention and fixation of ammonium and ammonia in soils. In: STEVENSON, F.J., ed. *Nitrogen*

- in Agricultural Soils.* Madison, American Society of Agronomy, 1982. cap.4, p.123-71. (Series Agronomy, 22).
- OLIVEIRA, C.G. Perdas de N por volatilização de  $\text{NH}_3$  de diferentes fontes de fertilizantes nitrogenados. Recife, 1982. 60p. (Mestrado - Universidade federal de Pernambuco).
- OPWARIBO, E. & ODU, C.T.I. Ammonium fixation in Nigerian soils: 4. The effects of time, potassium, and wet and dry cycles on ammonium fixation. *Soil Science*, Baltimore, 125(3): 137-45, 1978a.
- OPWARIBO, E. & ODU, C.T.I. Ammonium fixation in Nigerian soils: 5. Types of clay minerals and relationship with ammonium fixation. *Soil Science*, Baltimore, 125(5): 286-93, 1978b.
- O'TOOLE, P.; McGARRY, S.J.; MORGAN, M.A. Ammonia volatilization from urea-treated pasture and tillage soils: effects of soil properties. *Journal of Soil Science*, Oxford, 36(4): 613-20, 1985.
- OVERREIN, L.N. & MOE, P.G. Factors affecting urea hydrolysis and ammonia volatilization in soil. *Soil Science Society of America Proceedings*, Madison, 31(1): 57-61, 1967.
- PARR, J.F. & PAPENDICK, R.I. Retention of ammonia in soils. In: McVICKAR, M.H. et alii, ed. *Agricultural Anhydrous Ammonia; Technology and use.* Memphis, Agricultural Ammonia Institute, 1966. cap.12, p.213-36.
- PERUCCI, P.; GIUSQUIANI, P.L.; SCARPONI, L. Nitrogen losses from added urea and urease activity of a clay-loam soil

amended with crop residues. *Plant and Soil*, The Hague, 69(3): 457-63, 1982.

PINNA, J.C. & VALDIVIA, S.V. Nitrogen volatilization from urea applied as a top dressing or buried in calcareous sugarcane soils. In: CONGRESS OF THE INTERNATIONAL SOCIETY OF SUGARCANE TECHNOLOGISTS, 17., São Paulo, 1977. *Proceedings*. São Paulo, IMPRESS, 1978. v.2, p.1455-61.

PRASAD, M. Gaseous loss of ammonia from sulfur-coated urea, ammonium sulphate and urea applied to calcareous soil (pH 7.3). *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 40(1): 130-4, 1976.

RACHHPAL-SINGH & NYE, P.H. Diffusion of urea, ammonium and soil alkalinity from surface applied urea. *Journal of Soil Science*, Oxford, 35(4): 529-38, 1984.

RAISON, R.J. & MCGARITY, J.W. Effect of plant ash on nitrogen transformations and ammonia volatilization. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 42(1): 140-3, 1978.

RAO, D.L.N. & BATRA, L. Ammonia volatilization from applied nitrogen in alkali soils. *Plant and Soil*, The Hague, 70(2): 219-28, 1983.

RASHID, G.H. The volatilization loss of nitrogen from added urea in some soils of Bangladesh. *Plant and Soil*, The Hague, 48 (3): 549-56, 1977.

REEDY, K.R. & PATRICK JR., W.H. Effect of placement and concentration of applied  $\text{NH}_4^+$ -N on nitrogen loss from flooded soil. *Soil Science*, Baltimore, 123(3): 142-8, 1977.

- REYNOLDS, C.M. & WOLF, D.C. Effect of soil moisture and air relative humidity on ammonia volatilization from surface-applied urea. *Soil Science*, Baltimore, 143(2): 144-52, 1987a.
- REYNOLDS, C.M. & WOLF, D.C. Influence of urease activity and soil properties on ammonia volatilization from urea. *Soil science*, Baltimore, 143(6): 418-25, 1987b.
- RODRIGUES, M.B. & KIEHL, J.C. Volatilização de amônia após o emprego de uréia em diferentes doses e modos de aplicação. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, 10(1): 37-43, 1986.
- SAN, C.K. The simple open soil method of measuring urea volatilization losses. *Plant and Soil*, The Hague, 92(1): 73-9, 1986.
- SCHARF, P.C. & ALLEY, M.M. Understand nitrogen loss pathways. *Solutions*, Chicago, 33(2): 34, 41, 43-4, 1989.
- SHERLOCK, R.R. & GOH, K.M. Dynamics of ammonia volatilization from simulated urine patches and aqueous urea applied to pasture. II. Theoretical derivation of a simplified model. *Fertilizer Research*, The Hague, 6(1): 3-22, 1985a.
- SHERLOCK, R.R. & GOH, K.M. Dynamics of ammonia volatilization from simulated urine patches and aqueous urea applied to pasture. III. Field verification of a simplified model. *Fertilizer Research*, The Hague, 6(1): 23-36, 1985b.
- SILVA, L.F. & LEÃO, A.G. *Levantamento detalhado dos solos*

