

VOLATILIZAÇÃO, DISTRIBUIÇÃO E NITRIFICAÇÃO DA AMÔNIA PROVENIENTE DE URÉIA APLICADA EM AMOSTRAS DE SOLO

MAURICIO BERTOLINO RODRIGUES

Orientador: Dr. JORGE DE CASTRO KIEHL

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

PIRACICABA
Estado de São Paulo - Brasil
Abril - 1983

Ao futuro de meus filhos,

Mauricinho
e Gisele,

OFEREÇO.

À minha esposa Sandra,

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

- . Ao Prof. Dr. Jorge de Castro Kiehl, pela eficiente orientação e ajuda em todas as fases do trabalho.
- . Aos Professores do Curso de Pós-Graduação em Solos e Nutrição de Plantas, da ESALQ-USP, pelos valiosos ensinamentos.
- . Aos funcionários do Departamento de Solos, Geologia e Fertilizantes e em especial ao analista João Álvaro Ramos Granja, pelo auxílio nos trabalhos de laboratório.
- . Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de estudos concedida.
- . Ao Projeto Uréia, através do convênio PETROFÉRTIL/NITROFÉRTIL-NE/ULTRAFÉRTIL S/A/LSG-ESALQ, por proporcionar recursos materiais à realização do trabalho.
- . À Fundação Faculdade de Agronomia "Luiz Meneguel", pela liberação do autor dos compromissos didáticos durante a realização do curso.

Í N D I C E

	Página
RESUMO.....	vi
SUMMARY.....	ix
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	4
2.1. Volatilização de amônia.....	4
2.1.1. Métodos de avaliação das perdas de a- mônia.....	6
2.1.1.1. Métodos diretos.....	6
2.1.1.2. Métodos indiretos.....	8
2.1.2. Efeito de doses e modos de aplicação.	9
2.2. Distribuição da amônia no solo.....	11
2.3. Nitrificação da amônia no solo.....	12
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	15
3.1. Experimentos em laboratório.....	16
3.1.1. Volatilização de amônia.....	16
3.1.2. Distribuição e nitrificação da amônia no solo.....	19
3.2. Experimentos em casa-de-vegetação.....	22
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	26
4.1. Volatilização de amônia.....	26
4.1.1. Experimento de laboratório.....	26
4.1.1.1. Perdas diárias de amônia....	26

	Página
4.1.1.2. Perdas totais de amônia.....	36
4.1.1.3. Perdas porcentuais de amônia	38
4.1.2. Experimentos em casa-de-vegetação....	42
4.1.2.1. Podzólico Vermelho Amarelo..	42
4.1.2.2. Latossolo Vermelho Amarelo..	49
4.1.2.3. Comparação entre os solos es tudados.....	57
4.2. Distribuição da amônia no solo.....	58
4.3. Nitrificação da amônia no solo.....	62
5. CONCLUSÕES.....	70
5.1. Volatilização de amônia.....	70
5.2. Distribuição de amônia no solo.....	72
5.3. Nitrificação da amônia no solo.....	72
6. LITERATURA CITADA.....	74

VOLATILIZAÇÃO, DISTRIBUIÇÃO E NITRIFICAÇÃO
DA AMÔNIA PROVENIENTE DA URÉIA APLICADA
EM AMOSTRA DE SOLO

MAURÍCIO BERTOLINO RODRIGUES

DR. JORGE DE CASTRO KIEHL

- ORIENTADOR -

RESUMO

Experimentos de laboratório e casa-de-vegetação foram conduzidos com os solos Podzólico Vermelho Amarelo (areia barrenta, pH 7,1) e Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (barro arenoso, pH 5,8), com a finalidade de avaliar as perdas de amônia por volatilização decorrentes do emprego da uréia em diferentes doses (120, 180 e 240 kg/ha de N) e modos de aplicação; no experimento de laboratório a amônia volatilizada foi arrastada por fluxo de ar e coletada em solução de ácido bórico e quantificada por titulação, enquanto que nos de casa-de-vegetação a volatilização foi estimada indiretamente utilizando-se o milho como planta-teste. A distribuição da amônia no solo e a nitrificação no local da aplicação do fertilizante foram igualmente estudados através de experimentos de laboratório com o solo Podzólico Vermelho Amarelo.

As maiores perdas de amônia por volatilização ocorreram durante os primeiros dias da adição de uréia ao solo. As perdas absolutas aumentaram com o aumento da dose de uréia, mas em termos percentuais as perdas sofreram influência marcante da dose somente quando o adubo foi aplicado abaixo da superfície.

A aplicação da uréia à superfície resultou perdas de 83 a 91%; a incorporação do adubo à camada 0-2 cm do solo não diminuiu essas perdas ou diminuiu-as no máximo em 15%, enquanto que a incorporação a 0-5 cm diminuiu a volatilização em até 64% e a localização a 5 cm de profundidade em até 100%. O efeito da incorporação ou enterrio da uréia sobre a volatilização foi maior para as doses mais baixas, e mais evidente no solo Podzólico Vermelho Amarelo que no Latossolo Vermelho Amarelo, talvez devido à maior CTC do primeiro.

A amônia concentrou-se na camada 0-1 cm do solo quando a uréia foi aplicada à superfície, mas significativa porção difundiu-se até a profundidade de 7 cm. Quando a aplicação foi a 5 cm de profundidade houve maior acúmulo de amônia em torno dessa região de aplicação, tendo uma parte atingido a camada 0-1 cm. Nos locais onde a uréia foi aplicada o pH do solo elevou-se de 6,9 para até 8,7. A concentração de amônia e o pH diminuíram com a distância da região adubada, tendo havido elevada correlação entre essas

variáveis.

A maior parte (61 a 92%) da amônia contida na região de aplicação da uréia foi nitrificada em nove semanas, independentemente da dose ou do modo de aplicação. Apesar da presença da amônia e dos altos valores de pH, não houve acúmulo de nitrito. Com a nitrificação, o pH decresceu a valores inferiores ao do solo original.

VOLATILIZATION, DISTRIBUTION AND NITRIFICATION OF AMMONIA FROM UREA APPLIED TO THE SOIL

AUTHOR: MAURÍCIO BERTOLINO RODRIGUES

ADVISER: DR. JORGE DE CASTRO KIEHL

SUMMARY

Laboratory and greenhouse experiments were carried out with Red-Yellow Podzolic (loamy sand, pH 7.1) and Red-Yellow Latosol distrofic (sandy loam, pH 5.1) soils to evaluate the ammonia volatilization losses from urea applied at different rates (120, 180 and 240 kg/ha of N) and methods of application; in the laboratory the evolved ammonia was collected in boric acid by means of a flow of air and quantified by titration, whereas in the greenhouse volatilization was indirectly estimated using corn as a test-plant. Ammonia distribution in the soil and nitrification in the zone of urea application were also studied by means of laboratory experiments with the Red-Yellow Podzolic soil.

The major losses of ammonia by volatilization took place during the first days after addition of urea to the soil. Absolute losses increased with increasing rates of urea

application, but percent losses were markedly affected by rates only when the fertilizer was applied below the soil surface.

Surface application of urea resulted in losses of 83 to 91%; mixing urea with the top 2 cm of soil did not reduce the losses or reduced in a maximum of 15%, whereas mixing it with the top 5 cm caused a reduction of up to 64%; placing all the fertilizer at a depth of 5 cm restricted the volatilization in up to 100%. The effect of mixing urea with the soil or deep placing it in the soil on volatilization losses was more pronounced at the lower than at the higher rates and more evident in the Red-Yellow Podzolic soil than in the Red-Yellow Latosol, perhaps because of the higher CEC of the former.

Ammonia concentrated in the upper 0-1 cm layer of the soil when urea was surface applied but a meaningful fraction diffused to a depth of up to 7 cm. Ammonia accumulated around the application zone when fertilizer was placed 5 cm deep but some of the ammonia reached the 0-1 cm layer. Soil pH in the layers where urea was applied increased from 6,9 to as high as 8.7. Ammonia concentration and pH of the soil decreased with the distance from the area of application and showed to be highly correlated.

Most of the ammonia (61 to 92%) retained in the zone of urea placement was nitrified within nine weeks, un- respectively to rates and methods of application. In despite

of the presence of ammonia and of the high pH values no nitrite accumulation was observed. After nitrification the pH decreased to values below those of the original soil.

1. INTRODUÇÃO

A uréia vem sendo empregada há muito tempo no Brasil como uma fonte de nitrogênio para as culturas, mas somente nos últimos anos é que esse material vem se tornando um dos mais importantes adubos nitrogenados comercializados no país. A indústria brasileira de fertilizantes tem mostrado um grande progresso ultimamente, principalmente no que se refere à produção de amônia e uréia. Vultosos investimentos do governo visando a criação de novos pólos petroquímicos, como as recém-inauguradas unidades em Araucária (PR) e Laranjeiras (SE), permitiram que a produção brasileira de uréia saltasse das modestas 1.050 t/dia, provenientes de Camaçari (BA), para as mais significativas 3.650 t/dia atuais, devendo a produção atingir 5.000 t/dia dentro de mais alguns anos se a meta do governo for alcançada.

A tendência para o crescente aumento na produ-

ção e emprego da uréia na agricultura não ocorre somente em nosso meio. Em muitos países esse produto vem sendo preferido devido às diversas vantagens de caráter industrial, econômico e agrônômico que apresenta, como a facilidade de obtenção, os menores custos de produção, o transporte e a aplicação mais baratos devido ao maior teor de nitrogênio, a viabilidade de aplicação na forma líquida e o bom comportamento desse fertilizante em adubações via foliar. Além disso, seu efeito salino no solo é dos mais baixos, sendo ainda menos acidificante que outros adubos nitrogenados como o sulfato de amônio e o nitrato de amônio.

Desde que empregada corretamente, a uréia é uma excelente fonte de nitrogênio. Numerosas pesquisas têm revelado que sua eficiência é pelo menos igual à dos demais fertilizantes nitrogenados, havendo razões de sobra que justifiquem sua crescente aceitação em várias partes do mundo. Entretanto, ocasionalmente tem-se verificado insucessos com o emprego da uréia, mas tais insucessos geralmente estão mais relacionados com o uso indiscriminado e inadequado do produto do que com sua eficiência em fornecer nitrogênio às plantas.

Dentre as principais causas de insucesso com o emprego da uréia na adubação das culturas destaca-se o das perdas de nitrogênio por volatilização, problema que tem sido bastante estudado ultimamente, devido à sua elevada importância agrônômica e econômica. Pesquisas realizadas em outros países mostram que perdas de vinte ou trinta por cento não são .

incomuns, e que em certas ocasiões mais da metade do nitrogênio fornecido pode volatilizar-se.

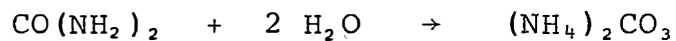
Em nosso meio, apesar do crescente consumo de uréia, pouca ou nenhuma atenção tem sido dada ao problema da volatilização, o que torna evidente a necessidade de estudos que permitam não somente avaliar a grandeza das perdas de nitrogênio por volatilização em nossas condições de solo e clima, como também indicar as técnicas mais adequadas ao seu controle. Outros pontos igualmente importantes em estudos dessa natureza referem-se à distribuição da amônia em torno do local de aplicação da uréia, por estar intimamente relacionada ao fenômeno de volatilização, e à nitrificação da amônia retida nesse local, por ser esse processo microbiológico de suma importância ao aproveitamento do fertilizante.

Neste trabalho, as perdas de amônia por volatilização foram avaliadas em laboratório e casa-de-vegetação para dois solos distintos e diferentes doses e modos de aplicação de uréia; a distribuição da amônia no solo e a nitrificação da mesma no local de aplicação do fertilizante foram igualmente estudadas.

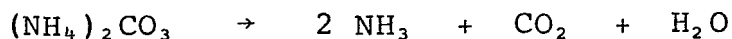
2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. VOLATILIZAÇÃO DE AMÔNIA

Um importante fenômeno que ocorre com a uréia logo após sua colocação no terreno é o das perdas de nitrogênio por volatilização de amônia. A uréia aplicada ao solo é prontamente hidrolisada a carbonato de amônio por uma enzima denominada urease, produzida por várias espécies de bactérias, fungos e actinomicetos do solo:



O carbonato de amônio desdobra-se facilmente em amônia gasosa, CO_2 e água,



sendo a amônia passível de ser retida pelo solo sob a forma de NH_4^+ , ou então de ser liberada para a atmosfera como NH_3 (MORTLAND, 1958). A quantidade liberada depende de vários fatores como dose e modo de aplicação da uréia, temperatura, umidade, pH, atividade da urease, conteúdo de água e capacidade de absorção de amônia do solo (ERNST e MASSEY, 1960; WAHHAB *et alii*, 1960; GASSER, 1964; OVERREIN e MOE, 1967; FENN e KISSEL, 1973; ANJOS e TEDESCO, 1976 e MORE e VARADE, 1978).

A hidrólise da uréia e as conseqüentes perdas de amônia por volatilização ocorrem com relativa rapidez. BROADBENT *et alii* (1958) verificaram que, a uma temperatura de 7°C , a uréia aplicada era hidrolisada completamente em 7 dias, enquanto que à 24°C a transformação da mesma dava-se em apenas 2 ou 3 dias. ERNST e MASSEY (1960) observaram que a hidrólise da uréia praticamente completou-se em 10 dias, e que as maiores perdas de NH_3 por volatilização ocorreram entre o 5º e 6º dias após à aplicação. HARGROVE e KISSEL (1979) também observaram que quase toda a uréia havia sido transformada 10 dias após a aplicação, mas que em apenas um dia cerca de 30 a 57% da uréia aplicada foram hidrolisados. MATOCHA (1976) verificou perdas de amônia de 51,5% em apenas 14 dias.

TERMAN e HUNT (1964) salientam que as perdas de nitrogênio também podem ocorrer com outros fertilizantes nitrogenados, principalmente com o fosfato monoamônio (MAP), fosfato diamônio (DAP), polifosfato de amônio (APP) e sulfato de amônio, sendo agravadas em solos mais ricos em CaCO_3 ou

que tenham recebido calagens pesadas. A uréia, contudo, exigiria maiores cuidados uma vez que as perdas podem ocorrer mesmo em solos ácidos; é que a amônia, elevando o pH no local da aplicação, cria condições favoráveis à sua própria volatilização. Semelhante observação foi feita por FENN e KISSEL (1973), os quais também estudaram as perdas de NH_3 a partir de diferentes fertilizantes nitrogenados.

2.1.1. MÉTODOS DE AVALIAÇÃO DAS PERDAS DE AMÔNIA

As perdas de amônia por volatilização tem sido avaliadas em laboratório, em casa-de-vegetação e em condições de campo através dos mais variados métodos. Esses métodos podem ser genericamente agrupados em métodos diretos e indiretos.

2.1.1.1. Métodos diretos

Os métodos diretos baseiam-se em captar a amônia desprendida do solo em uma solução de ácido diluído, como o H_2SO_4 ou HCl , por exemplo, e dosá-la por destilação a vapor em meio alcalino (BREMNER, 1965) ou por titulometria. A captação da amônia pode ser feita empregando-se um sistema dinâmico, no qual um fluxo contínuo de ar é passado sobre o solo para arrastar a amônia desprendida, ou utilizando-se um siste

ma estático, sem fluxo de ar.

No sistema estático o recipiente contendo a solução ácida é colocado dentro de uma câmara ou frasco junto com o solo, de modo que a amônia atinge a solução por difusão (VOLK, 1970; BREMNER e DOUGLAS, 1971; PRASAD, 1976 e RAISON e MCGARITY, 1978); uma variação desse sistema é o emprego de lâ-de-vidro embebida em ácido para captar a amônia (ANJOS e TEDESCO, 1973 e 1976). No sistema dinâmico o solo e a solução captadora são encerrados em frascos separados mas interligados por tubulação que conduz o fluxo de ar de um para o outro; neste sistema muitas vezes emprega-se uma solução diluída de ácido bórico para a captação de amônia devido à vantagem desta permitir a determinação direta do NH_3 por titulação com ácido padronizado; diversos trabalhos têm sido realizados empregando-se o sistema dinâmico em laboratório (ERNST e MASSEY, 1960; CHIN e KROONTJE, 1963; GASSER, 1964; TERMAN *et alii*, 1968; WATKINS *et alii*, 1972; FENN e KISSEL, 1973 e 1976 e CONNELL *et alii*, 1979), mas um número menor de experimentos foi conduzido em condições naturais (ROBERTSON e HANSEN, 1959; VOLK, 1959 e 1961; KISSEL *et alii*, 1977 e HARGROVE *et alii*, 1977) devido à dificuldade de se adaptar o equipamento coletor para funcionamento no campo.

2.1.1.2. Métodos indiretos

Nestes métodos, a quantidade de amônia volatilizada é determinada pela diferença entre a quantidade de nitrogênio aplicada e a que permaneceu no solo. Os vários métodos que tem sido empregados diferem pela maneira com que o nitrogênio remanescente é determinado.

Uma dessas maneiras é através da análise química do solo. É necessário haver um tratamento-padrão constituído de uma fonte nitrogenada não sujeita à volatilização para se descontar o efeito da imobilização microbiológica. Esta técnica tem sido utilizada tanto em laboratório (NÔMMIK, 1966) quanto em condições de campo (ANJOS e TEDESCO, 1973 e 1976) e parte da premissa de que a proporção do nitrogênio imobilizado é a mesma para ambas as fontes; sua precisão pode ser apreciavelmente aumentada com o emprego de adubos marcados com ^{15}N (NÔMMIK, 1973).

Outra maneira que tem sido adotada para avaliar o nitrogênio remanescente no solo é através do cultivo de uma planta-teste, o que pode ser feito em casa-de-vegetação (TERMAN e HUNT, 1964 e MATOCHA, 1976) ou em condições de campo (HARGROVE *et alii*, 1977 e HARGROVE e KISSEL, 1979); a quantidade de nitrogênio remanescente é avaliada pela comparação entre a quantidade total absorvida pela planta-teste e a absorvida por plantas adubadas com uma fonte nitrogenada não sujeita a perdas por volatilização de NH_3 .

2.1.2. EFEITO DE DOSES E MODOS DE APLICAÇÃO

A quantidade e o modo com que a uréia é aplicada ao solo são fatores que exercem acentuada influência nas perdas de amônia por volatilização. Tem-se demonstrado que, de maneira geral, as perdas aumentam com o aumento da dose de uréia fornecida. VOLK (1959) estudou as perdas de amônia durante os sete dias que se seguiram à aplicação de uréia à superfície, e verificou que as mesmas aumentaram em proporção maior que os aumentos da quantidade aplicada. WAHHAB *et alii* (1960) encontraram uma proporcionalidade entre perda e dose. OVERREIN e MOE (1967) observaram que a velocidade de hidrólise da uréia aumentou linearmente com a quantidade aplicada, mas as perdas por volatilização aumentaram exponencialmente; como consequência, a quantidade de nitrogênio volatilizado foi proporcionalmente superior para as doses mais elevadas de uréia do que para as mais baixas. CONNELL *et alii* (1979), verificaram um aumento na volatilização de 19% para 36% quando a dose variou de 200 para 300 kg/ha de N.