da estação experimental Sosthenes de Miranda, Bahia. Itabuna, CEPLAC, 1976. 39p. (Boletim Técnico, 41).

SOIL SURVEY STAFF. *Keys to Soil Taxonomy*. 3.ed. Ithaca, Soil Management Support Services and Cornell University, 1987. 280p. (Technical monograph, 6).

STEVENSON, F.J. Origin and Distribution of Nitrogen in Soil. In: STEVENSON, F.J., ed. *Nitrogen in Agricultural Soils*. Madison, American Society of Agronomy, 1982. cap.1, p.1-42. (Series Agronomy, 22).

STUMPE, J.M.; VLEK, P.L.G.; LINDSAY, W.L. Ammonia volatilization from urea and urea phosphates in calcareous soils. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 48(4): 921-7, 1984.

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

TIKKO, S.; STREET, J.R.; LOGAN, T.J. Volatilization of ammonia from granular and dissolved urea applied to turfgrass. *Agronomy Journal*, Madison, 79(3): 535-40, 1987.

TISDALE, S.L.; NELSON, W.L.; BEATON, J.D. *Soil Fertility and Fertilizers*. 4.ed. New York, Macmillan Publishing Company, 1985. 754p.

VENTURA, W.B. & YOSHIDA, T. Ammonia volatilization from a flooded tropical soil. *Plant and Soil*, The Hague, 46(5): 521-31, 1977.

VLEK, P.L.G. & STUMPE, J.M. Effects of solution chemistry and environmental conditions on ammonia volatilization losses from aqueous systems. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 42(3): 416-21, 1978.

VORONKOVA, A.B. Nitrogen losses in ammonia form from surface-applied fertilizers in spruce forests. *Soviet Soil Science*, Washington, 13(1): 58-64, 1981.

A P Ê N D I C E

Tabela 21. Perdas médias, diárias e acumuladas, de nitrogênio por volatilização de  $\text{NH}_3$ , no experimento com aquamônia no Latossolo Roxo ácido.

D I A S	2	4	6	8	10	T O T A I S	
	----- mg N -----					mg N	%
NO 5cm 0%	0,42	0,00	0,42	0,45	0,45	1,74	-
NO 5cm 50%	0,83	0,42	-0,42	0,00	-0,45	0,38	-
NO 5cm 100%	0,42	0,00	-0,42	0,00	-0,45	-0,46	-
NO 10cm 0%	-0,42	0,45	0,45	0,42	0,00	0,90	-
NO 10cm 50%	-0,42	0,00	-0,45	0,83	0,42	0,38	-
NO 10cm 100%	0,42	0,00	0,45	0,42	0,00	1,29	-
N1 5cm 0%	45,77	16,02	6,32	2,71	4,97	75,79	8,77
N1 5cm 50%	22,88	6,75	4,22	1,81	1,35	37,01	4,28
N1 5cm 100%	5,83	6,32	2,53	1,35	2,26	18,29	2,12
N1 10cm 0%	3,74	0,42	0,00	0,90	-0,45	4,62	0,53
N1 10cm 50%	3,74	0,84	0,00	0,90	0,45	5,94	0,69
N1 10cm 100%	2,91	1,26	0,42	0,45	0,90	5,95	0,69
N2 5cm 0%	52,84	21,08	7,29	9,03	7,22	97,46	5,64
N2 5cm 50%	49,10	20,66	23,61	4,06	2,71	100,14	5,79
N2 5cm 100%	54,92	17,71	16,02	2,26	4,06	94,97	5,50
N2 10cm 0%	1,66	1,69	-0,42	0,90	0,45	4,28	0,25
N2 10cm 50%	1,66	0,84	-0,42	0,45	0,00	2,54	0,15
N2 10cm 100%	2,91	0,42	-0,42	0,45	0,45	3,82	0,22

Tabela 22. Análise da variância dos dados de perdas totais expressos em mg de N do experimento com aquamônia no Latossolo Roxo álico.