Ao contrário do que se tem constatado na maioria das vezes, em algumas ocasiões não se obteve aumento na volatilização com o aumento da dose de uréia aplicada. Simpson e Milsted (1961), citados por OVERREIN e MOE (1967), não observaram qualquer efeito da dose de uréia na velocidade de hidrólise, enquanto que Armstrong e Horton (1912), também citados por aqueles, e HARGROVE e KISSEL (1979), encontraram

correlação inversa entre essas variáveis; estes últimos observaram perdas de 31, 26, 19 e 13% do N aplicado, para doses de uréia de 56, 112, 224 e 448 kg/ha de N, respectivamente.

Quando a uréia é aplicada à superfície do solo, as perdas de amônia por volatilização são pronunciadas devido à pouca chance que o NH_3 tem de ser absorvido pelo terreno. Entretanto, se aplicada a uma certa profundidade, ou se incorporada à camada superficial do solo, as perdas tornam-se consideravelmente menores. ERNST e MASSEY (1960) verificaram um decréscimo nas perdas de amônia quando a uréia era misturada com camadas superficiais do solo cada vez mais espessas, mas a diferença entre a uréia aplicada à superfície e aquela incorporada a camadas rasas (0,6 ou 1,25 cm) foram pequenas. O-VERREIN e MOE (1967) observaram que as perdas por volatilização reduziam linearmente com o aumento da profundidade de aplicação de uréia, na razão de 23% para cada centímetro de terra colocada sobre o fertilizante. FENN e MIYAMOTO (1979) relataram que as perdas de amônia por volatilização foram mínimas quando a uréia foi injetada no solo a 2,5 cm de profundidade ou mais, enquanto CONNELL *et alii* (1979) apontaram que, para uma dose de 300 kg/ha de N, a localização da uréia a 4 cm de profundidade reduziu de 23 vezes as perdas por volatilização.

2.2. DISTRIBUIÇÃO DA AMÔNIA NO SOLO

Diversos trabalhos têm sido realizados com a finalidade de se estudar a distribuição da amônia no solo, mas a maioria dos resultados até agora obtidos refere-se ao emprego da amônia anidra; geralmente adota-se a técnica de aplicar esse fertilizante em linha ou em um ponto do terreno e efetuar amostragens e análises químicas das terras nas regiões circunvizinhas.

McINTOSH e FREDERICK (1958) observaram que grande parte da amônia aplicada em uma linha a 10 cm abaixo da superfície estava contida em uma zona de solo quase cilíndrica, cujo centro apresentava uma concentração de NH_4 da ordem de 1.300 a 2.000 ppm e pH igual a 9,5. NÕMMIK e NILSSON (1963) obtiveram uma zona de retenção cilíndrica medindo 14 cm de largura, para uma dose de 3 g de N por metro linear; entretanto, a maior porção do NH_3 aplicada estava a 0-3 cm do centro do cilindro, numa concentração de 900 a 2.500 ppm de NH_4 , sendo o pH nessa região igual a 9,4-9,5. SMILEY e PAPENDICK (1968) encontraram, para distâncias de 0-2, 2-4 e 4-5 cm do ponto de aplicação de amônia anidra, teores respectivos de N- NH_4 iguais a 2.524 ppm (pH 8,8), 1.337 ppm (pH 7,7) e 537 ppm (pH 6,0); a concentração de NH_3 estava altamente correlacionada com o pH. PAPENDICK e PARR (1966) e KHENGRE e SAVANT (1977) também demonstraram que praticamente toda a amônia permanece retida num raio de 5-7 cm do ponto de aplicação.

Alguns trabalhos têm demonstrado que a amônia, seja proveniente da aplicação de amônia anidra ou da uréia, não se distribui de maneira uniforme em torno do local de aplicação do fertilizante. STANLEY e SMITH (1956) estudaram o movimento do NH_3 no solo a partir do ponto de aplicação e verificaram que esse movimento é maior para cima e para os lados do que para baixo; o deslocamento da amônia para cima foi maior em solos contendo 15 ou 23% de umidade do que em solos secos ao ar. Em um estudo de campo com "água amônia" GASSER e ROSS (1975) observaram que a zona de máxima concentração de amônia situava-se sempre acima do local de aplicação, indicando que a distribuição do fertilizante em torno desse local não era uniforme. SAVANT e De DATTA (1980) e SAVANT *et alii* (1982), estudando o movimento e a distribuição da amônia após aplicação profunda de uréia em solo com arroz irrigado, mostraram que o deslocamento do NH_4^+ para baixo foi maior que para os lados, e este maior que para cima; como nesse estudo certa quantidade de água foi deixada percolar pelo solo, é possível que isso explique porque o deslocamento do NH_4^+ diferiu do observado nos casos anteriores.

2.3. NITRIFICAÇÃO DA AMÔNIA NO SOLO

A nitrificação do íon NH_4^+ contido ou produzido pelos fertilizantes naturais e sintéticos é um fenômeno que o

corre indistintamente em todos os solos, com raríssimas exceções. Entretanto, pelo fato dos adubos amoniacais serem geralmente aplicados em uma estreita faixa do solo, altas concentrações de amônio ou amônia originaram-se ao longo dessa faixa causando inibição temporária da nitrificação.

Segundo BROADBENT *et alii* (1957), a inibição da nitrificação deve-se a uma ou mais das seguintes causas: pH excessivamente alto resultante da aplicação de materiais alcalinos, pH excessivamente baixo devido à nitrificação do amônio aplicado, presença de amônia livre e efeito salino do fertilizante.

Os efeitos deletérios da amônia nos organismos do solo foram demonstrados por ENO e BLUE (1954) e por ENO *et alii* (1955), os quais observaram que o número de bactérias, actinomicetos e fungos diminui consideravelmente na zona do terreno onde a amônia anidra é aplicada. Verificaram, ainda, que a nitrificação nessa região do solo é severamente prejudicada devido à redução do número de bactérias nitrificadoras.

NÖMMIK e NILSSON (1963) demonstraram que, imediatamente após a injeção de amônia anidra, concentrações superiores a 2.500 ppm de $N-NH_3$ formam-se no centro da zona de retenção, resultando condições de esterilização parcial que persistem por diversas semanas. KIEHL e COBRA NETTO (1972 e 1974) verificaram que o tratamento de amostras de solo com amônia anidra prejudicava drasticamente o processo de nitrificação, o qual não era reestabelecido mesmo após 12 semanas.

BROADBENT *et alii* (1957) observaram que a aplicação de 800 ppm de N ou mais, nas formas de NH_4OH , $(\text{NH}_4)_2\text{SO}_4$ ou NH_4NO_3 , provocaram notável efeito inibitório no processo da nitrificação.

Devido à ação alcalinizante da amônia, o pH do solo tende a elevar-se apreciavelmente na região de aplicação. ENO e BLUE (1957) demonstraram que a amônia estimulou a nitrificação em solos ácidos por aumentar o pH a níveis mais adequados (pH 8,0-9,0) às bactérias nitrificadoras; NÖMMIK e NILSSON (1963) verificaram aumentos nos valores de pH para até 9,5 ou mais, enquanto KIEHL e ROCHA FILHO (1972) verificaram que o pH de um solo elevou-se de 6,3 a 9,0 como consequência do tratamento com amônia gasosa.

Em determinadas ocasiões, apenas a segunda etapa da nitrificação, ou seja, a conversão do nitrito (NO_2^-) a nitrato (NO_3^-) é inibida pela amônia, principalmente quando esta é associada a elevados valores de pH. Essa inibição se deve ao fato das *Nitrobactérias*, que realizam a segunda etapa do processo, serem mais sensíveis a essas condições adversas que as *Nitrosomonas*, encarregadas da primeira fase da nitrificação (BROADBENT e STEVENSON, 1966), e como resultado há acúmulo de nitrito. O acúmulo de nitrito no solo tem merecido atenção pelo fato desse íon ser tóxico às plantas quando acima de certas concentrações (BINGHAN *et alii*, 1954). A quantidade de nitrito que pode se acumular depende das condições do meio, tendo sido encontrados valores desde 27 até 800 ppm de N- NO_2 (NÖMMIK e NILSSON, 1963 e BROADBENT *et alii*, 1957).

3. MATERIAL E MÉTODOS

Dois solos foram utilizados neste estudo. O primeiro é um solo de aluvião, proveniente da Unidade Experimental de Pesquisa do IPA, em Serra Talhada (PE), classificado como Podzólico Vermelho Amarelo (PVA), apresentando textura areia barrenta, pH 7,1, carbono 0,66% e os seguintes teores em meq/100 g TFSA: 0,91 de PO_4^{3-} solúvel em H_2SO_4 0,05N, 0,58 de K^+ , 6,16 de Ca^{2+} , 1,71 de Mg^{2+} , 0,08 de Al^{3+} e 1,04 de H (acidez potencial). O segundo solo foi proveniente de Cruz das Almas (BA), classificado como Latossolo Vermelho Amarelo distrófico (LVA), apresentando textura barro arenosa, pH 5,8, carbono 0,81% e os seguintes teores em meq/100 g de TFSA: 0,66 de PO_4^{3-} solúvel em H_2SO_4 0,05 N, 0,32 de K^+ , 2,00 de Ca^{2+} , 1,44 de Mg^{2+} , 0,14 de Al^{3+} e 1,28 de H (acidez potencial). As amostras foram coletadas da superfície, na faixa de 0-20 cm de profundidade.

A uréia empregada nos experimentos é a produzi-

da comercialmente pela NITROFÉRTIL-NE, em Camaçari (BA), apresentando-se na forma granulada, com revestimento de pó calcáreo e concentração de 45% de N.

3.1. EXPERIMENTOS EM LABORATÓRIO

3.1.1. VOLATILIZAÇÃO DE AMÔNIA

A volatilização de amônia foi estudada em condições de laboratório através do método direto com sistema dinâmico de captação, empregando-se um dispositivo semelhante, em princípio, a outros anteriormente utilizados para esse fim (ERNST e MASSEY, 1960; CHIN e KROONTJE, 1963; WATKINS *et alii*, 1972; FENN e KISSEL, 1973; MATOCHA, 1976; HARGROVE e KISSEL, 1979 e VLEK e CRASWELL, 1979).

O dispositivo (Figura 1) consiste de uma câmara de volatilização, de um absorvedor para coleta de amônia volatilizada e de uma linha de vácuo. A câmara de volatilização é constituída de um frasco cilíndrico, de vidro, de 1,6 litros de capacidade, boca larga, e que é fechado por uma tampa atravessada por dois tubos de polietileno cujas extremidades inferiores abrem-se à cerca de 4 cm acima da superfície da terra. O absorvedor constitui-se de um frasco Erlenmeyer de 250 ml de capacidade contendo 150 ml de uma solução a 0,5% de ácido bórico (H_3BO_3) com indicadores bromocresol verde e ver-

melho de metila (BREMNER, 1965).

A linha de vácuo permite conectar diversos frascos ao mesmo tempo e estabelecer um fluxo de ar que conduz a amônia da câmara de volatilização para o absorvedor, onde é retida. O fluxo de ar nos diferentes frascos é equalizado através de pinças de Hoffman. A determinação do $N-NH_3$ coletado é feita por titulação de uma alíquota da solução receptora de ácido bórico, com H_2SO_4 0,01 N ou 0,05 N.

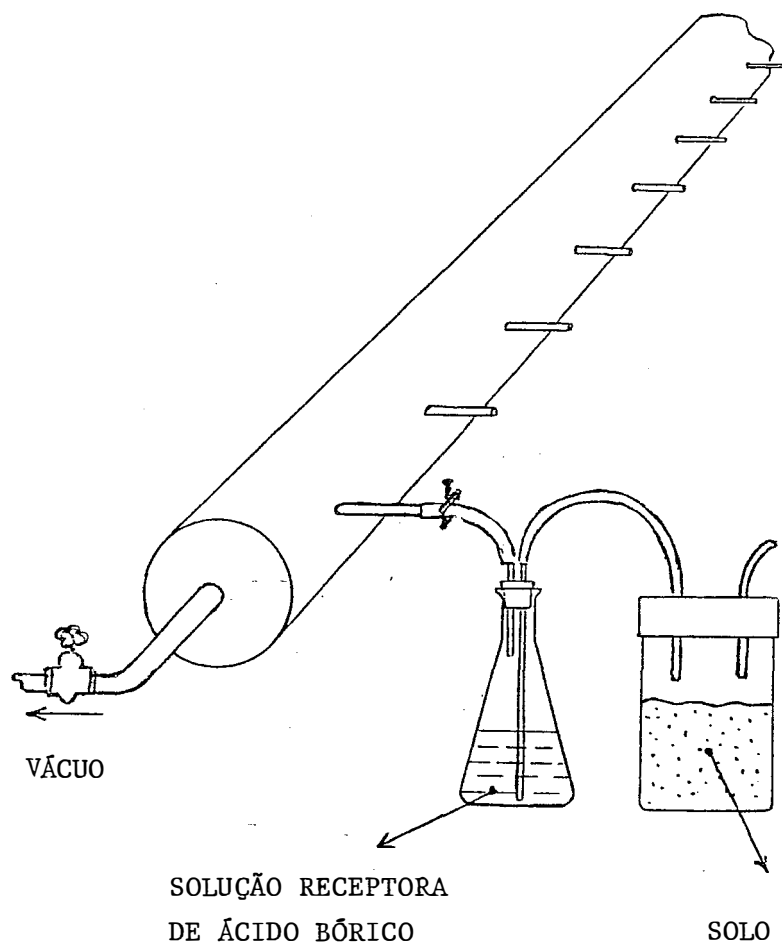


Figura 1 - Dispositivo para medir a volatilização de amônia em condições de laboratório.

O delineamento experimental foi em blocos inteiramente casualizados com três repetições. Os tratamentos constaram de um fatorial composto de três doses de uréia: 120, 180 e 240 kg/ha de N(0,85, 1,27 e 1,70 g/vaso de uréia) - e de quatro modos de aplicação: à superfície, misturada à camada de 0-2 cm de profundidade, misturada à camada de 0-5 cm de profundidade e localizada a 5 cm de profundidade sem incorporação à terra; em todos os tratamentos o fertilizante foi distribuído de modo a ocupar toda a secção do vaso. Além dos tratamentos fatoriais, foi incluído um tratamento testemunha sem adição de uréia.

Uma porção (1.124 g) do solo PVA foi colocada na câmara de volatilização de forma a se obter uma camada de terra de 8 cm de altura. A terra foi umedecida por etapas à 60% da capacidade de retenção de água e deixada secar naturalmente no decorrer do experimento; a perda de água do solo e as temperaturas máximas e mínimas do ambiente foram observadas durante o período experimental.

A coleta de amônia foi feita diariamente aplicando-se o fluxo de ar durante um período de duas horas. Nos intervalos entre coletas as tampas das câmaras de volatilização eram removidas. As soluções de ácido bórico que apresentavam mudança de coloração após cada período de coleta eram retiradas para análise, sendo substituídas por nova solução antes da coleta seguinte. A partir do 16º dia as coletas foram espaçadas devido à pequena variação nas perdas diárias de amô

nia, e no 34º dia foram interrompidas.

A quantidade diária de amônia volatilizada foi calculada com base na quantidade encontrada nas duas horas de coleta. A quantidade total volatilizada durante o período experimental foi obtida da somatória das perdas diárias, sendo que nos dias em que a coleta não foi feita a volatilização, apesar de pequena, foi estimada por interpolação. Os resultados relativos às perdas totais foram estudados estatisticamente através de análise da variância (Teste F) dos tratamentos e dos componentes do fatorial; as médias foram comparadas pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

3.1.2. DISTRIBUIÇÃO E NITRIFICAÇÃO DA AMÔNIA NO SOLO

Estes estudos foram realizados com as amostras do solo PVA remanescentes do experimento sobre volatilização de amônia (item 3.1.1.). As terras de determinados tratamentos foram coletadas em camadas com o auxílio de um amostrador especialmente idealizado para esse fim. O amostrador (Fig. 2) foi construído a partir de ferro em barra (5/8"), possuindo uma haste vertical ao longo da qual move-se uma barra horizontal de apoio, podendo esta ser fixada apertando-se uma porca tipo borboleta. A haste é dotada de lâmina que tem a função de raspar a superfície da terra, enquanto que a barra horizontal, apoiando-se na borda do vaso, limita a profundidade de

raspagem. Essa profundidade é controlada pela distância entre a base da lâmina e a barra horizontal de apoio. A terra do vaso era removida empregando-se uma pequena pá metálica. Testes preliminares revelaram ser possível a coleta de camadas sucessivas de terra a partir de 1 mm de espessura com razoável precisão e rapidez.

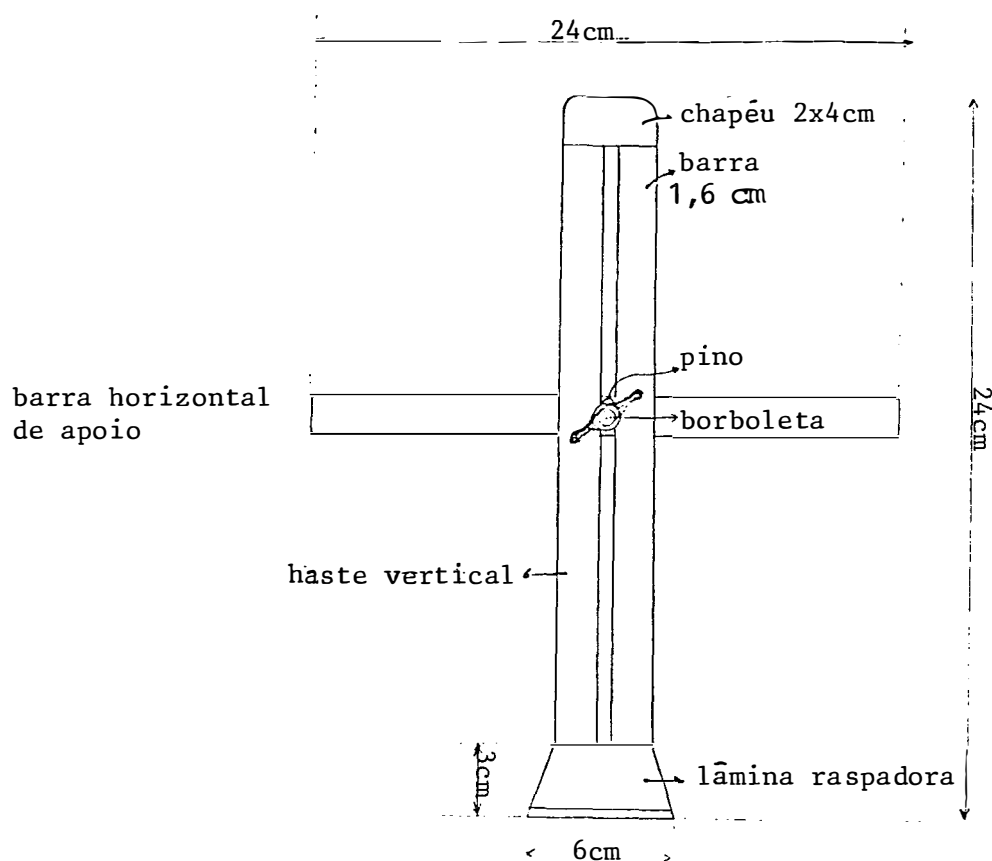


Figura 2 - Amostrador para coleta de terra em camadas de espessura conhecida do interior de vasos.

Para avaliar a distribuição da amônia no solo utilizou-se o tratamento-testemunha e aqueles com uréia aplicada na dose de 240 kg/ha de N à superfície e a 5 cm de pro-

fundidade. No tratamento com uréia à superfície foram coletadas oito camadas sucessivas de terra de 1 cm de espessura. As amostras foram analisadas quanto ao pH e ao conteúdo de N-NH₄. No tratamento com uréia a 5 cm de profundidade foram obtidas sete camadas de 1,0 ou 1,1 cm de espessura, tendo a região de aplicação do fertilizante coincido com o centro da quinta camada. Essas amostras foram igualmente analisadas quanto ao pH e ao conteúdo de N-NH₄, tendo-se ainda incluída a determinação de N-(NO₂ + NO₃). As formas amoniacal e nítrica de nitrogênio foram determinadas por extração com solução 2 N de KCl seguida de destilação a vapor conforme BREMNER (1965). O pH foi determinado com potenciômetro em uma suspensão de solo em água na proporção de 1:2,5.

Para avaliar a nitrificação da amônia todos os tratamentos do experimento de volatilização foram utilizados, obtendo-se, portanto, um fatorial com três doses e quatro modos de aplicação de uréia, além do tratamento-testemunha. Neste estudo foi considerada apenas uma camada de terra, situada no local de aplicação do fertilizante; mais precisamente, essa camada foi a de 0,0-1,1 cm para o tratamento testemunha e para aqueles com uréia à superfície, a 0-2 cm e a 0-5 cm, enquanto que para o tratamento com uréia a 5 cm de profundidade a camada foi a de 4,4-5,5 cm.

As terras coletadas para o experimento de nitrificação foram distribuídas em frascos plásticos de 80 ml, na quantidade de 20 g, umedecida a 60% da capacidade de re-

tenção de água e incubadas por 0, 3, 6 e 9 semanas em câmara de temperatura constante ajustada para 30°C. Aplicou-se à boca dos frascos película de polietileno de fina espessura, a qual tem a propriedade de ser permeável a gases mas não ao vapor d'água (KEENEY e BREMNER, 1966 e 1967). Ao final de cada período de incubação foram determinados o pH e os conteúdos de N-NH₄ e de N-(NO₂ + NO₃) pelos métodos já mencionados, sendo ainda determinado o teor de N-NO₂ por fotolorimetria empregando-se o reativo de Griess, conforme BREMNER (1965).

Os resultados obtidos foram estudados estatisticamente através de análise da variância (Teste F) dos tratamentos, sendo que para o experimento de nitrificação a variância dos componentes do fatorial também foi estudada; as médias foram comparadas pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade.

3.2. EXPERIMENTOS EM CASA-DE-VEGETAÇÃO

A volatilização de amônia foi estudada em casa-de-vegetação pelo método indireto com planta-teste, segundo o procedimento empregado por HARGROVE *et alii* (1977). Foram conduzidos dois experimentos utilizando-se o solo PVA, levemente alcalino, e o LVA, medianamente ácido. O estudo foi feito empregando-se vasos de lata com capacidade para 3 kg de terra.

O delineamento experimental foi em blocos in-

teiramente casualizados com quatro repetições. Os tratamentos, que constaram de um fatorial composto de três doses e quatro modos de aplicação de uréia, foram os mesmos adotados no estudo da volatilização em laboratório (item 3.1.1.). Em uma série adicional de vasos o solo foi tratado com nitrato de cálcio nas doses 0, 60, 120, 180 e 240 kg/ha de N (zero, 304, 607, 910 e 1214 mg/vaso de N). Em todos os tratamentos a uréia foi aplicada de modo a ocupar toda a secção do vaso, enquanto o $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ foi misturado com a metade inferior da terra.

Todos os tratamentos receberam adição de fósforo, potássio, boro, zinco e cobre nas quantidades equivalentes a 50 kg/ha de P_2O_5 na forma de superfosfato simples, 50 kg/ha de K_2O na forma de cloreto de potássio, 5 kg/ha de ácido bórico, 20 kg/ha de sulfato de zinco e 10 kg/ha de sulfato de cobre. As terras foram umedecidas à 70% da capacidade de retenção de água antes da aplicação da uréia. Cada vaso recebeu, ainda, um absorvedor de NH_3 que constou de um copo plástico pequeno (50 ml) tendo em seu interior um disco de lâ-vidro de aproximadamente 1 cm de espessura umedecido com 5 ml de H_2SO_4 a 5%. O copo era fixado em posição invertida a 1 cm da superfície da terra do vaso por meio de uma haste plástica; embora esse sistema não capte toda a amônia volatilizada, os resultados prestam-se à avaliação comparativa do efeito dos vários tratamentos.

Os vasos foram mantidos por um período de dez

dias em casa-de-vegetação, durante o qual não se adicionou água; os absorvedores foram removidos e a amônia extraída por percolação com água e determinada por destilação a vapor (BRENNER 1965). A terra do vaso foi reumedecida e dez sementes de milho (*Zea mays*, L., variedade "Piranão") foram semeadas, procedendo-se a regas quando necessárias. Aos 14 dias da emergência as plantas foram desbastadas para um número de 5 por vaso. Aos dois meses do plantio a parte aérea e o sistema radicular foram coletados separadamente, secados em estufa a 70°C, pesados, passados em moinho Wiley e secados novamente. O conteúdo de nitrogênio total foi determinado por digestão sulfúrica seguida de destilação em aparelho semi-micro Kjeldahl (JOHNSON e ULRICH, 1959).

A quantidade de N contida nas raízes e a contida na parte aérea das plantas de milho tratadas com $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ foram calculadas, somadas e depois correlacionadas com as doses de N para obtenção de uma curva-padrão; o grau da curva foi determinado pela análise da variância (Teste F) das regressões linear, quadrática e cúbica, e sua equação calculada. A perda de NH_3 por volatilização nos tratamentos com uréia foi calculada pela expressão.

$$\text{Perda de NH}_3 \text{ \%} = \frac{A - B}{A} \times 100$$

onde A é a quantidade de N aplicada e B a quantidade remanescente no solo após a volatilização, dada por interpolação na curva - padrão. Os resultados foram transformados em arco se-

no $\sqrt{x + a}$ e estudados estatisticamente através de análise da variância (Teste F) dos tratamentos e dos componentes do fatorial; as médias foram comparadas pelo Teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade. Os dados fornecidos pelos absorvedores de amônia também passaram por estudo estatístico semelhante.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. VOLATILIZAÇÃO DE AMÔNIA

4.1.1. EXPERIMENTO DE LABORATÓRIO

4.1.1.1. Perdas diárias de amônia

As perdas diárias de amônia verificadas nas primeiras semanas após a adição de uréia ao solo acham-se representadas nas Figuras 3, 4, 5 e 6 para os respectivos modos de aplicação estudados. O tratamento testemunha (sem uréia) não revelou desprendimento mensurável de amônia e por isso deixou de ser considerado neste estudo.

O início da volatilização ocorreu logo no primeiro dia após a adição da uréia quando o adubo foi aplicado à

superfície ou a 0-2 cm (Figuras 3 e 4), mas atrasou-se para o 2º dia quando a aplicação foi a 0-5 cm (Figura 5) e para o 6º dia quando a uréia foi localizada a 5 cm de profundidade (Figura 6). A máxima volatilização ocorreu entre o 4º e o 5º dia quando a uréia foi adicionada à superfície, a 0-2 cm e a 0-5 cm, mas também atrasou-se para 9º ou 11º dia quando a aplicação foi a 5 cm sem incorporação. A época de início da volatilização e a de máxima perda de amônia não foram influenciadas pela dose de uréia aplicada.

Os atrasos verificados tanto para o início da volatilização quanto para a época de máxima perda de amônia provavelmente se devem à resistência inicialmente oferecida pelo solo ao deslocamento da amônia pelo seu espaço poroso como consequência da ação dos mecanismos de retenção; assim, a amônia atingiria a superfície somente depois que os locais de retenção encontrados em seu trajeto estivessem saturados. Qualquer atraso nas perdas pode ser benéfico por aumentar a possibilidade de uma incorporação natural do adubo pela chuva antes que a volatilização seja intensa, permitindo maior aproveitamento do nitrogênio pela cultura.

O fato das perdas de amônia concentrarem-se logo nos primeiros dias da aplicação da uréia, conforme se verifica pelas Figuras 3 a 6, confirma observações anteriores (ERNST e MASSEY, 1960; MATOCHA, 1976 e HARGROVE e KISSEL, 1979) de que a hidrólise da uréia é um fenômeno bastante rápido no solo.

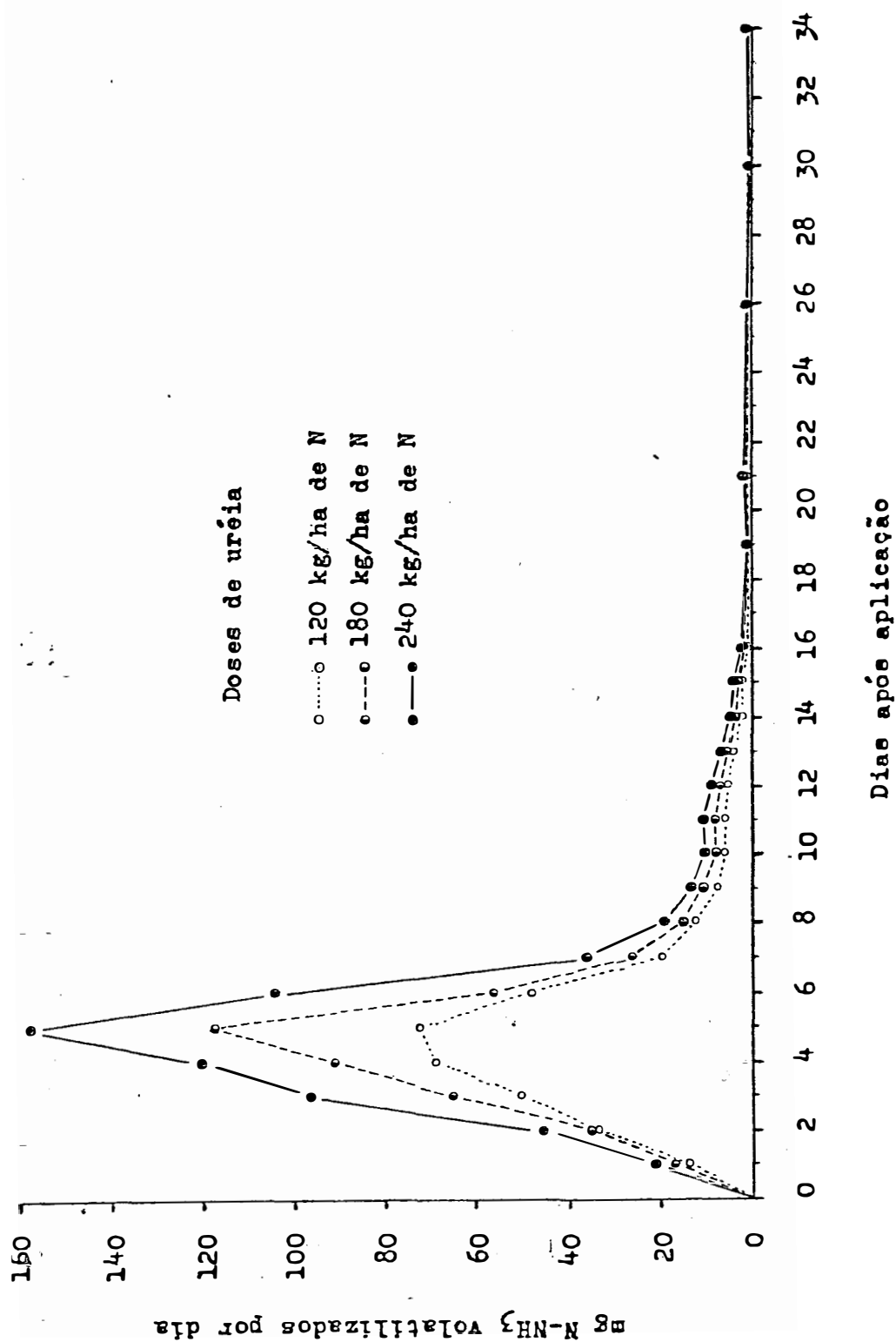


Figura 3 -- Perdas diárias de amônia por volatilização após aplicação de uréia em diferentes doses à superfície do solo PVA, avaliadas em laboratório.

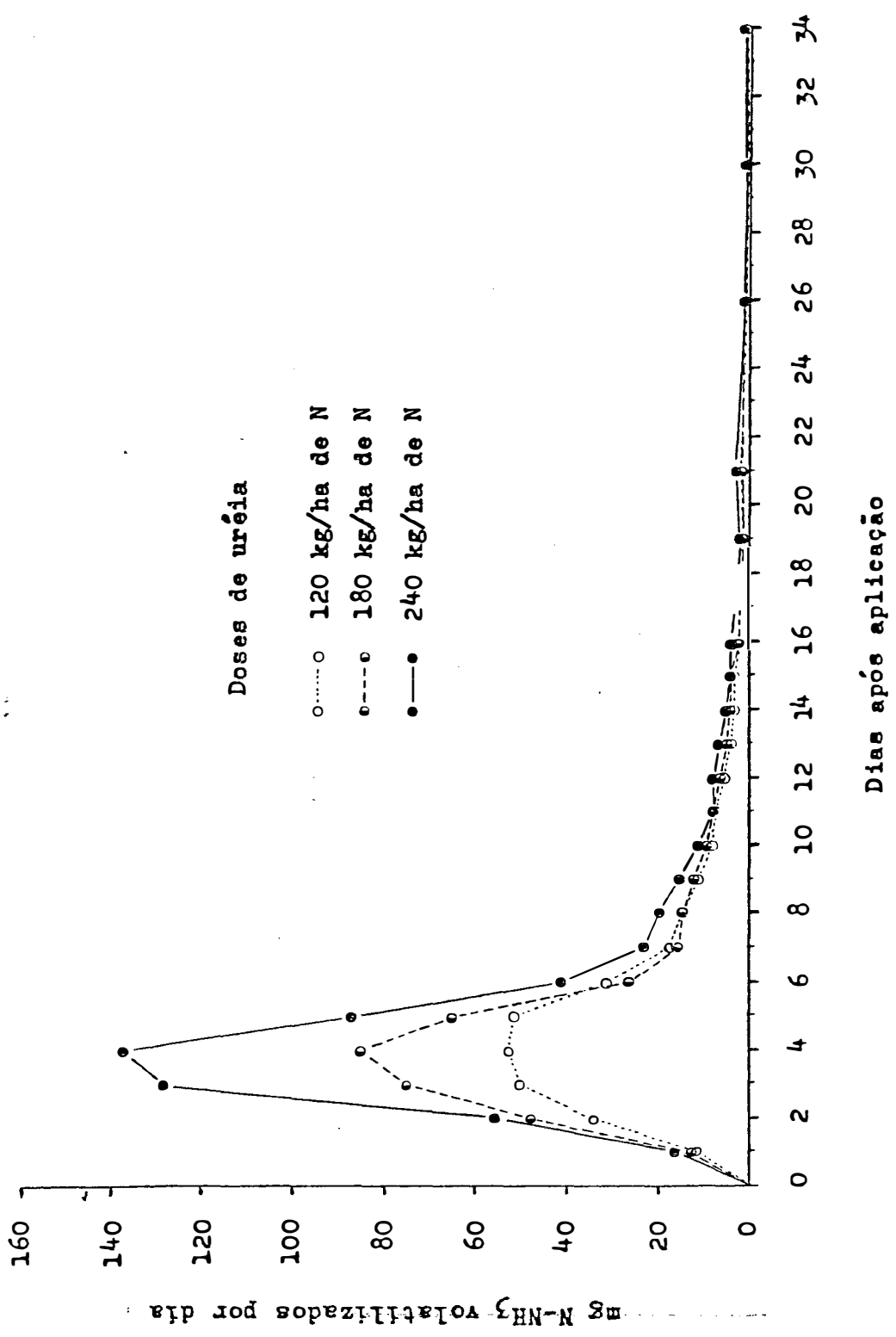


Figura 4 - Perdas diárias de amônia por volatilização após aplicação de uréia em diferentes doses à camada de 0-2 cm do solo PVA, avaliadas em laboratório.

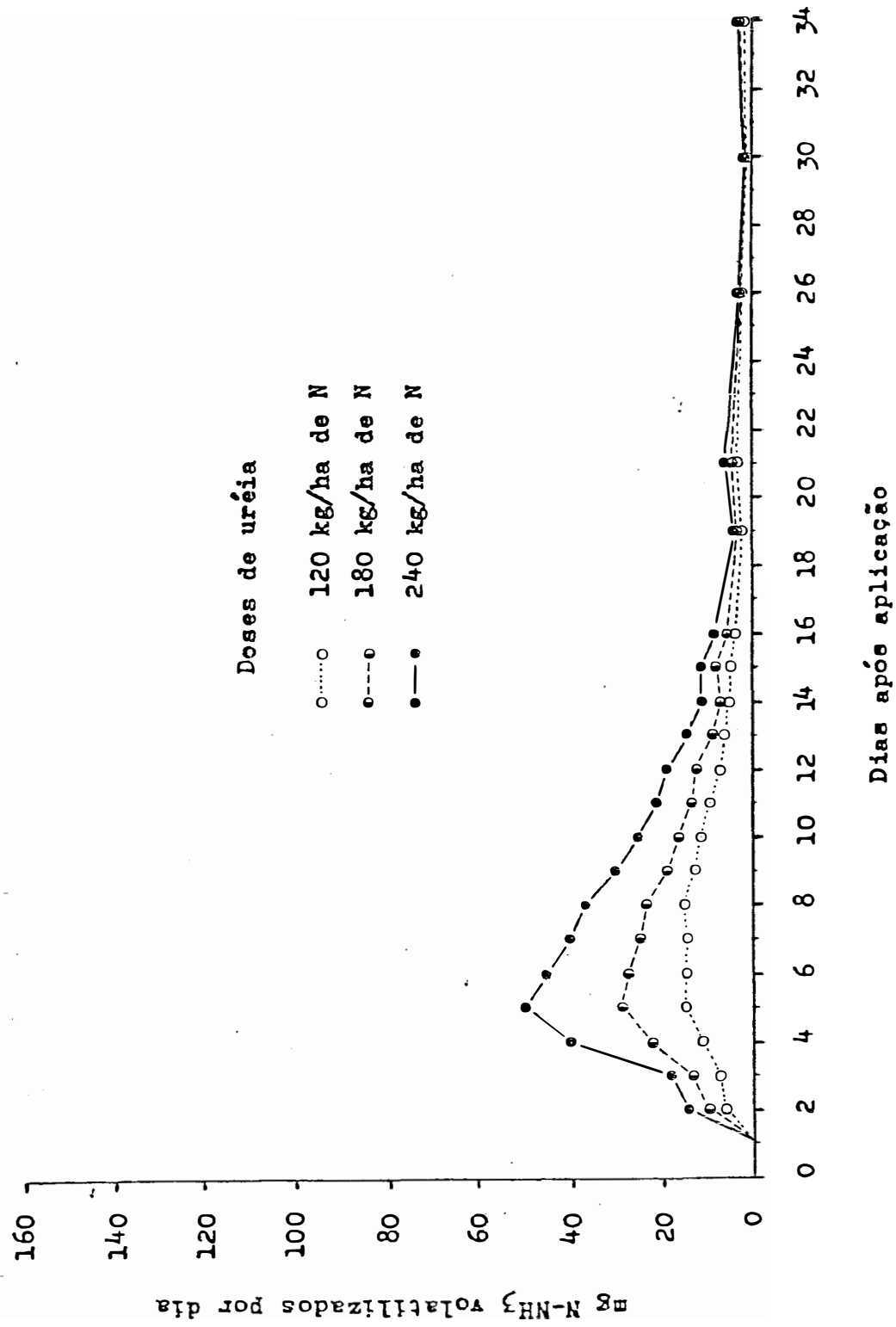


Figura 5 - Perdas diárias de amônia por volatilização após aplicação de uréia em diferentes doses à camada de 0-5 cm do solo PVA, avaliadas em laboratório.