CAUSAS DA VARIACAO	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
BLOCOS	2	27.0949615			
DOSE	2	23029.1159289	11514.5579644	280.1713	0.00001
PROF	1	26679.9796186	26679.9796186	649.1751	0.00001
UMID	2	1079.9756120	539.9878060	13.1389	0.00016
DOS*PRO	2	19631.3711183	9815.6855591	238.8345	0.00001
DOS*UMI	4	1415.1331845	353.7832961	8.6082	0.00016
PRO*UMI	2	888.9703877	444.4851938	10.8152	0.00042
DOS*PRO*UMI	4	1857.6035285	464.4008821	11.2998	0.00004
RESIDUO	34	1397.3415630	41.0982813		
TOTAL	53	76006.5859029			

MEDIA GERAL = 25.028980

COEFICIENTE DE VARIACAO = 25.613 %

Tabela 23. Análise da variância dos dados de perdas totais expressos em porcentagem do N aplicado, do experimento com aquamônia no Latossolo Roxo álico.

CAUSAS DA VARIACAO	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
BLOCOS	2	0.1061630			
DOSE	1	0.0537389	0.0537389	0.1038	0.74863
PROF	1	218.6785390	218.6785390	422.2658	0.00001
UMID	2	17.1379442	8.5689721	16.5466	0.00012
DOS*PRO	1	2.3333069	2.3333069	4.5056	0.04294
DOS*UMI	2	15.7705154	7.8852577	15.2263	0.00018
PRO*UMI	2	18.4160959	9.2080479	17.7806	0.00009
DOS*PRO*UMI	2	17.9983616	8.9991808	17.3773	0.00010
RESIDUO	22	11.3931281	0.5178695		
TOTAL	35	301.8877929			

MEDIA GERAL = 2.885756

COEFICIENTE DE VARIACAO = 24.937 %

Tabela 24. Perdas médias, diárias e acumuladas, de nitrogênio por volatilização de  $\text{NH}_3$ , no experimento com uréia no Latossolo Roxo álico.

D I A S	2	4	6	8	T O T A I S	
					mg N	%
TRATAMENTO	----- mg N -----				mg N	%
N0 0cm 0%	0,42	0,00	0,42	0,45	1,29	-
N0 0cm 50%	0,83	0,42	-0,42	0,00	0,83	-
N0 0cm 100%	0,42	0,00	-0,42	0,00	-0,01	-
N0 2,5cm 0%	0,42	0,45	-0,42	0,00	0,45	-
N0 2,5cm 50%	-0,42	0,00	0,83	0,42	0,83	-
N0 2,5cm 100%	0,42	0,00	0,42	-0,53	0,31	-
N0 5cm 0%	-0,45	0,42	0,00	0,42	0,39	-
N0 5cm 50%	0,00	-0,42	0,42	0,42	0,42	-
N0 5cm 100%	0,00	-0,42	0,00	0,42	-0,01	-
N1 0cm 0%	2,08	0,84	-0,84	1,25	3,33	0,42
N1 0cm 50%	2,08	0,84	1,26	2,10	6,29	0,79
N1 0cm 100%	1,66	0,84	0,84	0,84	4,18	0,53
N1 2,5cm 0%	3,33	0,00	-0,42	0,00	2,91	0,37
N1 2,5cm 50%	2,08	0,84	0,84	0,83	4,60	0,58
N1 2,5cm 100%	2,08	0,00	-0,84	0,41	1,65	0,21
N1 5cm 0%	3,33	0,42	-0,42	0,84	4,17	0,53
N1 5cm 50%	1,66	0,00	0,42	0,42	2,51	0,32
N1 5cm 100%	2,50	0,42	-0,84	-0,42	1,65	0,21
N2 0cm 0%	2,08	0,42	-0,42	0,42	2,50	0,16
N2 0cm 50%	3,33	1,26	0,41	2,09	7,10	0,45
N2 0cm 100%	2,92	1,68	0,00	-0,42	4,17	0,26
N2 2,5cm 0%	2,50	0,42	-0,42	0,00	2,50	0,16
N2 2,5cm 50%	2,50	-0,42	-0,42	-0,42	1,24	0,08
N2 2,5cm 100%	2,92	0,84	-0,84	0,42	3,33	0,21
N2 5cm 0%	2,08	0,00	0,00	-0,42	1,66	0,10
N2 5cm 50%	2,50	0,00	-0,42	0,84	2,92	0,18
N2 5cm 100%	2,60	0,63	-0,53	0,00	2,70	0,17

Tabela 25. Análise da variância dos dados de perdas totais expressos em mg de N do experimento com uréia no Latossolo Roxo álico.