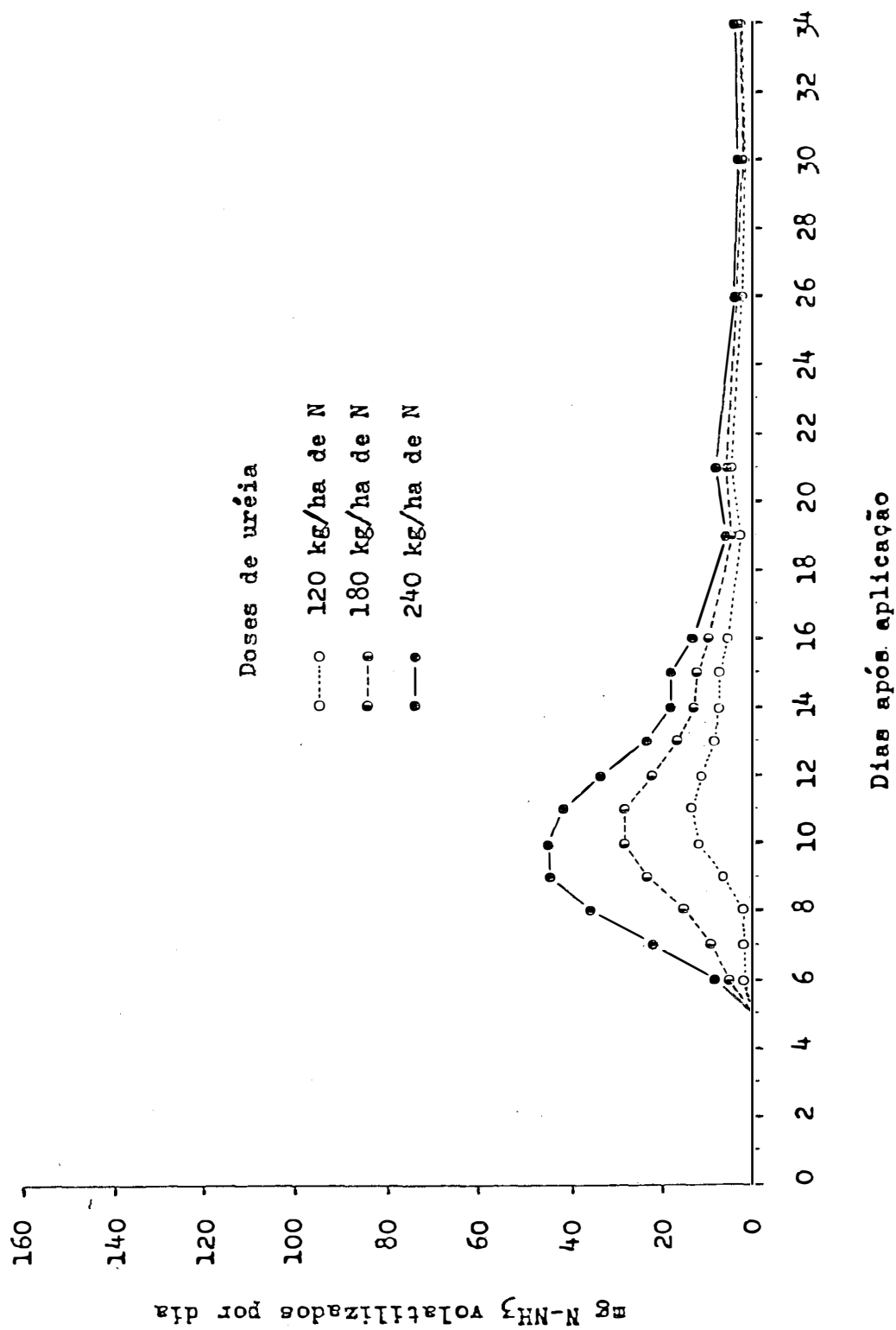


Figura 6 - Perdas diárias de amônia por volatilização após aplicação de uréia em diferentes doses a 5 cm da superfície do solo PVA, avaliadas em laboratório.

O índice de máxima volatilização diária sofreu influência tanto da dose quanto do modo de aplicação da uréia. Para um mesmo modo de aplicação, esse índice foi tanto maior quanto maior a dose de uréia, enquanto que, dentro de cada dose, a aplicação mais profunda do fertilizante produziu índices de máxima volatilização mais baixos.

A distribuição das perdas no período estudado sofreu grande influência do modo de aplicação. Quando a uréia foi deixada à superfície, as perdas, concentraram-se nos primeiros 7 ou 8 dias, passando a valores desprezíveis após o 16º dia; entretanto, quando aplicada mais profundamente, as perdas diárias tenderam à uma distribuição mais uniforme, prolongando-se até o 34º dia. Esse fato talvez se deva à liberação retardada da amônia retida fisicamente pelo solo, pois sabe-se que essa amônia é pouco estável (MORTLAND, 1958) e que pode desprender-se em pequenas quantidades por várias semanas ou meses (YOUNG, 1964; YOUNG e McNEAL, 1964 e PARR e PAPENDICK, 1966). Para a uréia aplicada superficialmente ou a 0-2cm, houve pouca retenção química e física devido ao baixo contato com o solo e, portanto, maior liberação de amônia no início, talvez acompanhando a intensidade de hidrólise do fertilizante.

Tem sido mostrado que o secamento do solo é um importante fator condicionador da volatilização de amônia (MARTIN e CHAPMAN, 1951; ERNST e MASSEY, 1960 e CONNELL *et alli*,

1979) pelo fato de uma parte da mesma encontrar-se dissolvida na água do solo. Comparando-se os períodos de maiores perdas de água ocorridas durante o experimento (Figura 7) com os de maior volatilização, observa-se que a coincidência foi pequena nos tratamentos com uréia à superfície ou à 0-2 cm, talvez devido à limitada contribuição da água na retenção. Nas aplicações mais profundas da uréia (a 0-5 cm e a 5 cm), entretanto, a coincidência foi grande, sugerindo que uma proporção maior da amônia passou para a solução do solo por estar em contato mais íntimo com o mesmo.

A oscilação da temperatura ambiente verificada durante o período experimental (Figura 8) parece não ter afetado a volatilização em sua fase inicial de máxima perda, mas teria influido na quantidade volatilizada quando esta passou a ser pequena, após o 16º dia. Dessa época em diante, as perdas acompanharam a oscilação da temperatura, talvez devido à influência que esta tem sobre o deslocamento da amônia retida fisicamente no solo (SOHN e PEECH, 1958).

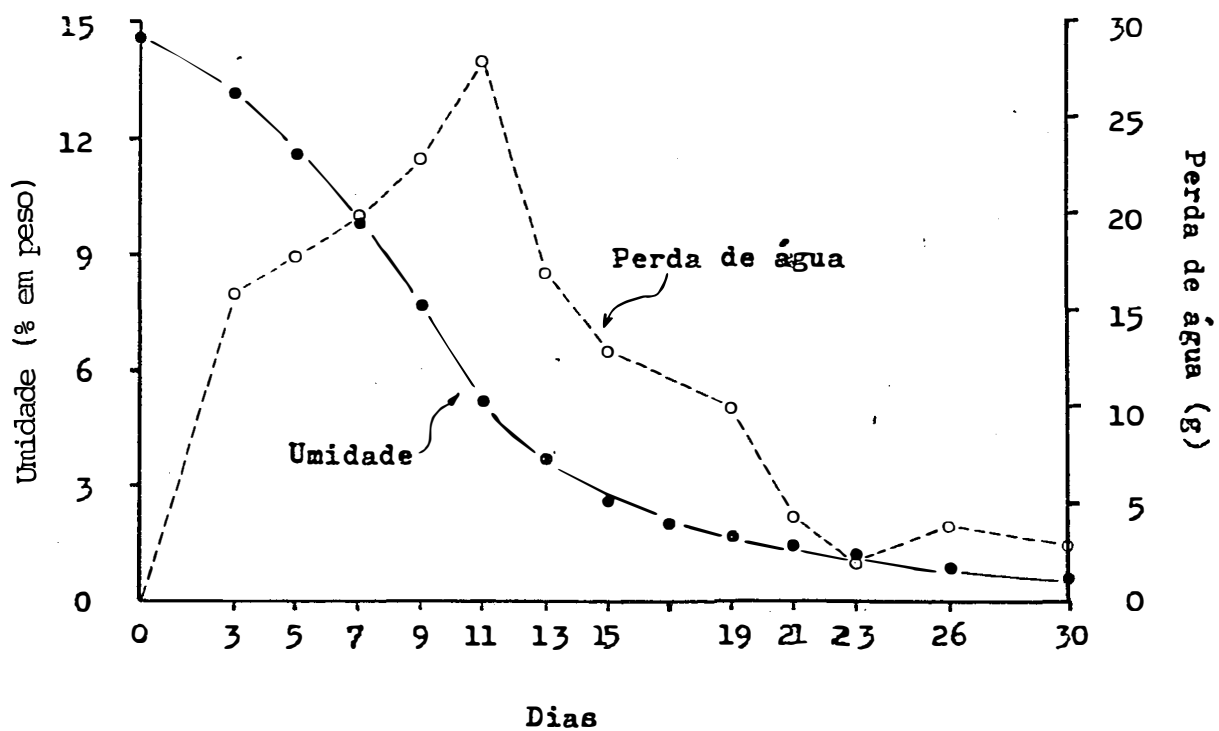


Figura 7 - Variação da umidade e da perda de água do solo PVA durante o experimento de volatilização de amônia em laboratório.

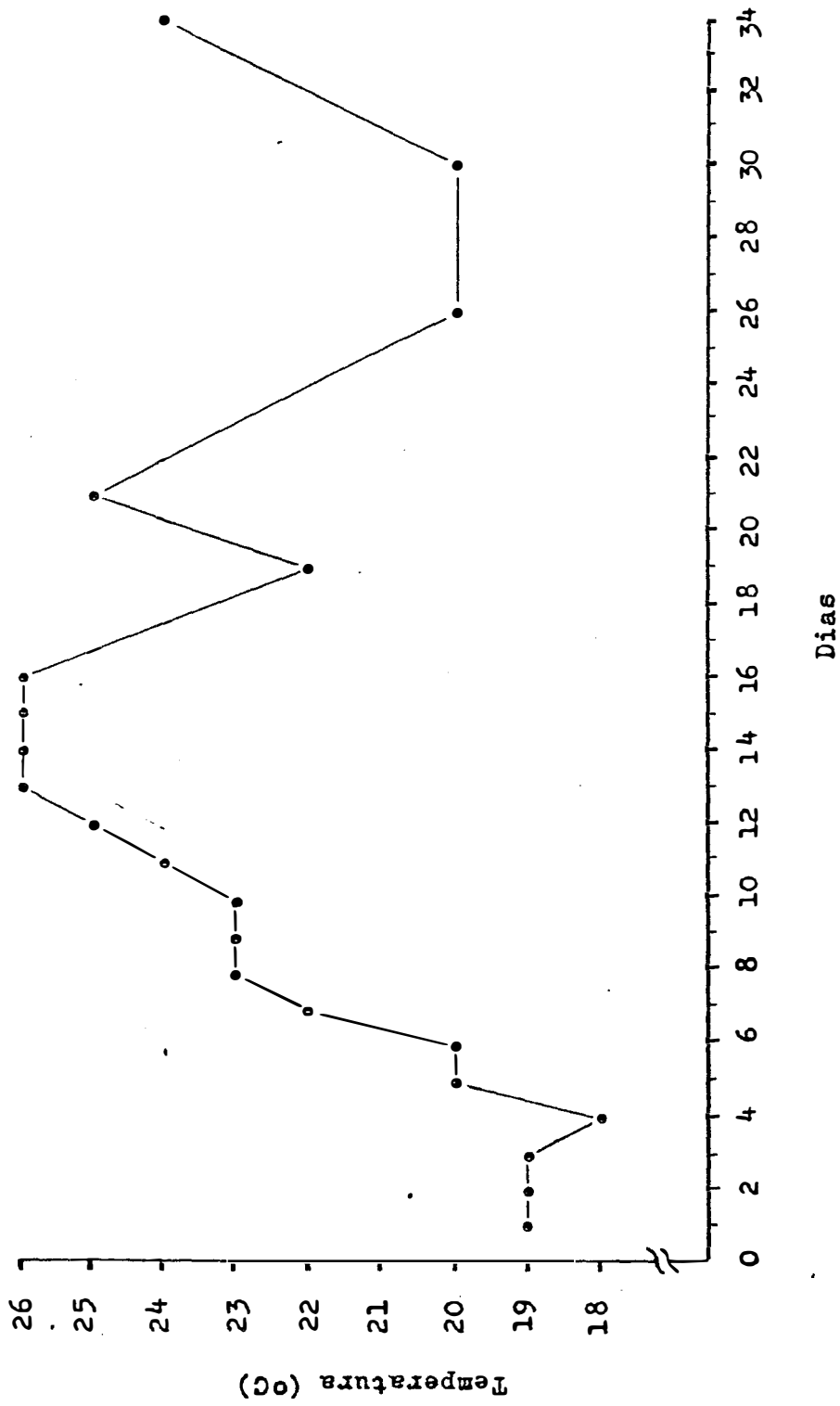


Figura 8 - Variação da temperatura ambiente do laboratório durante o experimento de volatilização de antônia com solo PVA.

4.1.1.2. Perdas totais de amônia

As perdas totais de amônia, calculadas pela somatória das perdas diárias, encontram-se na Tabela 1.

Tabela 1 - Perdas totais de amônia por volatilização em função de diferentes doses e modos de aplicação de uréia em solo PVA, avaliadas em laboratório¹.

DOSE	Modo de aplicação				Média
	Superfície	0-2 cm	0-5 cm	a 5 cm	
kg N/ha					kg N/ha
120	a 115,1 a	a 100,8a	b 52,6 a	c 35,5 a	76,0 a
180	a 151,3 b	b 128,6b	c 86,4 b	c 73,9 b	110,1 b
240	a 212,7 c	b 187,1c	c 137,0 c	d 119,0 c	163,9 c
MÉDIA	a 159,7	b 138,8	c 92,0	d 76,1	

C.V. = 5,57% F = 191,30 (significativo a 1% de probabilidade).

¹ Dentro de cada coluna ou de cada linha, médias com uma ou mais letras em comum à direita ou ao topo, respectivamente, não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade.

O efeito geral das doses de uréia sobre as perdas totais de amônia foi sempre significativo, independentemente do modo de aplicação, tendo as perdas se elevado, em média, em 45% para um aumento de 50% na dose (de 120 para 180 kg/ha de N) e em 49% para um aumento de 33% na dose (de 180 a 240 kg/ha de N). Dentro dos modos de aplicação de uréia, o aumento de 50% na dose correspondeu a aumentos menores na quantidade absoluta de amônia volatilizada quando a uréia foi aplicada à superfície ou na camada 0-2 cm, mas foram relativamente maiores para a aplicação a 0-5 e a 5 cm da superfície; o aumento de 33% na dose correspondeu a aumentos maiores nas perdas de amônia em todos os modos de aplicação.

A desproporcionalidade dos aumentos verificados para os métodos de aplicação mais profundos da uréia deve-se, provavelmente, ao fato de que esses métodos permitiram ao solo reter maior fração da amônia liberada, principalmente para as doses mais baixas de uréia; nota-se, portanto, que para a dose menor de 120 kg/ha de N a retenção teria sido elevada, impedindo grandes perdas de NH_3 , mas para doses maiores provavelmente a capacidade de retenção do solo tenha sido atingida, resultando, perdas desproporcionais. Para a aplicação à superfície, entretanto, não havendo influência notável da retenção, as perdas foram aproximadamente proporcionais à quantidade de nitrogênio fornecida.

A utilidade prática de tais fatos é que, se a uréia for aplicada ou incorporada a certa profundidade do so-

lo, a dose fornecida não deve exceder sua capacidade de retenção de amônia; em terrenos arenosos e pobres em matéria orgânica a profundidade de aplicação deve ser aumentada para compensar a menor capacidade de retenção geralmente apresentada por esses solos.

Considerando-se o efeito geral dos modos de aplicação, verificou-se diminuição nas perdas à medida que a uréia era aplicada mais profundamente no solo, em relação à aplicação à superfície a incorporação da uréia a 0-2 cm reduziu as perdas em 13%, enquanto que a incorporação a 0-5 cm diminuiu a volatilização em 42%; a aplicação da uréia a 5 cm de profundidade, por sua vez, reduziu as perdas em 52%. O efeito do modo de aplicação foi significativo para todas as doses de uréia aplicadas, conforme se observa na Tabela 1.

4.1.1.3. Perdas porcentuais de amônia

As perdas porcentuais da amônia aplicada verificadas nos diversos tratamentos estão representados na Tabela 2.

Tabela 2 - Perdas porcentuais de amônia por volatilização em função de diferentes doses e modos de aplicação de uréia em solo PVA, avaliadas em laboratório¹.

Doses (kg/ha N)	Modos de aplicação				Média
	Superfície	0-2 cm	0-5 cm	a 5 cm	
120	a 95,64 b	b 81,80 b	c 39,67 a	d 22,60 a	59,93 ab
180	a 83,77 a	b 69,85 a	c 44,14 ab	c 34,39 b	58,04 a
240	a 88,29 a	b 76,28 ab	c 52,95 b	c 42,79 b	65,08 b
MÉDIA	a 89,20	b 75,98	c 45,59	d 33,26	

F = 103,17 (significativo a 1% de probabilidade).

C.V. = 5,12%

¹ Dentro de cada coluna ou de cada linha, médias com uma ou mais letras em comum à direita ou ao topo, respectivamente, não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade.

Contrastando com as perdas totais (Tabela 1), as perdas porcentuais (médias dos quatro modos de aplicação) somente apresentaram influência da dose quando esta passou de 180 para 240 kg/ha de N, com um aumento de 12% na volatilização de NH₃. Nos métodos de aplicação mais superficiais, teria

sido pequena a participação do solo em reter a amônia produzida, de modo que a quantidade volatilizada foi proporcional à dose aplicada, mantendo as perdas percentuais mais ou menos constantes.

Quando houve incorporação a 0-5 cm, ou a aplicação a 5 cm da superfície, entretanto, as perdas percentuais foram menores para a dose mais baixa, talvez devido a maior retenção de amônia pelo solo. Portanto, o aumento da dose de uréia influiu diferentemente nas perdas percentuais de amônia, dependendo do modo com que a uréia foi aplicada, ora diminuindo a porcentagem perdida, conforme também observaram Armstrong e Horton (1912), citados por OVERREIN e MOE (1967) e HARGROVE e KISSEL (1979), ora aumentando essa porcentagem, de acordo com o verificado por VOLK (1959), WAHHAB *et alii* (1960), OVERREIN e MOE (1967) e CONNELL *et alii* (1979).

Quanto ao efeito geral dos modos de aplicação, verificou-se diminuição nas perdas à medida que a uréia era aplicada mais profundamente no solo (Tabela 2); em relação à aplicação à superfície, a incorporação da uréia a 0-2 cm reduziu as perdas em 15%, enquanto que a incorporação a 0-5 cm diminuiu a volatilização em 49%; a aplicação a 5 cm abaixo da superfície permitiu redução nas perdas da ordem de 63%. O efeito do modo de aplicação foi significativo para todas as doses de uréia, podendo-se observar que as perdas percentuais foram menores tanto para a uréia incorporada a 0-5 cm quanto para aquela aplicada a 5 cm de profundidade.

O efeito da incorporação ou do enterrio do adubo ao solo foi semelhante ao obtido por OVERREIN e MOE (1967), mas não tão evidente quanto o descrito por CONNELL *et alii* (1979), os quais observaram uma redução de 23 vezes na volatilização mediante a localização da uréia a 4 cm de profundidade. O fato da incorporação rasa (0-2 cm) da uréia não ter diminuído sensivelmente a volatilização vem reforçar observações anteriormente feitas por ERNST e MASSEY (1960).

As elevadas perdas de amônia verificadas de um modo geral neste experimento de laboratório com solo PVA podem ser atribuídas ao fato das condições de volatilização terem sido bastante favoráveis. O pH do solo, por exemplo, contribui para aumentar a volatilização quando acima de 7,0 (ERNST e MASSEY, 1960; OVERREIN e MOE, 1967 e FENN e KISSEL, 1973) , enquanto que o secamento da terra durante ou logo após a fase de hidrólise exerce acentuado efeito sobre as perdas (WAHHAB *et alii*, 1957; ERNST e MASSEY, 1960 e CONNELL *et alii*, 1979). Deve-se acrescentar, ainda, que não se procedeu a qualquer adição de água nos 34 dias de duração do experimento, o que teria o efeito benéfico de auxiliar a penetração da uréia no solo, a exemplo do que se verifica em condições naturais durante a ocorrência de chuvas; estas, por sinal, constituem um importante fator de controle natural da volatilização no campo. Finalmente, as perdas elevadas podem ter sido causadas pelas doses relativamente altas de uréia empregadas neste estudo, provavelmente ultrapassando a capacidade de retenção de amônia do solo utilizado.

4.1.2. EXPERIMENTOS EM CASA-DE-VEGETAÇÃO

4.1.2.1. Podzólico Vermelho Amarelo

As quantidades de amônia captadas nos absorvedores em função das diferentes doses e modos de aplicação da uréia em solo PVA encontram-se representadas na Figura 9. O efeito geral de doses foi o de aumentar as perdas de amônia com o aumento da quantidade de uréia aplicada; quando a dose passou de 120 para 180 kg/ha de N, as perdas aumentaram em 66%, e quando passou de 180 para 240 kg/ha, a volatilização foi 64% maior. Para a uréia aplicada à superfície, a cada aumento da dose correspondeu a um acréscimo na volatilização, mas para a uréia aplicada a 0-2 cm somente houve efeito quando a dose passou de 120 para 180 kg/ha; para a uréia aplicada a 0-5 cm e a 5 cm de profundidade, o aumento na volatilização somente se verificou quando a dose passou de 180 para 240 kg/ha.

Quanto ao efeito geral dos modos de aplicação, verificou-se diminuição nas perdas à medida que a uréia era aplicada mais profundamente no solo; em relação à aplicação à superfície a incorporação da uréia a 0-2 cm reduziu as perdas em 35%, enquanto que a incorporação a 0-5 cm diminuiu a volatilização em 65%; a aplicação da uréia 5 cm abaixo da superfície resultou em perdas de amônia similares às observadas para o adubo incorporado a 0-5 cm. O efeito do modo de aplicação foi significativo para todas as doses de uréia aplicadas.

A produção de matéria seca e os teores de N encontrados na parte aérea e nas raízes das plantas de milho encontram-se na Tabela 3. Esses dados foram utilizados para o cálculo das quantidades totais de N absorvidas pela planta, relacionadas na Tabela 4. A absorção do N fornecido como $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ aumentou linearmente com a dose; esse efeito é representado na Figura 10, cuja reta foi tomada como padrão para o cálculo da dose de N remanescente no solo; esta, por sua vez, permitiu avaliar as perdas de amônia por volatilização, relacionadas na Tabela 5. Os valores negativos observados em alguns tratamentos deveram-se ao fato do milho ter absorvido mais eficientemente o nitrogênio fornecido pela uréia que o fornecido pelo nitrato de cálcio; em vista disso, a análise de variância foi efetuada convertendo-se os dados de porcentagem em $\sqrt{x + a}$.

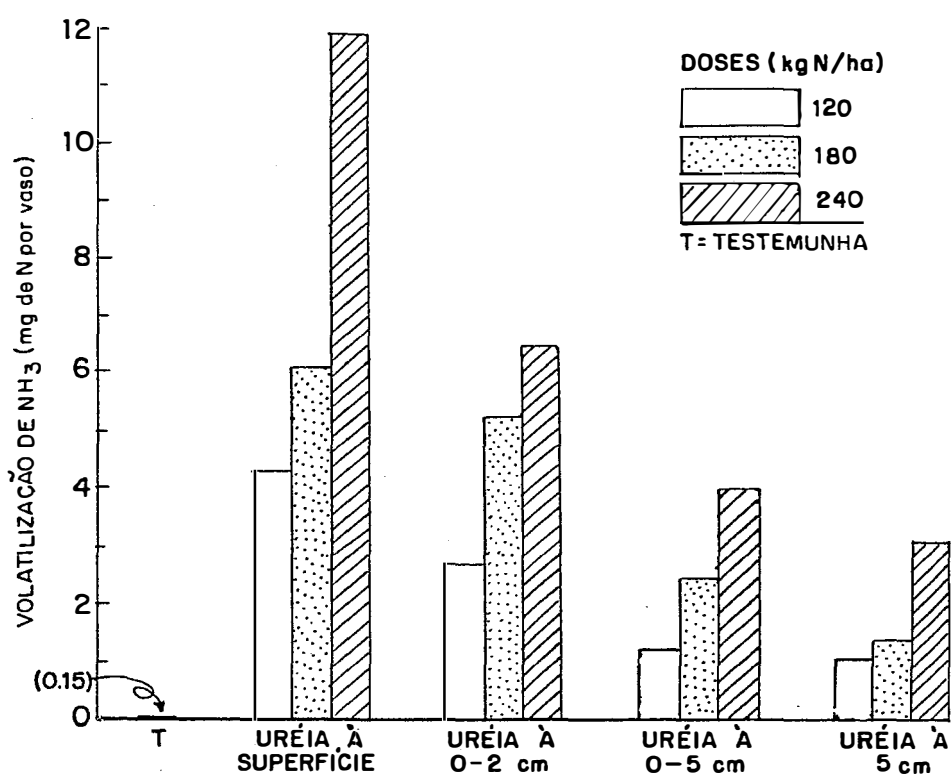


Figura 9 - Perdas de amônia por volatilização em função de diferentes doses e modos de aplicação de uréia em solo PVA, avaliadas através de absorvedores com H_2SO_4 .

Tabela 3 - Produção de matéria seca e teor de nitrogênio em plantas de milho adubadas com diferentes doses de nitrato de cálcio e com diferentes doses e modos de aplicação de uréia em solo PVA.

Tratamentos ¹	Produção de Matéria seca		Teor de N	
	Parte aérea	Raízes	Parte aérea	Raízes
	mg/vaso		%	
1. Testemunha	8.883	7.535	0,61	0,64
Nitrato de cálcio				
2. Dose 60	26.525	11.658	0,80	0,61
3. Dose 120	38.458	16.148	0,98	0,61
4. Dose 180	38.453	16.600	1,02	0,76
5. Dose 240	37.420	23.273	1,52	0,71
Uréia à superfície				
6. Dose 120	15.458	7.583	0,58	0,63
7. Dose 180	18.703	10.430	0,57	0,50
8. Dose 240	22.100	10.748	0,63	0,59
Uréia a 0-2 cm				
9. Dose 120	22.783	13.830	0,64	0,55
10. Dose 180	26.915	9.845	0,63	0,60
11. Dose 240	29.045	8.875	0,77	0,75
Uréia a 0-5 cm				
12. Dose 120	34.800	11.008	0,84	0,70
13. Dose 180	37.213	10.843	0,89	0,72
14. Dose 240	38.563	10.473	0,98	0,77
Uréia a 5 cm				
15. Dose 120	36.850	9.430	0,92	0,82
16. Dose 180	50.338	11.613	1,07	0,84
17. Dose 240	51.665	14.915	1,28	0,81

¹ Doses expressas em kg/ha de N.

Tabela 4 - Nitrogênio absorvido por plantas de milho adubadas com diferentes doses de nitrato de cálcio e com diferentes doses e modos de aplicação de uréia em solo PVA.

Tratamentos ¹	Nitrogênio absorvido		
	Parte aérea	Raízes	Total
	mg N/vaso		
1. Testemunha	54,55	46,11	100,66
Nitrato de cálcio			
2. Dose 60	212,68	69,97	282,65
3. Dose 120	373,70	97,17	470,87
4. Dose 180	391,20	125,55	516,75
5. Dose 240	568,70	164,12	732,82
Uréia à superfície			
6. Dose 120	90,30	47,38	137,68
7. Dose 180	106,00	50,54	156,54
8. Dose 240	139,30	60,81	200,11
Uréia a 0-2 cm			
9. Dose 120	146,90	76,72	223,62
10. Dose 180	169,40	57,95	227,35
11. Dose 240	223,70	65,55	289,25
Uréia a 0-5 cm			
12. Dose 120	292,20	74,24	366,44
13. Dose 180	330,20	73,90	404,10
14. Dose 240	376,00	80,53	456,53
Uréia a 5 cm			
15. Dose 120	339,30	77,23	416,53
16. Dose 180	537,10	96,77	633,87
17. Dose 240	658,80	120,51	779,31

¹ Doses expressas em kg/ha de N.

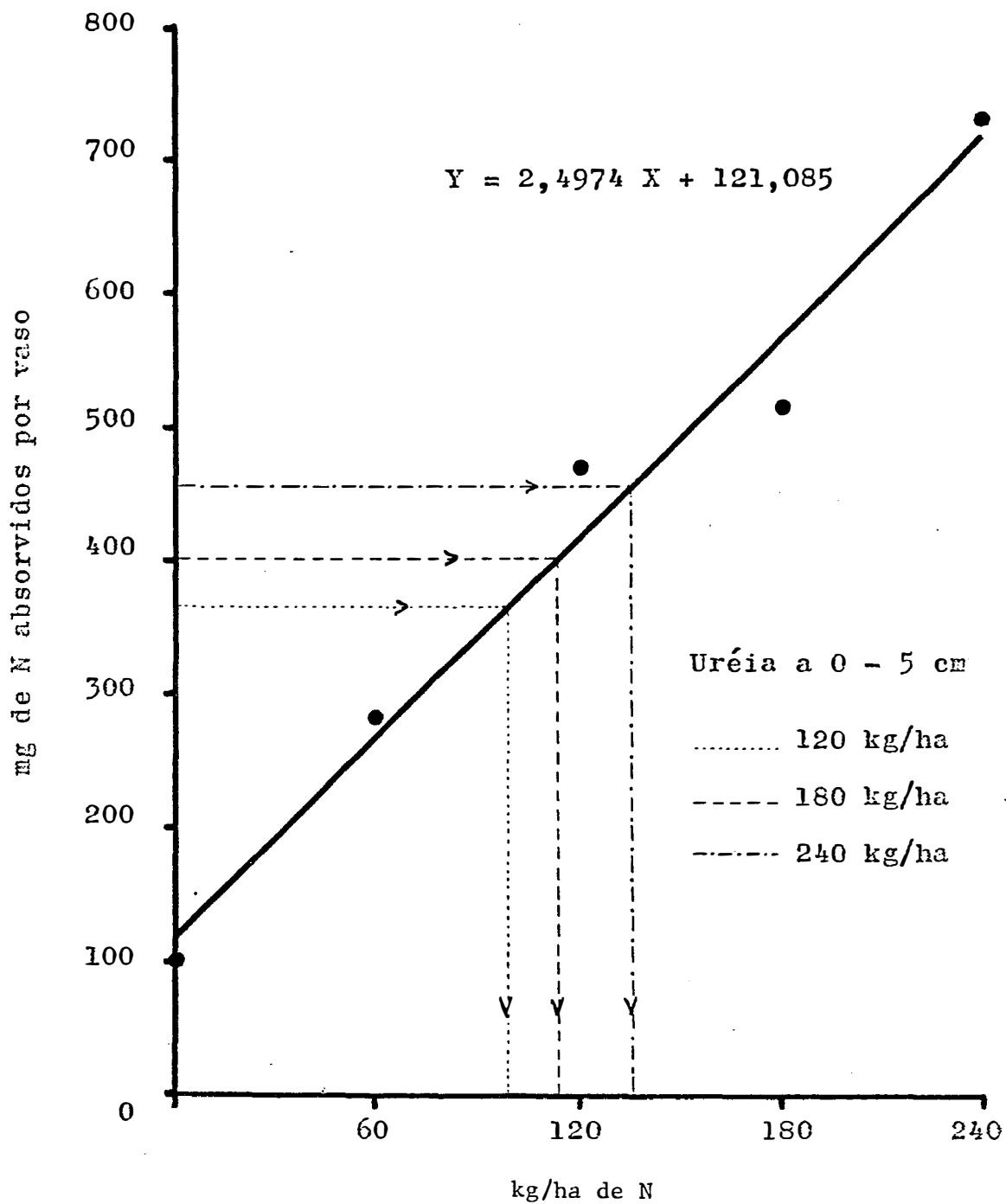


Figura 10 - Reta padrão de resposta das plantas de milho às doses de N aplicadas e exemplo de interpolação para avaliar a quantidade remanescente no solo PVA após a volatilização.

Tabela 5 - Perdas porcentuais de amônia por volatilização em função de diferentes doses e modos de aplicação de uréia em solo PVA, avaliadas em casa-de-vegetação¹.

Doses (kg/ha N)	MODOS DE APLICAÇÃO				Média
	Superfície	0-2 cm	0-5 cm	a 5 cm	
120	a 94,45 a	a 65,78 a	b 18,12 a	b 1,41 a	44,94 a
180	a 92,09 a	ab 76,34 a	b 37,02 a	c -29,37 a	44,02 a
240	a 86,80 a	a 71,93 a	a 43,90 a	b - 9,83 a	48,20 a
MÉDIA	a 91,11	a 71,35	b 33,01	c -12,60	

F = 73,45 (significativo a 1% de probabilidade).

C.V. = 12,79%.

¹ Dentro de cada coluna ou de cada linha, média com uma ou mais letras em comum à direita ou ao topo, respectivamente, não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade.

Observa-se pela Tabela 5 que o efeito de doses nas perdas de amônia por volatilização não foi significativo neste experimento. Quanto ao efeito geral dos modos de aplicação, verificou-se perdas similares para a uréia aplicada à su perfície e a 0-2 cm, enquanto que para a aplicada mais profun damente, a 0-5 cm, as perdas reduziram-se em 64%; com a aplicação 5 cm abaixo da superfície a volatilização foi totalmente controlada. Observou-se ainda que houve influência signifi cativa dos modos de aplicação para todas as doses de uréia aplicadas.

4.1.2.2. Latossolo Vermelho Amarelo

As quantidades de amônia captadas nos absorvedores em função das diferentes doses e modos de aplicação da uréia no solo LVA encontram-se representadas na Figura 11. O efeito geral de doses foi o de aumentar as perdas de amônia com o aumento da quantidade de uréia aplicada; quando a dose passou de 120 para 180 kg/ha de N as perdas aumentaram em 52%, e quando passou de 180 para 240 kg/ha a volatilização foi 39% maior. Em todos os modos de aplicação, a cada aumento na dose correspondeu a um acréscimo na volatilização, com exceção da uréia incorporada a 0-5 cm; nesse modo de aplicação, as perdas de amônia aumentaram somente quando se forneceu a maior dose do fertilizante.

Considerando-se o efeito geral dos modos de aplicação, verificou-se diminuição nas perdas quando a uréia foi incorporada ao solo; a incorporação da uréia aos primeiros 2 cm de solo resultou em menor volatilização de NH_3 (34%) que a simples aplicação à superfície, porém, as aplicações mais profundas a 0-5 cm e a 5 cm de profundidade não contribuíram para reduzir ainda mais essas perdas, como ocorrera com o solo PVA.

A produção de matéria seca e os teores de N encontrados na parte aérea e nas raízes das plantas de milho encontram-se na Tabela 6. As quantidades totais de N absorvidas pela planta acham-se relacionadas na Tabela 7. A absorção de N fornecido como $\text{Ca}(\text{NO}_3)_2$ aumentou linearmente com a dose, sendo esse efeito representado na Figura 12; a reta obtida permitiu o cálculo da dose de N remanescente no solo e a avaliação das perdas de NH_3 por volatilização, relacionadas na Tabela 8. A análise de variância foi efetuada convertendo-se os dados de porcentagem em $\text{arc sen } \sqrt{x}$.

Observa-se pela Tabela 8 que o efeito geral de doses nas perdas de amônia por volatilização foi significativo somente quando a quantidade de N aplicada passou de 120 para 180 kg/ha, tendo havido um aumento de 15% nas perdas de amônia. Para as aplicações de uréia à superfície e a 0-5 cm de profundidade não houve efeito de doses, enquanto que para a uréia aplicada a 0-2 cm e a 5 cm, somente ocorreu variação quando a dose passou de 120 para 180 kg/ha de N.