CAUSAS DA VARIACAO	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
BLOCOS	2	11.3106250			
DOSE	2	123.7205009	61.8602504	22.1768	0.00001
PROF	2	29.6243417	14.8121708	5.3102	0.00810
UMID	2	14.8618007	7.4309004	2.6640	0.07741
DOS*PRO	4	15.9033455	3.9758364	1.4253	0.23775
DOS*UMI	4	22.3469880	5.5867470	2.0028	0.10686
PRO*UMI	4	19.3052014	4.8263004	1.7302	0.15644
DOS*PRO*UMI	8	30.4686671	3.8085834	1.3654	0.23310
RESIDUO	52	145.0491663	2.7894070		
TOTAL	80	412.5906365			

MEDIA GERAL = 2.442563

COEFICIENTE DE VARIACAO = 68.377 %

Tabela 26. Análise da variância dos dados de perdas totais expressos em porcentagem do N aplicado, do experimento com uréia no Latossolo Roxo álico.

CAUSAS DA VARIACAO	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
BLOCOS	2	0.0712050			
DOSE	1	0.7927693	0.7927693	27.5804	0.00005
PROF	2	0.3739728	0.1869864	6.5052	0.00434
UMID	2	0.1888814	0.0944407	3.2856	0.04831
DOS*PRO	2	0.0193053	0.0096526	0.3358	0.72175
DOS*UMI	2	0.1351305	0.0675652	2.3506	0.10885
PRO*UMI	4	0.2485789	0.0621447	2.1620	0.09364
DOS*PRO*UMI	4	0.1818419	0.0454605	1.5816	0.20075
RESIDUO	34	0.9772947	0.0287440		
TOTAL	53	2.9889797			

MEDIA GERAL = 0.317839

COEFICIENTE DE VARIACAO = 53.342 %

Tabela 27. Perdas médias, diárias e acumuladas, de nitrogênio por volatilização de  $\text{NH}_3$ , no experimento com aquamônia na Areia Quartzosa distrófica.

D I A S	2	4	6	8	10	12	14	T O T A I S	
	----- mg N -----							mg N	%
N0 5cm 0%	-0,37	0,18	0,00	0,54	1,07	0,00	0,18	1,60	-
N0 5cm 50%	0,18	0,18	1,08	0,00	0,00	0,00	0,18	1,63	-
N0 5cm 100%	0,18	0,18	0,54	1,08	1,07	0,00	0,37	3,42	-
N0 10cm 0%	0,00	0,54	1,07	0,00	0,18	0,37	-0,18	1,09	-
N0 10cm 50%	1,08	0,00	0,00	0,00	0,18	-0,18	0,18	1,26	-
N0 10cm 100%	0,54	1,08	1,07	0,00	0,37	-0,18	0,18	3,06	-
N1 5cm 0%	119,35	18,85	11,21	12,16	6,60	7,34	4,11	179,62	22,01
N1 5cm 50%	31,67	14,54	14,67	10,62	7,15	7,43	4,20	90,27	11,06
N1 5cm 100%	38,97	16,70	12,81	8,40	7,15	5,77	2,56	92,36	11,32
N1 10cm 0%	2,71	3,77	9,07	7,40	5,87	6,97	4,93	40,71	4,99
N1 10cm 50%	1,62	2,69	4,27	4,23	1,65	1,38	2,92	18,76	2,30
N1 10cm 100%	0,00	1,62	0,00	0,00	0,18	0,18	0,18	2,17	0,27
N2 5cm 0%	461,99	97,03	61,90	41,23	23,48	24,58	13,50	723,70	44,32
N2 5cm 50%	259,82	62,49	41,09	30,66	22,37	23,66	14,60	454,68	27,84
N2 5cm 100%	88,23	74,88	45,89	29,60	16,69	15,59	9,13	280,00	17,15
N2 10cm 0%	285,26	109,89	59,23	41,23	26,04	24,76	13,32	559,73	34,28
N2 10cm 50%	14,61	2,67	2,67	2,64	3,30	4,77	2,56	33,22	2,03
N2 10cm 100%	0,54	2,15	1,60	0,00	0,18	0,73	1,10	6,31	0,30

Tabela 28. Análise da variância dos dados de perdas totais expressos em mg de N do experimento com aquamônia na Areia Quartzosa distrófica.

CAUSAS DA VARIACAO	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
BLOCOS	2	871.7220093			
DOSE	2	1168292.9912000	584146.4956000	2049.0746	0.00001
PROF	1	224166.8241424	224166.8241424	786.3345	0.00001
UMID	2	354368.1002451	177184.0501226	621.5279	0.00001
DOS*PRO	2	190067.7211708	95033.8605854	333.3607	0.00001
DOS*UMI	4	493742.0227994	123435.5056998	432.9882	0.00001
PRO*UMI	2	9419.9714359	4709.9857180	16.5217	0.00005
DOS*PRO*UMI	4	44298.2789227	11074.5697307	38.8475	0.00001
RESIDUO	34	9692.6587200	285.0781976		
TOTAL	53	2494920.2906457			

MEDIA GERAL = 138.683884

COEFICIENTE DE VARIACAO = 12.175 %

Tabela 29. Análise da variância dos dados de perdas totais em porcentagem do N aplicado, do experimento com aquamônia na Areia Quartzosa distrófica.

CAUSAS DA VARIACAO	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
BLOCOS	2	7.2359695			
DOSE	1	1371.0506055	1371.0506055	656.6202	0.00001
PROF	1	2000.3435044	2000.3435044	957.9996	0.00001
UMID	2	2484.1540144	1242.0770072	594.8525	0.00001
DOS*PRO	1	62.1763755	62.1763755	29.7774	0.00008
DOS*UMI	2	856.3484624	428.1742312	205.0602	0.00001
PRO*UMI	2	25.6587856	12.8293928	6.1442	0.00770
DOS*PRO*UMI	2	216.7097721	108.3548861	51.8931	0.00001
RESIDUO	22	45.9369260	2.0880421		
TOTAL	35	7069.6144155			

MEDIA GERAL = 14.829294

COEFICIENTE DE VARIACAO = 9.744 %

Tabela 30. Perdas médias, diárias e acumuladas, de nitrogênio por volatilização de  $\text{NH}_3$ , no experimento com uréia na Areia Quartzosa distrófica.

D I A S	2	4	6	8	10	12	14	T O T A I S	
	----- mg N -----							mg N	%
N0 0cm 0%	0,00	0,54	1,07	0,00	0,18	-0,37	0,18	1,97	-
N0 0cm 50%	1,08	0,00	0,00	0,00	0,18	0,18	-0,18	1,26	-
N0 0cm 100%	0,54	1,08	1,07	0,00	0,37	0,18	0,18	3,42	-
N0 2,5cm 0%	0,18	0,37	0,18	0,00	0,54	1,07	-1,07	1,27	-
N0 2,5cm 50%	0,18	0,18	0,18	1,08	0,00	0,00	0,00	1,63	-
N0 2,5cm 100%	0,37	0,18	0,18	0,54	1,08	0,00	0,00	2,35	-
N0 5cm 0%	0,37	0,18	0,00	0,54	1,07	0,00	0,18	2,34	-
N0 5cm 50%	0,18	0,18	1,08	0,00	0,00	0,00	0,18	1,63	-
N0 5cm 100%	0,18	0,18	0,54	1,08	1,07	0,00	0,37	3,42	-
N1 0cm 0%	3,25	4,28	4,85	5,84	3,50	4,15	5,99	31,86	4,02
N1 0cm 50%	269,24	119,03	40,09	22,83	13,27	8,04	5,03	477,53	60,29
N1 0cm 100%	75,05	58,69	32,60	21,77	16,40	10,59	7,83	222,94	28,15
N1 2,5cm 0%	1,62	1,05	3,75	0,53	1,11	3,04	6,90	17,99	2,27
N1 2,5cm 50%	61,45	103,94	56,11	34,52	21,38	15,43	12,02	304,85	38,49
N1 2,5cm 100%	13,86	33,10	30,43	19,12	12,99	4,03	2,59	116,12	14,66
N1 5cm 0%	1,62	2,66	4,28	0,53	-0,55	-0,18	0,54	8,90	1,12
N1 5cm 50%	1,62	1,59	11,77	11,95	10,78	6,17	4,72	48,59	6,14
N1 5cm 100%	1,08	4,01	7,21	1,59	2,40	1,53	1,29	19,10	2,41
N2 0cm 0%	3,25	3,20	6,95	6,90	5,34	13,29	6,07	45,01	2,84
N2 0cm 50%	372,62	366,40	108,48	56,29	35,57	26,04	20,21	985,59	62,22
N2 0cm 100%	129,45	93,71	48,64	33,99	25,98	19,30	15,89	366,95	23,17
N2 2,5cm 0%	0,53	2,66	2,44	1,06	3,69	11,45	13,42	35,24	2,23
N2 2,5cm 50%	169,70	248,86	125,59	78,06	52,34	37,62	30,95	745,12	47,04
N2 2,5cm 100%	82,67	122,26	74,82	55,76	40,73	29,06	23,08	428,38	27,04
N2 5cm 0%	1,08	1,59	4,28	2,12	-0,55	0,00	0,54	9,05	0,57
N2 5cm 50%	2,16	36,07	127,68	64,79	49,39	42,51	33,95	356,55	22,51
N2 5cm 100%	1,08	7,51	20,31	23,36	20,09	14,55	10,87	97,77	6,17