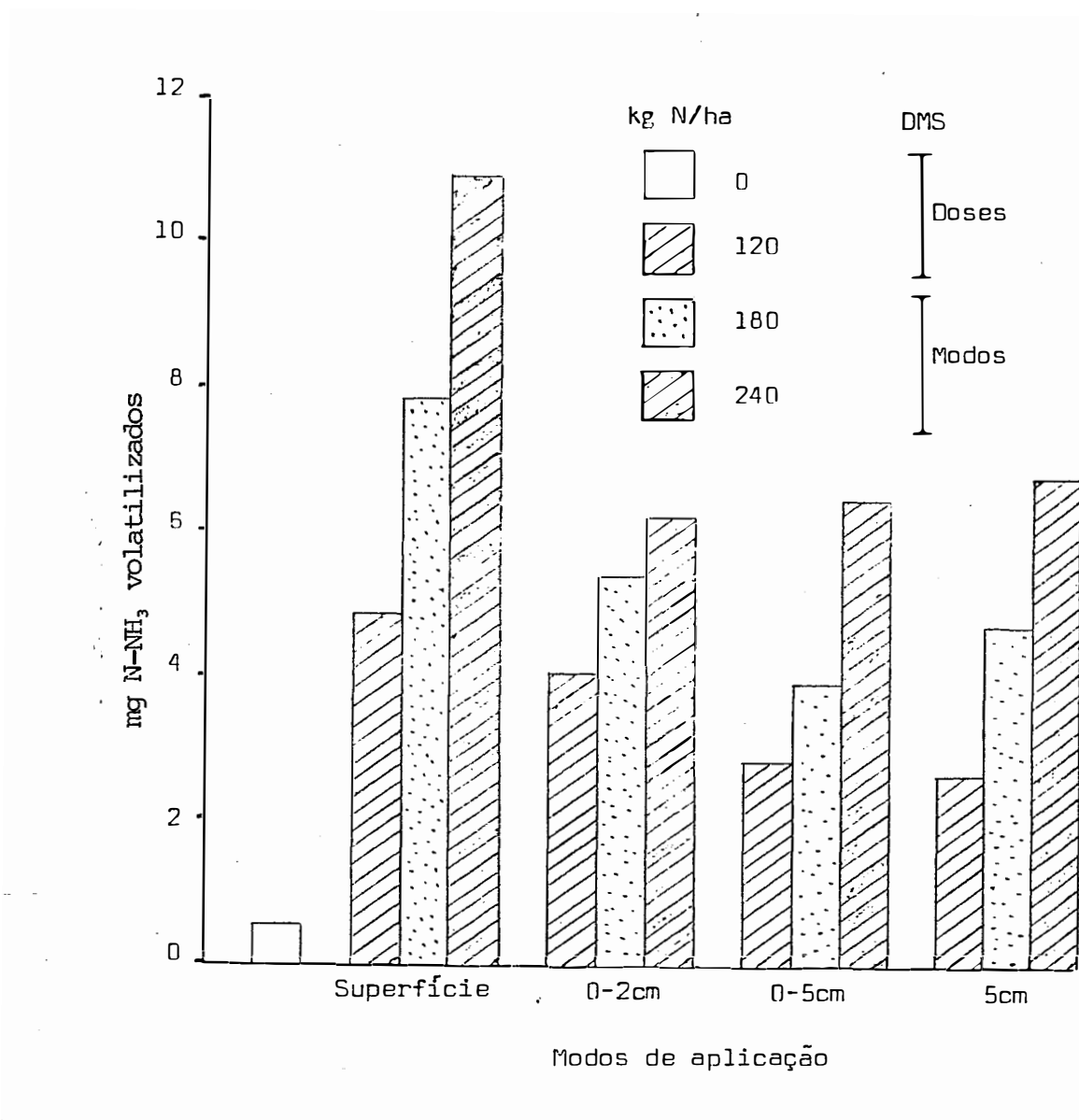


Figura 11 - Perdas de amônia por volatilização em função de diferentes doses e modos de aplicação de uréia em solo LVA, avaliadas através de absorvedores com H₂SO₄.

Tabela 6 - Produção de matéria seca e teor de nitrogênio em plantas de milho adubadas com diferentes doses de nitrato de cálcio e com diferentes doses e modos de aplicação de uréia em solo IVA.

Tratamentos ¹	Produção de matéria seca		Teor de N	
	Parte aérea	Raízes	Parte aérea	Raízes
	mg/vaso		%	
1. Testemunha	14.423	8.042	0,588	0,69
Nitrato de cálcio				
2. Dose 60	28.285	12.242	0,812	0,80
3. Dose 120	30.785	10.138	1,173	0,99
4. Dose 180	33.148	16.635	1,614	1,15
5. Dose 240	31.180	8.960	2,174	1,48
Uréia à superfície				
6. Dose 120	21.370	11.685	0,641	0,65
7. Dose 180	20.480	11.870	0,681	0,62
8. Dose 240	25.955	15.982	0,669	0,57
Uréia a 0-2 cm				
9. Dose 120	25.243	13.420	0,665	0,59
10. Dose 180	23.473	12.650	0,707	0,61
11. Dose 240	27.618	13.350	0,672	0,66
Uréia a 0-5 cm				
12. Dose 120	25.270	15.405	0,693	0,61
13. Dose 180	28.650	13.958	0,805	0,66
14. Dose 240	29.965	12.982	0,868	0,68
Uréia a 5 cm				
15. Dose 120	31.703	11.928	0,896	0,74
16. Dose 180	30.580	12.680	0,952	0,75
17. Dose 240	27.280	10.665	1,197	0,80

¹ Doses expressas em kg/ha de N.

Tabela 7 - Nitrogênio absorvido por plantas de milho adubadas com diferentes doses de nitrato de cálcio e com diferentes doses e modos de aplicação de uréia em solo IVA.

Tratamentos ¹	Nitrogênio absorvido		
	Parte aérea	Raízes	Total
	mg N/vaso		
1. Testemunha	84,100	55,075	139,18
Nitrato de cálcio			
2. Dose 60	229,425	98,200	327,62
3. Dose 120	360,875	100,225	461,10
4. Dose 180	534,700	180,925	715,62
5. Dose 240	676,875	152,200	829,08
Uréia à superfície			
6. Dose 120	136,825	75,025	211,85
7. Dose 180	139,300	72,600	211,90
8. Dose 240	173,625	86,500	260,12
Uréia a 0-2 cm			
9. Dose 120	167,550	79,050	246,60
10. Dose 180	166,150	75,800	242,00
11. Dose 240	184,800	87,850	272,65
Uréia a 0-5 cm			
12. Dose 120	174,925	89,025	263,95
13. Dose 180	230,875	91,725	322,60
14. Dose 240	260,225	87,950	348,18
Uréia a 5 cm			
15. Dose 120	283,925	87,875	371,80
16. Dose 180	291,000	95,475	386,48
17. Dose 240	324,825	84,775	409,60

¹ Doses expressas em kg/ha de N.

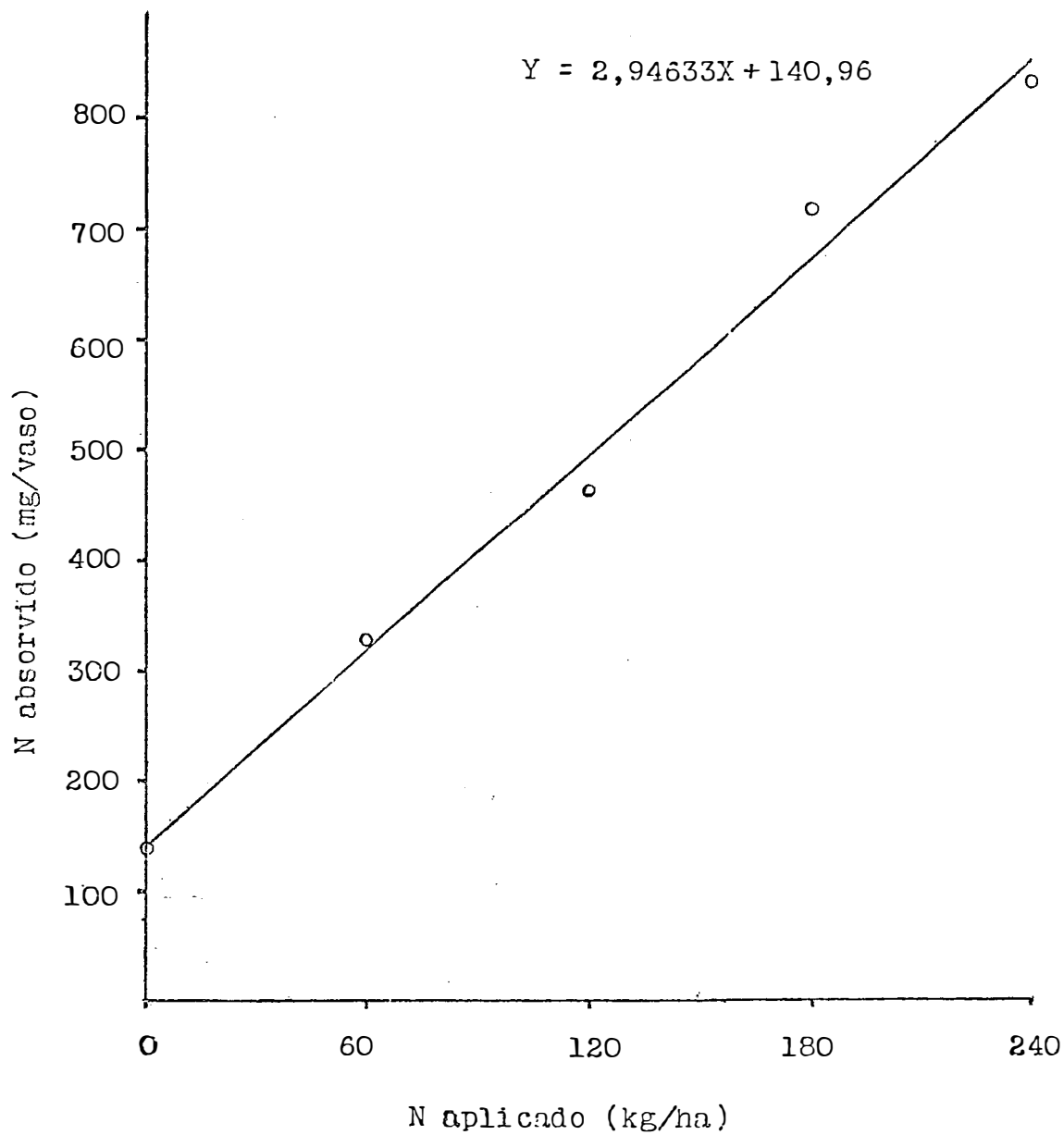


Figura 12 - Reta padrão de resposta das plantas de milho às doses de N aplicadas, em solo LVA.

Tabela 8 - Perdas percentuais de amônia por volatilização em função de diferentes doses e modos de aplicação de uréia em solo LVA, avaliadas em casa-de-vegetação¹.

Doses (kg/ha N)	Modos de aplicação				Média
	Superf.	0-2 cm	0-5 cm	a 5 cm	
120	a 79,95 a	ab 70,13 a	b 65,22 a	c 34,71 a	62,50 a
180	a 86,62 a	a 80,96 b	b 65,75 a	b 53,71 b	71,76 b
240	a 83,15 a	ab 81,38 b	b 70,70 a	b 62,01 b	74,31 b
MÉDIA	a 83,24	b 77,49	c 67,22	d 50,14	

F = 22,82 (significativo a 1% de probabilidade).

C.V. = 6,80%

¹ Dentro de cada coluna ou de cada linha, médias com uma ou mais letras em comum à direita ou ao topo, respectivamente, não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade.

Quanto ao efeito geral dos modos de aplicação, verificou-se diminuição nas perdas à medida que a uréia era aplicada mais profundamente no solo; em relação à aplicação à superfície, a incorporação de uréia a 0-2 cm reduziu as perdas em 7%, enquanto que a incorporação a 0-5 cm diminuiu a vo

latilização em 19%; a aplicação a 5 cm abaixo da superfície permitiu redução nas perdas da ordem de 40%. O efeito do modo de aplicação foi significativo para todas as doses de uréia, embora tenha havido certa variação nesse efeito de uma dose para a outra; observa-se, ainda, que as perdas foram acentuadas tanto para a uréia aplicada à superfície quanto para aquela incorporada de maneira mais superficial a 0-2 cm de profundidade.

As elevadas perdas de amônia ocorridas de um modo geral nestes experimentos em casa-de-vegetação com solos PVA e LVA podem ser atribuídas ao fato das condições de volatilização terem sido bastante favoráveis. O secamento do solo durante o período de hidrólise da uréia exerce acentuado efeito sobre as perdas (WAHHAB *et alii*, 1957 e CONNELL *et alii*, 1979) enquanto que elevadas temperaturas, como as verificadas no interior da casa-de-vegetação (35-45°C), contribuem para aumentar a volatilização (ERNST e MASSEY, 1960; WAHHAB *et alii*, 1960 e FENN e KISSEL, 1973). As perdas podem ainda ter sido favorecidas pelas doses relativamente altas de uréia empregadas neste estudo, e geralmente em condições naturais não são tão elevadas porque a hidrólise é mais lenta e as temperaturas são mais amenas, havendo, ainda, a possibilidade das chuvas auxiliarem na retenção do NH_3 gerado e na incorporação mais profunda da uréia aplicada.

4.1.2.3. Comparação entre os solos estudados

O fato deste estudo sobre volatilização de amônia em casa-de-vegetação ter sido conduzido com amostras de dois solos distintos permite estabelecer algumas comparações entre os mesmos. Pôde-se observar que as perdas porcentuais de amônia verificadas nos solos PVA e LVA foram muito semelhantes quando a uréia foi aplicada à superfície ou incorporada a 0-2 cm, mas mostraram-se distintamente menores no PVA que no LVA quando a aplicação foi de maneira mais profunda. Isso faz supor que houve certa diferença entre os solos quanto à capacidade de retenção de amônia.

Admitindo-se haver diferença de retenção, esta poderia ser atribuída à maior CTC apresentada pelo solo PVA (9,57 meq/100 g) em relação à do LVA (5,18 meq/100 g), pois sabe-se que a amônia é retida no complexo de troca do solo sob a forma NH_4^+ , e que a capacidade de troca catiônica exerce considerável influência no processo da retenção (MARTIN e CHAPMAN, 1951).

O pH parece não ter exercido efeito sobre as perdas de amônia por volatilização, pois estas foram maiores no solo ácido LVA (pH 5,8) e menores no levemente alcalino PVA (pH 7,1); como a uréia eleva o pH na região de aplicação durante a fase da hidrólise, é provável que a condição de acidez do solo LVA não tenha sido um importante fator para a retenção da volatilização. Da mesma forma, a pequena diferença

textural entre os solos não influenciou a perda de amônia, uma vez que o PVA, levemente mais arenoso, apresentou menor volatilização que o LVA.

4.2. DISTRIBUIÇÃO DA AMÔNIA NO SOLO

A distribuição da amônia no solo será interpretada em função do teor de $N-NH_4$ (amônio) retido nas diferentes camadas de solo estudadas.

Os valores de pH e os teores de $N-NH_4$ encontrados nas várias camadas do solo após 34 dias de aplicação da uréia são apresentados nas Figuras 13 e 14, para uréia à superfície e a 5 cm de profundidade, respectivamente. Os conteúdos de $N-(NO_2 + NO_3)$, determinados para o caso da uréia a 5 cm acham-se incluídos na Figura 14. O tratamento testemunha (não apresentado nas Figuras) revelou um pH igual a 6,9 e teores de 9 ppm de $N-NH_4$ e 34 ppm de $N-(NO_2 + NO_3)$.

Observa-se, em ambos os modos de aplicação da uréia, maior concentração de $N-NH_4$ na camada em contato direto com o adubo, talvez devido à maior retenção do nitrogênio amoniacal propiciada por uma maior concentração de NH_3 nessa região (PARR e PAPENDICK, 1966).

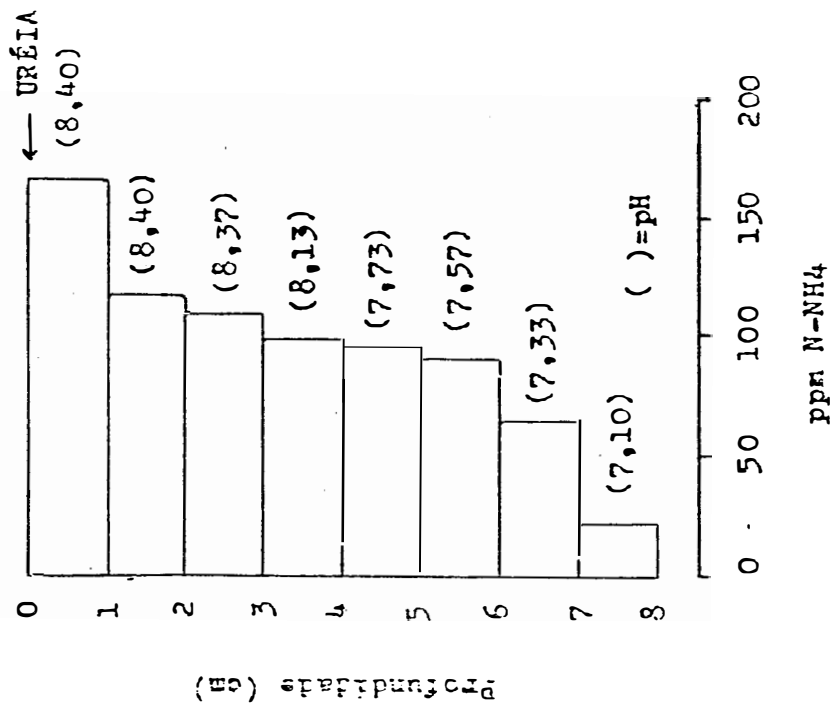


Figura 13 - Distribuição do amônio no solo após 34 dias da aplicação de uréia à superfície da terra.

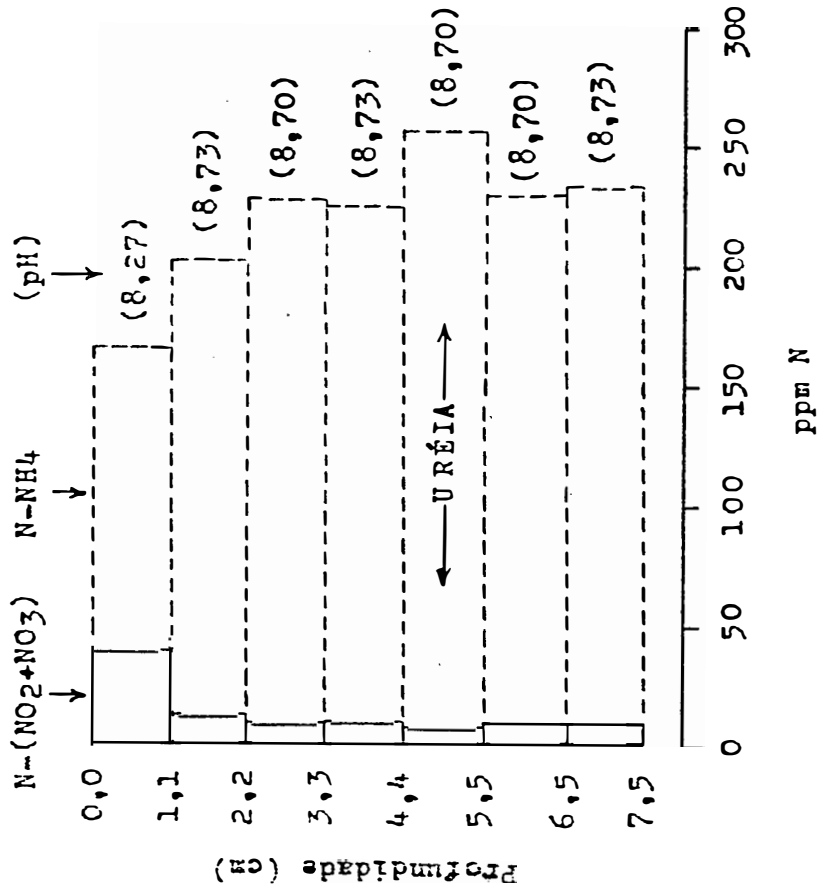


Figura 14 - Distribuição do amônio e dos nitratos no solo após 34 dias da aplicação de uréia a 5 cm da superfície da terra.

Para ambos os modos de aplicação, houve um decréscimo no teor de $N-NH_4$ do solo com a distância da região de aplicação do adubo. Quando a aplicação foi à superfície (Figura 13), o teor de $N-NH_4$ decresceu da primeira para segunda camada, mas daí em diante não variou significativamente até a profundidade de 6 cm. Nessa região o teor ainda era cerca de dez vezes superior ao da testemunha, o que mostra ter havido boa difusão da amônia em sentido descendente; essa difusão teria contribuído para aumentar a retenção da amônia no solo e diminuir as perdas por volatilização. A camada de 6-7 cm ainda apresentou apreciável teor de $N-NH_4$, mas pouca amônia atingiu a última faixa de 7-8 cm.