Tabela 31. Análise da variância dos dados de perdas totais expressos em mg de N do experimento com uréia na Areia Quartzosa distrófica.

CAUSAS DA VARIACAO	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
BLOCOS	2	469.3618848			
DOSE	2	1567630.9533044	783815.4766522	5008.3834	0.00001
PROF	2	443045.5514521	221522.7757260	1415.4747	0.00001
UMID	2	1294156.0266154	647078.0133077	4134.6655	0.00001
DOS*PRO	4	260715.1770385	65178.7942596	416.4761	0.00001
DOS*UMI	4	1030360.5587372	257590.1396843	1645.9361	0.00001
PRO*UMI	4	263540.3368273	65885.0842068	420.9891	0.00001
DOS*PRO*UMI	8	167458.2290989	20932.2786374	133.7520	0.00001
RESIDUO	52	8138.0360135	156.5006926		
TOTAL	80	5035514.2309720			

MEDIA GERAL = 160.730179

COEFICIENTE DE VARIACAO = 7.783 %

Tabela 32. Análise da variância dos dados de perdas totais expressos em porcentagem do N aplicado, do experimento com uréia na Areia Quartzosa distrófica.

CAUSAS DA VARIACAO	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
BLOCOS	2	3.3421172			
DOSE	1	195.5264116	195.5264116	90.3470	0.00001
PROF	2	5341.2704719	2670.6352359	1234.0216	0.00001
UMID	2	12715.9327216	6357.9663608	2937.8284	0.00001
DOS*PRO	2	186.4633601	93.2316801	43.0796	0.00001
DOS*UMI	2	208.6885147	104.3442573	48.2144	0.00001
PRO*UMI	4	3048.5822084	762.1455521	352.1649	0.00001
DOS*PRO*UMI	4	201.2651732	50.3162933	23.2497	0.00001
RESIDUO	34	73.5818531	2.1641721		
TOTAL	53	21974.6528318			

MEDIA GERAL = 19.409473

COEFICIENTE DE VARIACAO = 7.579 %

Tabela 33. Perdas médias, diárias e acumuladas, de nitrogênio por volatilização de  $\text{NH}_3$ , no experimento com aquamônia no Vertissolo.

D I A S	2	4	6	8	10	12	T O T A I S	
TRATAMENTO	----- mg N -----						mg N	%
N0 5cm 10%	0,15	0,08	0,30	0,15	-0,15	0,30	0,53	-
N0 5cm 50%	0,08	0,08	-0,45	0,30	0,08	0,00	0,54	-
N0 5cm 100%	0,23	0,00	-0,15	0,00	0,00	0,00	0,08	-
N0 10cm 10%	-0,30	0,15	0,15	0,30	-0,15	0,08	0,23	-
N0 10cm 50%	0,45	0,30	0,08	0,00	0,08	0,08	0,98	-
N0 10cm 100%	0,15	0,00	0,00	0,00	0,23	0,00	0,38	-
N1 5cm 10%	0,45	0,30	-0,08	0,00	0,00	-0,08	0,60	0,09
N1 5cm 50%	-0,30	0,30	0,23	0,15	0,08	0,08	0,53	0,08
N1 5cm 100%	0,00	0,15	0,15	0,00	0,08	-0,15	0,23	0,03
N1 10cm 10%	0,15	0,30	0,08	-0,15	0,00	-0,08	0,30	0,04
N1 10cm 50%	0,30	0,15	0,08	0,08	0,00	0,00	0,60	0,09
N1 10cm 100%	-0,30	0,15	0,08	0,00	0,00	-0,08	-0,15	-0,02
N2 5cm 10%	0,15	0,00	0,23	0,08	0,08	0,00	0,53	0,04
N2 5cm 50%	-0,15	0,15	0,08	0,00	0,08	-0,08	0,08	0,01
N2 5cm 100%	0,30	0,30	0,38	0,00	0,00	0,00	0,98	0,07
N2 10cm 10%	-0,15	0,00	0,08	0,00	0,08	-0,08	-0,08	-0,01
N2 10cm 50%	-0,60	0,45	0,15	0,00	0,00	-0,15	-0,15	-0,01
N2 10cm 100%	0,45	0,30	0,08	0,15	-0,08	0,00	0,91	0,07

Tabela 34. Análise da variância dos dados de perdas totais expressos em mg de N do experimento com aquamônia no Vertissolo.

CAUSAS DA VARIACAO	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
BLOCOS	2	0.4036824			
DOSE	2	0.1410643	0.0705322	0.2178	0.80751
PROF	1	0.3679997	0.3679997	1.1362	0.29418
UMID	2	0.2783866	0.1391933	0.4298	0.65960
DOS*PRO	2	0.2097173	0.1048586	0.3238	0.73010
DOS*UMI	4	6.0727787	1.5181947	4.6874	0.00430
PRO*UMI	2	0.1366630	0.0683315	0.2110	0.81275
DOS*PRO*UMI	4	0.2342339	0.0585585	0.1808	0.94467
RESIDUO	34	11.0121560	0.3238869		
TOTAL	53	18.8566818			

MEDIA GERAL = 0.412467

COEFICIENTE DE VARIACAO = 137.977 %

Tabela 35. Análise da variância dos dados de perdas totais expressos em porcentagem do N aplicado, do experimento com aquamônia no Vertissolo.

CAUSAS DA VARIACAO	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
BLOCOS	2	0.0030285			
DOSE	1	0.0052562	0.0052562	2.0400	0.16420
PROF	1	0.0061570	0.0061570	2.3896	0.13305
UMID	2	0.0001072	0.0000536	0.0208	0.98029
DOS*PRO	1	0.0001269	0.0001269	0.0493	0.82079
DOS*UMI	2	0.0372385	0.0186193	7.2264	0.00414
PRO*UMI	2	0.0027110	0.0013555	0.5261	0.60321
DOS*PRO*UMI	2	0.0023369	0.0011685	0.4535	0.64642
RESIDUO	22	0.0566840	0.0025765		
TOTAL	35	0.1136463			

MEDIA GERAL = 0.040061

COEFICIENTE DE VARIACAO = 126.706 %

Tabela 36. Perdas médias, diárias e acumuladas, de nitrogênio por volatilização de  $\text{NH}_3$ , no experimento com uréia no vertissolo.