No caso da uréia aplicada a 5 cm de profundidade (Figura 14), as concentrações de amônio no solo foram maiores (2,3 vezes, em média) que as observadas para a uréia à superfície, certamente devido à maior retenção de amônia pelo solo, propiciada pela melhor localização do adubo. A concentração de $N-NH_4$ não variou significativamente nas duas camadas situadas abaixo e acima daquela em que o adubo foi aplicado, de modo que a amônia tendeu a concentrar-se em torno da região de aplicação; fato semelhante tem sido observado com aplicação de amônia anidra no solo (McINTOSH e FREDERICK, 1958; NÖMMIK e NILSSON, 1963; PAPENDICK e PARR, 1966; SMILEY e PAPENDICK, 1968 e KHENGRE e SAVANT, 1977). A camada superficial revelou teor mais baixo de $N-NH_4$, mas ainda superior ao do solo não tratado, o que indica que a amônia alcançou a superfí

cie; de fato, conforme mostraram os resultados do estudo de volatilização (Tabela 8), esse tratamento com 240 kg/ha de N revelou uma perda de 42,79% do elemento aplicado.

Para o solo em estudo, os resultados sugerem que um adequado controle das perdas por volatilização somente seria conseguido com a aplicação da uréia a profundidades superiores a 7 cm, pois se em sentido descendente o percurso do NH_3 foi dessa ordem (Figura 13), é de se supor que em direção à superfície o mesmo seja semelhante ou até maior, conforme foi verificado por STANLEY e SMITH (1956).

Os valores de pH apresentados junto às Figuras 13 e 14 revelaram um acentuado efeito alcalinizante da amônia no solo, principalmente nas camadas próximas ao local de aplicação de uréia; nessas, o pH elevou-se de 6,9 para até 8,73. Para o caso da uréia à superfície, o grau de alcalinização diminuiu acentuadamente com a profundidade, conforme ocorreu com o conteúdo de amônio. Sendo a amônia a causa da elevação do pH, é natural que haja uma correlação entre essas variáveis: tem-se demonstrado que na região de aplicação de amônia anidra a concentração de N-NH_4 está altamente correlacionada com o pH (SMILEY e PAPENDICK 1968). No presente trabalho essa correlação foi constatada tanto para os dados do tratamento com uréia à superfície ($r = 0,87$, significativo a 1%) quanto para os obtidos com uréia a 5 cm de profundidade ($r = 0,80$, significativo a 5%).

O teor de nitratos (Figura 14) permitiu ava-

liar quanto do amônio acumulado foi nitrificado durante o período em que o solo permaneceu no vaso até o seu secamento. Sabendo-se que o tratamento testemunha apresentou teor de 34 ppm de N-(NO₂ + NO₃), verifica-se que praticamente não houve nitrificação no solo tratado com uréia visto que, na maioria dos casos, os teores de nitratos foram inferiores ao do solo testemunha. As pequenas quantidades de nitratos, principalmente nas regiões mais próximas à zona de aplicação da uréia, sugerem ter havido inibição da nitrificação pela amônia, fenômeno que tem sido freqüentemente relatado na literatura (ENO e BLUE, 1954; ENO *et alii*, 1955; NÕMMIK e NILSSON, 1963 e KIEHL e COBRA NETTO, 1972 e 1974).

4.3. NITRIFICAÇÃO DA AMÔNIA NO SOLO

Os conteúdos de N-NH₄ e de N-(NO₂ + NO₃) encontrados nas amostras de solo coletadas diretamente da região de aplicação da uréia e incubadas por 0, 3, 6 e 9 semanas encontram-se nas Figuras 15 e 16, respectivamente. Observa-se que a nitrificação do amônio residual ocorreu em todas as amostras, independentemente do modo ou da dose de aplicação da uréia, conforme evidencia o decréscimo do teor de N-NH₄ e o aumento do teor de N-(NO₂ + NO₃) no decorrer da incubação. Os decréscimos no teor de N-NH₄ variaram de 61 a 92% (média de 76%), indicando que a maior parte do amônio originalmente e-

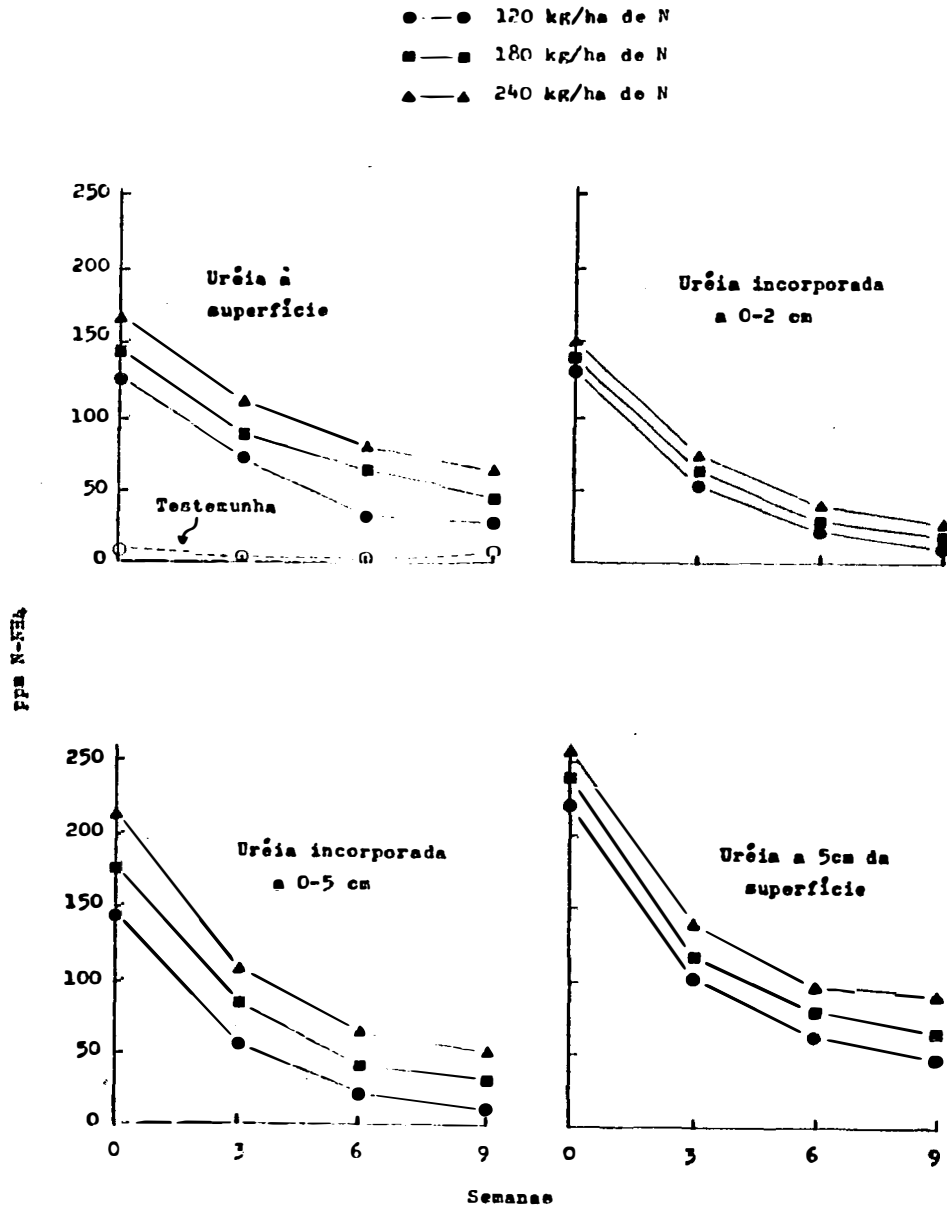


Figura 15 - Teores de amônio observados durante a incubação de amostras de solo PVA coletados na região de aplicação de uréia 34 dias após a adição do adubo em diferentes doses e modos, em laboratório.

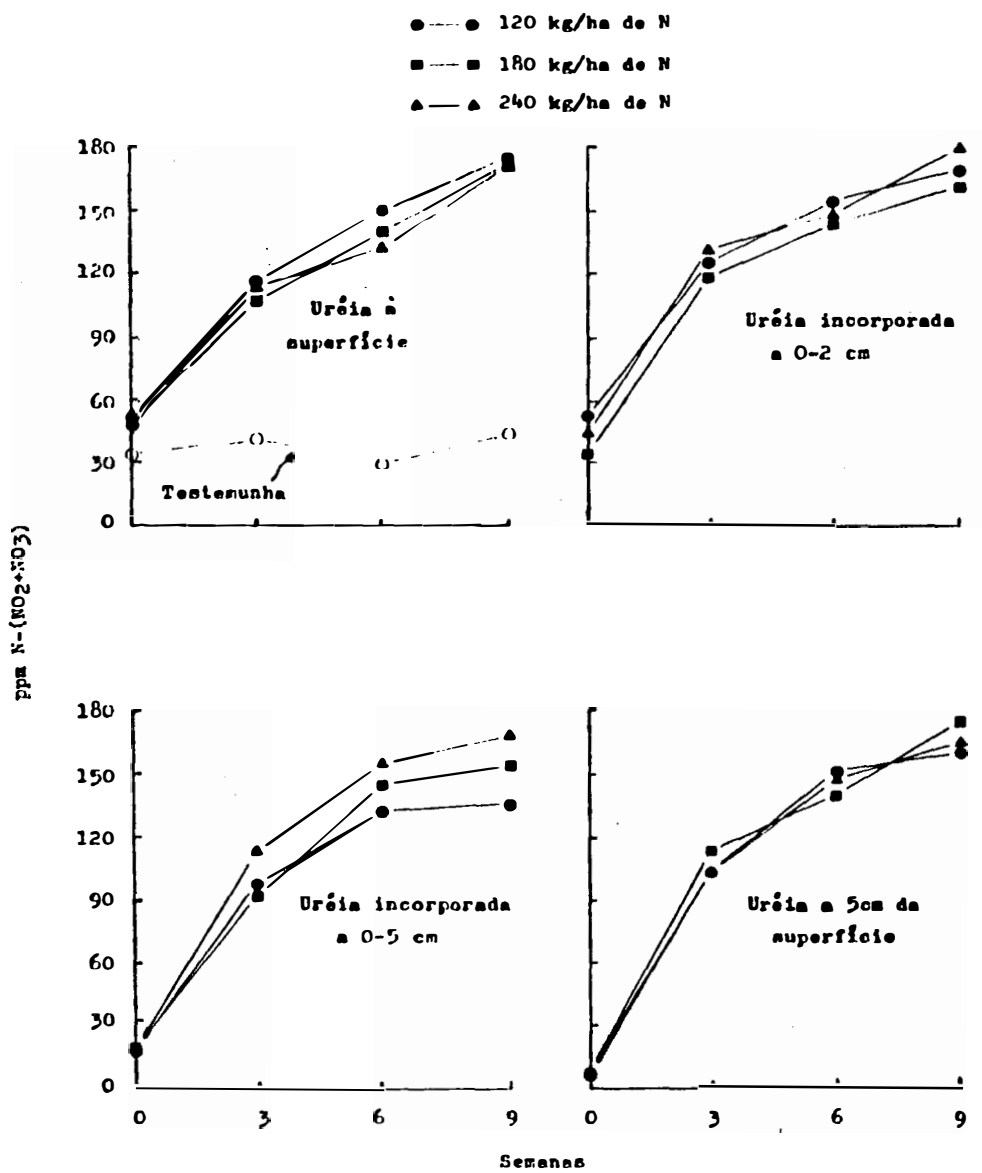


Figura 16 - Teores de nitratos observados durante a incubação de amostras de solo PVA coletadas na região de aplicação de uréia 34 dias após a adição do adubo em diferentes doses e modos, em laboratório.

xistente no solo foi nitrificado em nove semanas. O teor de nitratos aumentou durante a incubação a uma razão muito próxima ao decréscimo do conteúdo de amônio.

Apesar das quantidades de amônio retidas pelo solo no local de aplicação da uréia não terem sido elevadas, a se ver pelos teores encontrados na época zero semanas (Figura 15), é de se supor que durante o período de hidrólise desse fertilizante concentrações bem maiores da forma livre NH_3 tenham sido alcançadas nesse local, visto que uma parte do gás se difundiu para outras regiões ou se perdeu por volatilização. Embora a amônia livre possa exercer acentuado efeito tóxico aos organismos nitrificadores (ENO e BLUE, 1954; ENO *et alii*, 1955; KIEHL e COBRA NETTO, 1972 e 1974), a quantidade de nitratos acumulada na 9ª semana foi alta, independentemente da dose ou da maneira como a uréia foi aplicada. A explicação para o fato é que, no momento da incubação, o solo deveria conter apenas a forma retida NH_4^+ , já que a amônia livre havia sido volatilizada. WARREN (1962) afirma que a toxidez aos organismos nitrificadores é causada pela amônia livre e não pelo íon amônio.

Alguma evidência de toxidez da amônia na nitrificação ocorreu durante a fase de hidrólise da uréia e início da volatilização de NH_3 , o que pode ser observado pelos baixos teores de nitrato obtidos com zero semanas (Figura 16), comparados aos 34 ppm de nitrato encontrados no tratamento testemunha.

Devido a liberação de amônia, o pH elevou-se a apreciavelmente na região de aplicação da uréia, conforme mostra a Figura 17 (época zero semanas); o pH, originalmente igual a 6,9, chegou a alcançar 8,7 quando foram aplicados 240 kg/ha de N a 5 cm da superfície. Esse efeito alcalinizante é comumente observado em aplicações de amônia anidra diretamente no solo, sendo que nesse caso, valores de pH ainda maiores foram obtidos (ENO e BLUE, 1957; NÖMMIK e NILSSON, 1963 e KIEHL e ROCHA FILHO, 1972). A localização da uréia a 5 cm da superfície resultou nos mais altos valores de pH devido, provavelmente, às maiores quantidades de amônia retidas no solo. De fato, um estudo de correlação feito com os resultados dos tratamentos com uréia na época zero semanas mostrou elevada dependência ($r = 0,85$, significativo a 0,1%) entre as variáveis pH e teor de amônio. SMILEY e PAPENDICK (1968) também verificaram este fato em amostras de solo coletadas a diferentes distâncias do ponto de aplicação de amônia anidra.

Com a nitrificação, fenômeno microbiológico de natureza acidificante, o pH em todas as amostras tratadas com uréia decresceu a valores inferiores ao da testemunha (Figura 17); observa-se certa semelhança entre os gráficos que representam as variações de pH e de $N-NH_4$.

Não se observou acúmulo apreciável de nitrito (NO_2^-) em quaisquer das etapas de incubação (Figura 18). A concentração de $N-NO_2$ não chegou a 0,3 ppm, de modo que os resultados obtidos para $N-(NO_2 + NO_3)$, mostrados na Figura 16, re-

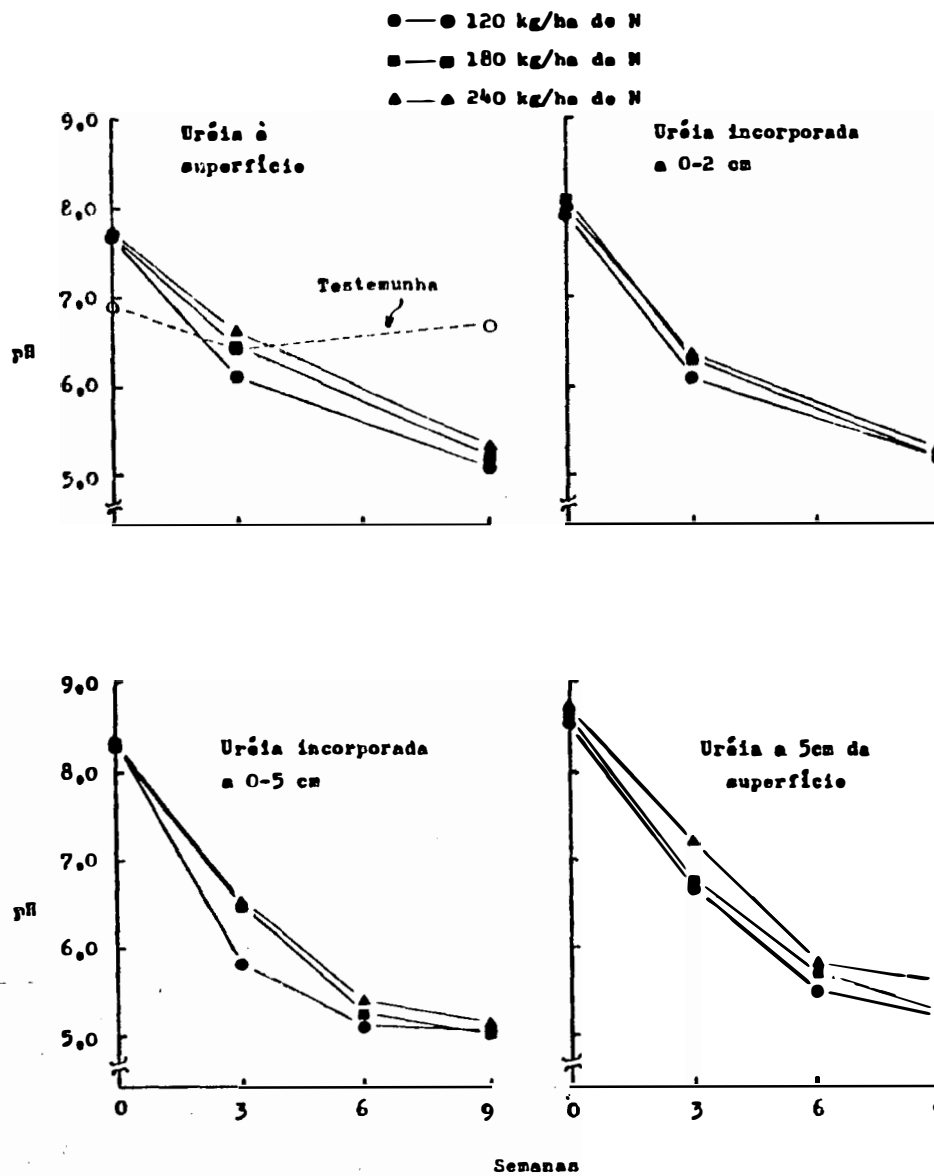


Figura 17 - Valores de pH observados durante a incubação de amostras de solo coletadas na região de aplicação de uréia 34 dias após a adição do adubo em diferentes doses e modos.

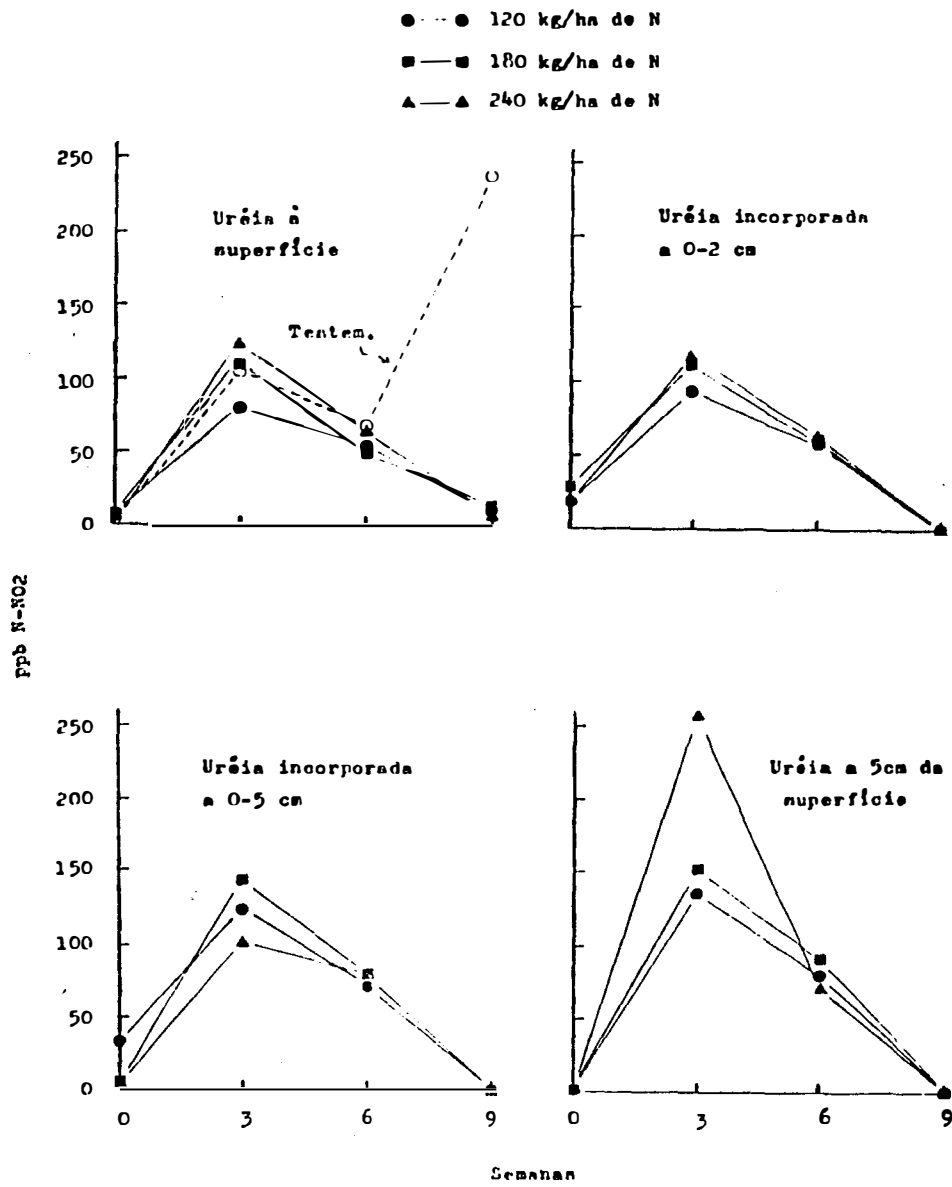


Figura 18 - Teores de nitrito observados durante a incubação de amostras de solo coletadas na região de aplicação de uréia 34 dias após a adição do adubo em diferentes doses e modos.

presentam praticamente apenas nitrato ($N-NO_3$). Os maiores teores de $N-NO_2$ ocorreram na 3ª semana, provavelmente porque as nitrobactérias, que oxidam o NO_2^- a NO_3^- , só foram estimuladas quando uma certa porção do substrato acumulou-se no meio. Teores mais altos de nitrito eram esperados neste experimento, uma vez que a amônia, associada a elevados valores de pH, exerce acentuado efeito inibidor sobre as nitrobactérias do solo (BROADBENT e STEVENSON, 1966); entretanto, é provável que tal fato não tenha ocorrido devido à amônia livre ter sido eliminada das amostras antes da incubação, aliviando as condições que seriam adversas à atividade daquelas bactérias.

Houve elevada correlação entre as quantidades de $N-NO_2$ observadas na 3ª semana e o teor de $N-NH_4$ na 3ª semana ($r = 0,71$, significativo a 1%), o pH inicial ($r = 0,71$, significativo a 1%) e o pH na 3ª semana ($r = 0,78$, significativo a 1%). Essas correlações mostram que o nitrito apresentou tendência para se acumular sob valores mais elevados de pH e de concentração de NH_3 no solo.

5. CONCLUSÕES

5.1. VOLATILIZAÇÃO DE AMÔNIA

a) As maiores perdas de amônia por volatilização ocorreram durante os primeiros dias da adição da uréia ao solo, havendo um atraso nas perdas quando o fertilizante foi aplicado mais profundamente; a distribuição das perdas de amônia no período de volatilização não foi influenciada pela dose de uréia.

b) As perdas de amônia concentraram-se nos primeiros dias da adição de uréia quando esta foi aplicada à superfície ou a 0-2 cm, mas distribuíram-se mais uniformemente quando a aplicação foi a 0-5 cm ou a 5 cm da superfície.

c) O período de máxima volatilização de amônia coincidiu com o de maior perda de água do solo quando a uréia foi incorporada a 0-5 cm ou aplicada a 5 cm de profundidade.

d) As perdas absolutas de amônia foram aproximadamente proporcionais às doses de uréia (120, 180 e 240 kg/ha de N), quando o adubo foi aplicado a 5 cm da superfície o aumento da dose causou aumentos maiores na quantidade volatilizada.

e) As perdas porcentuais de amônia sofreram pouca ou nenhuma influência da dose de uréia aplicada. Os maiores efeitos de doses ocorreram quando o adubo foi aplicado mais profundamente no solo, tendo as perdas sido menores para as doses mais baixas.

f) A aplicação da uréia à superfície resultou perdas de 83 a 91%; a incorporação do adubo à camada 0-2 cm não diminuiu essas perdas ou diminuiu-as no máximo em 15%, enquanto que a incorporação a 0-5 cm diminuiu a volatilização em até 64% e a localização a 5 cm de profundidade em até 100%.

g) O efeito da incorporação ou enterrio da uréia sobre a volatilização foi maior para as doses mais baixas, e mais evidente no solo Podzólico Vermelho Amarelo que no Latos solo Vermelho Amarelo, talvez devido à maior CTC do primeiro.

5.2. DISTRIBUIÇÃO DE AMÔNIA NO SOLO

a) A amônia proveniente da uréia aplicada à superfície tendeu a concentrar-se na camada superficial de 0 - 1 cm, mas uma significativa porção da mesma difundiu-se até a profundidade de 7 cm.

b) A amônia proveniente da uréia aplicada a 5 cm de profundidade tendeu a concentrar-se em torno da região de aplicação, mas uma parte da mesma atingiu a camada superficial de 0-1 cm.

c) Houve alcalinização do solo em torno dos locais onde a uréia foi aplicada, tendo o pH se elevado de 6,9 para até 8,7. Esse efeito alcalinizante diminuiu com a distância do local de aplicação, da mesma forma que a concentração de amônia; houve elevada correlação entre os teores de $N-NH_4$ e o pH das camadas de solo estudadas.

5.3. NITRIFICAÇÃO DA AMÔNIA NO SOLO

A maior parte (61 a 92%) da amônia contida na região de aplicação da uréia foi nitrificada em nove semanas, independentemente da dose ou do modo de aplicação.

b) Não houve acúmulo de nitrito no solo situado na região de aplicação da uréia, mesmo quando a maior dose foi empregada.

c) Apesar do efeito alcalinizante inicial da amônia, com a nitrificação o pH do solo no local da aplicação decresceu a valores inferiores ao do solo original.

6. LITERATURA CITADA

ANJOS, J.T. e M.J. TEDESCO, 1973. Perdas de nitrogênio, por volatilização de amônia, proveniente da uréia aplicada em solos cultivados. In: Anais do XIV Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Santa Maria, p.232-241.

ANJOS, J.T. e M.J. TEDESCO, 1976. Volatilização de amônia proveniente de dois fertilizantes nitrogenados aplicados em solos cultivados. Científica. Jaboticabal, 4(1): 49-55.

BINGHAM, F.T.; H.D. CHAPMAN; A.L. PUGH, 1954. Solution - culture studies of nitrite toxicity to plants. Soil Sci. Am. Proc., Madison, 18: 305-308.

BREMNER, J.M., 1965. Inorganic forms of nitrogen. In: BLACK, C.A., ed. Methods of soil analysis. Part 2. Chemical and microbiological properties. Madison, Am. Soc. of Agron. Agronomy 9: 1191-1206.

BREMNER, J.M. e L.A. DOUGLAS, 1971. Decomposition of urea phosphate in soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc. Madison, 35: 575-578.

BROADBENT, F.E. e F.J. STEVENSON, 1966. Organic mater interactions. In: McVICKAR, M.H.; W.P. MARTIN; I.E. MILES; H.H. TUCKER, eds. Agricultural Anhydrous Ammonia Technology and Use. Madison, Am. Soc. of Agron., p.169-187.

BROADBENT, F.E.; G.N. HILL; K.B. TYLER, 1958. Transformations and movement of urea in soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc. Madison, 22: 303-307.

BROADBENT, F.E.; K.B. TYLER; G.N. HILL, 1957. Nitrification of ammoniacal fertilizers in some California soils. Hilgardia. Berkeley, 27: 247-267.

CHIN, W.T. e W. KROONTJE, 1963. Urea hydrolysis and subsequent loss of ammonia. Soil Sci. Soc. Am. Proc. Madison, 27: 316-318.

- CONNELL, J.H.; R.D. MEYER; J.L. MEYER; R.M. CARLSON, 1979.
Gaseous ammonia losses following nitrogen fertilization.
California Agriculture. Berkeley, 33(1): 11-12.
- ENO, C.F. e W.G. BLUE, 1954. The effect of anhydrous ammonia
on nitrification and the microbiological population in
sandy soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc., Madison, 18: 178-
-181.
- ENO, C.F. e W.G. BLUE, 1957. The comparative rate of nitrification
on anhydrous ammonia, urea, and ammonium sulphate in sandy
soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc. Madison, 21: 392-396.
- ENO, C.F.; W.G. BLUE; J.M. GCOD Jr., 1955. The effects of
anhydrous ammonia on nematodes, fungi, bacteria, and
nitrification in some Florida soils. Soil Sci. Soc. Am.
Proc. Madison, 19: 55-58.
- ERNST, J.W. e H.F. MASSEY, 1960. The effects of several
factors on volatilization of ammonia formed from urea in
the soil. Soil Sci. Soc. Am. Proc. Madison, 24: 87-90.
- FENN, L.B. e D.E. KISSEL, 1973. Ammonia volatilization from
surface applications of ammonium compounds on calcareous
soils: I. General Theory. Soil Sci. Soc. Am. Proc.
Madison, 37: 855-859.

FENN, L.B. e D.E. KISSEL, 1976. The influence of cation exchange capacity and depth of incorporation on ammonia volatilization from ammonium compounds applied to calcareous soils. Soils Sci. Soc. Am. J. Madison, 40: 394-398.

FENN, L.B. e S. MIYAMOTO, 1979. Ammonia loss and associated reactions of urea in calcareous soils. Soil Sci. Soc. Am. J. Madison, 45: 537-540.

GASSER, J.K.R., 1964. Some factors affecting losses of ammonia from urea and ammonium sulphate applied to soils. J. Soil Sci. Oxford, 15: 258-272.

GASSER, J.K.R. e G.J.S. ROSS, 1975. The distribution in the soil of aqueous ammonia injected under grass. J. Sci. Fd. Agric. London, 26: 719-729.

HARGROVE, W.L. e D.E. KISSEL, 1979. Ammonia volatilization from surface applications of urea in the field and laboratory. Soil Sci. Soc. Am. J. Madison, 43: 359-363.

HARGROVE, W.L.; D.E. KISSEL; L.B. FENN, 1977. Field measurements of ammonia volatilization from surface applications of ammonium salts to a calcareous soil.- Agron. J. Madison, 69: 473-476.

JOHNSON, C.M. e A. ULRICH, 1959. II. Analytical methods for use in plant analysis. Agr. Exp. Sta. Bull. California, 766: 26-78.

KEENEY, D.R. e J.M. BREMNER, 1966. Characterization of mineralizable nitrogen in soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc. Madison, 30: 714-719.

KEENEY, D.R. e J.M. BREMNER, 1967. Determination and isotope-ratio analysis of different forms of nitrogen in soils: 6. Mineralizable nitrogen. Soil Sci. Soc. Am. Proc. Madison, 31: 34-38.

KENGRE, S.T. e N.K. SAVANT, 1977. Distribution pattern of inorganic nitrogen following anhydrous ammonia injection into a vertisol. Soil Sci. Soc. Am. J. Madison, 41: 1139-1141.

KIEHL; J.C. e A. COBRA NETTO, 1972. Retenção e nitrificação da amônia anidra no solo da Série Lajeado. Revista da Agricultura. Piracicaba, 47: 35-42.

KIEHL, J.C. e A. COBRA NETTO, 1974. Efeito tóxico da amônia na nitrificação. O Solo. Piracicaba, 66: 7-13.

- KIEHL, J.C. e J.V.C. ROCHA FILHO, 1972. Adubação do trigo com amônia anidra. Revista da Agricultura. Piracicaba, 47: 75-80.
- KISSEL, D.E.; H.L. BREWER; G.F. ARKIN, 1977. Design and test of a field sampler for ammonia volatilization. Soil Sci. Soc. Am. J. Madison, 41: 1133-1138.
- MARTIN, J.P. e H.D. CHAPMAN, 1951. Volatilization of ammonia from surface fertilized soils. Soil Sci. New Brunswick, 71: 25-34.
- MATOCHA, J.E., 1976. Ammonia volatilization and nitrogen utilization from sulphur-coated ureas and conventional nitrogen fertilizers. Soil Sci. Soc. Am. J. Madison, 40: 597-601.
- McINTOSH, T.H. e L.R. FREDERICK, 1958. Distribution and nitrification of anhydrous ammonia in a Nicollet sandy clay loam. Soil Sci. Soc. Am. Proc. Madison, 22: 402-405.
- MORE, S.D. e S.B. VARADE, 1978. Volatilization losses of ammonia from different nitrogen carriers as affected by soil-moisture, organic matter, and method of fertilizer application. J. Indian Soc. Soil Sci. Parbhani, 26: 112-115.

MORTLAND, M.M., 1958. Reactions of ammonia in soils. Advances in Agron. New York, 10: 325-348.

NÖMMIK, H., 1966. Use of micro-plot technique for studying gaseous loss of ammonia from added nitrogen materials under field conditions. Acta Agr. Scand. Stockholm, 16: 147-154.

NÖMMIK, H., 1973. Assessment of volatilization loss of ammonia from surface-applied urea on forest soil by N^{15} recovery. Plant and Soil. Stockholm, 38: 589-603.

NÖMMIK, H. e K.O. NILSSON, 1963. Nitrification and movement of anhydrous ammonia in soil. Acta Agr. Scand. Stockholm, 13: 205-219.

OVERREIN, L.N. e P.G. MOE, 1967. Factors affecting urea hydrolysis and ammonia volatilization in soil. Soil Sci. Soc. Am. Proc. Madison, 31: 57-61.

PAPENDICK, R.I. e J.F. PARR, 1966. Retention of anhydrous ammonia by soil: III. Dispensing apparatus and resulting ammonia distribution. Soil Sci. New Brunswick, 102: 193-201.

PARR, J.F. e R.I. PAPENDICK, 1966. Retention of anhydrous ammonia by soil: II. Effect of ammonia concentration and soil moisture. Soil Sci. New Brunswick, 101: 109-119.

PRASAD, M., 1976. Gaseous loss of ammonia from sulphur-coated urea, ammonium sulphate, and urea applied to calcareous soil (pH 7.3). Soil Sci. Soc. Am. J. Madison, 40: 130-134.

RAISON, R.J. e J.W. MCGARITY, 1978. Effect of plant ash on nitrogen fertilizer transformations ammonia volatilization. Soil Sci. Soc. Am. J. Madison, 42: 140-143.

ROBERTSON, L.S. e C.M. HANSEN, 1959. Losses of ammonia from surface and shallow applications of a low pressure fertilizer nitrogen solution. M.S.U. Quaterly Bulletin. Michigan, 42(1): 47-51.

SAVANT, N.K. e S.K. DeDATTA, 1980. Movement and distribution of ammonium-N following deep placement of urea in a wetland rice soil. Soil Sci. Soc. Am. J. Madison, 44: 559-565.

- SAVANT, N.K.; S.K. DeDATTA; E.T. CRASWELL, 1982. Distribution patterns of ammonium nitrogen and N^{15} uptake by rice after deep placement of urea supergranules in wetland soil. Soil Sci. Soc. Am. J. Madison, 46: 567-572.
- SMILEY, R.W. e R.I. PAPENDICK, 1968. A portable injector for dispensing liquid anhydrous NH_3 in the field. Soil Sci. Soc. Am. Proc. Madison, 32: 729-731.
- SOHN, J.B. e M. PEECH, 1958. Retention and fixation of ammonia by soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc. Madison, 32: 729-731.
- STANLEY, F.A. e G.E. SMITH, 1956. Effect of soil moisture and depth of application on retention of anhydrous ammonia. Soil Sci. Soc. Am. Proc. Madison, 20: 557-561.
- TERMAN, G.L. e C.M. HUNT, 1964. Volatilization losses of nitrogen from surface-applied fertilizers, as measured by crop response. Soil Sci. Soc. Am. Proc. Madison, 28: 667-672.
- TERMAN, G.L.; J.F. PARR; S.E. ALLEN, 1968. Recovery of nitrogen by corn from solid fertilizers and solutions. J. Agric. Food. Chem. Washington, 16: 685-690.

VLEK, P.L.G. e E.T. CRASWELL, 1979. Effect of nitrogen source and management on ammonia volatilization losses from flooded rice-soil systems. Soil Sci. Soc. Am. J. Madison, 43: 352-358.

VOLK, G.M., 1959. Volatile loss of ammonia following surface application of urea to turf or bare soils. Agron. J. Madison, 51: 746-749.

VOLK, G.M., 1961. Gaseous loss of ammonia from surface-applied nitrogenous fertilizers. J. Agric. Food Chem. Washington, 9: 280-283.

VOLK, G.M., 1970. Gaseous loss of ammonia from prilled urea applied to slash pine. Soil Sci. Soc. Am. Proc. Madison, 34: 513-516.

WAHHAB, A.; M. KHAN; M. ISHAQ, 1960. Nitrification of urea and its loss through volatilization of ammonia under different soil conditions. J. Agric. Sci. Cambridge, 55: 47-51.

- WAHHAB, A.; M.S. RANDHAWA; S.Q. ALAM, 1957. Losses of ammonia from ammonium sulphate under different conditions when applied to soils. Soil Sci. New Brunswick, 84: 249-255.
- WARREN, K.S., 1962. Ammonia toxicity and pH. Nature. London, 195: 47-49.
- WATKINS, S.H.; R.F. STRAND; D.S. DEBELL; J. ESCH Jr., 1972. Factors influencing ammonia losses from urea applied to northwestern forest soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc. Madison, 36: 354-357.
- YOUNG, J.L., 1964. Ammonia and ammonium reactions with some Pacific Northwest soils. Soil Sci. Soc. Am. Proc. Madison, 28: 339-345.
- YOUNG, J.L. e B.L. McNEAL, 1964. Ammonia and ammonium reactions with some layer-silicate minerals. Soil Sci. Soc. Am. Proc. Madison, 28: 334-339.