D I A S	2	4	6	8	10	12	14	16	18	T O T A I S	
	----- mg N -----									mg N	%
NO 0cm 10%	-0,30	0,15	0,15	0,30	0,15	0,08	0,08	0,09	0,08	0,78	-
NO 0cm 50%	0,45	0,30	0,08	0,00	0,08	0,08	0,08	0,18	0,00	1,23	-
NO 0cm 100%	0,15	0,00	0,00	0,00	0,23	0,00	0,08	0,09	0,08	0,63	-
NO 2,5cm 10%	0,08	0,08	0,09	0,08	-0,30	0,15	0,15	0,30	-0,15	0,47	-
NO 2,5cm 50%	0,08	0,08	-0,18	0,00	0,45	0,30	0,08	0,00	0,08	1,07	-
NO 2,5cm 100%	0,00	0,08	0,09	0,08	-0,15	0,00	0,00	0,00	0,23	0,32	-
NO 5cm 10%	0,09	0,08	-0,30	0,15	0,15	0,30	-0,15	0,08	-0,08	0,32	-
NO 5cm 50%	0,18	0,00	0,45	0,30	0,08	0,08	0,08	0,08	-0,08	1,17	-
NO 5cm 100%	0,09	-0,08	0,15	0,00	0,00	0,00	0,23	0,00	0,08	0,47	-
N1 0cm 10%	1,96	1,66	2,28	2,20	1,14	1,14	0,99	0,79	0,91	13,07	1,65
N1 0cm 50%	1,96	3,77	6,99	7,21	4,25	4,71	2,92	2,51	3,55	37,87	4,78
N1 0cm 100%	6,19	8,38	15,34	9,41	5,24	3,26	3,19	1,41	1,35	53,77	6,79
N1 2,5cm 10%	0,15	0,00	0,15	0,08	0,00	0,00	-0,15	0,09	-0,06	0,26	0,03
N1 2,5cm 50%	0,00	0,15	0,23	0,23	0,00	0,00	-0,15	0,35	-0,06	0,75	0,09
N1 2,5cm 100%	-0,30	0,00	0,08	0,15	0,00	-0,08	0,08	0,35	-0,06	0,22	0,03
N1 5cm 10%	0,60	0,00	0,23	0,08	-0,08	-0,15	-0,08	0,00	-0,06	0,55	0,07
N1 5cm 50%	0,45	0,15	-0,08	0,15	0,00	0,00	0,00	0,18	-0,06	0,80	0,10
N1 5cm 100%	0,60	0,00	-0,08	-0,08	-0,08	-0,15	-0,08	0,09	0,03	0,27	0,03
N2 0cm 10%	2,42	3,47	4,94	5,62	3,42	3,80	3,95	2,73	2,67	33,00	2,08
N2 0cm 50%	6,72	7,70	17,77	27,03	19,36	16,48	19,89	10,82	12,43	138,20	8,72
N2 0cm 100%	4,68	47,86	113,13	37,96	15,34	8,66	8,66	4,84	3,81	244,92	15,46
N2 2,5cm 10%	0,60	0,30	-0,08	0,08	0,23	-0,08	-0,15	0,26	-0,06	1,11	0,07
N2 2,5cm 50%	0,45	0,15	0,23	0,00	0,08	0,00	0,08	0,18	0,03	1,19	0,08
N2 2,5cm 100%	0,45	0,30	0,61	1,29	1,44	1,33	1,14	0,92	0,47	7,96	0,50
N2 5cm 10%	0,45	0,30	0,30	0,08	0,08	0,15	-0,15	0,18	-0,15	1,24	0,08
N2 5cm 50%	0,45	0,30	0,15	0,08	0,08	0,00	-0,08	0,26	-0,06	1,19	0,08
N2 5cm 100%	0,30	0,00	0,08	0,08	0,08	0,08	0,00	0,00	-0,06	0,55	0,03

Tabela 37. Análise da variância dos dados de perdas totais expressos em mg de N do experimento com uréia no Vertissolo.

CAUSAS DA VARIACAO	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
BLOCOS	2	15.1532952			
DOSE	2	32549.4214301	16274.7107151	3231.1844	0.00001
PROF	2	58436.2019787	29218.1009894	5800.9678	0.00001
UMID	2	11091.9845597	5545.9922799	1101.1025	0.00001
DOS*PRO	4	60499.5357684	15124.8839421	3002.8976	0.00001
DOS*UMI	4	13535.4064768	3383.8516192	671.8306	0.00001
PRO*UMI	4	20819.9426767	5204.9856692	1033.3989	0.00001
DOS*PRO*UMI	8	24545.6075506	3068.2009438	609.1612	0.00001
RESIDUO	52	261.9116846	5.0367632		
TOTAL	80	221755.1654207			

MEDIA GERAL = 20.113920

COEFICIENTE DE VARIACAO = 11.158 %

Tabela 38. Análise da variância dos dados de perdas totais expressos em porcentagem do N aplicado, do experimento com uréia no Vertissolo.

CAUSAS DA VARIACAO	G.L.	S.Q.	Q.M.	VALOR F	PROB.>F
BLOCOS	2	0.1190028			
DOSE	1	30.5489483	30.5489483	421.4505	0.00001
PROF	2	504.1448294	252.0724147	3477.5679	0.00001
UMID	2	89.1661940	44.5830970	615.0643	0.00001
DOS*PRO	2	54.7080232	27.3540116	377.3734	0.00001
DOS*UMI	2	19.1243301	9.5621651	131.9188	0.00001
PRO*UMI	4	168.4538248	42.1134562	580.9934	0.00001
DOS*PRO*UMI	4	32.3932024	8.0983006	111.7234	0.00001
RESIDUO	34	2.4644988	0.0724853		
TOTAL	53	901.1228538			

MEDIA GERAL = 2.261056

COEFICIENTE DE VARIACAO = 11.907 %