

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO OESTE DO PARANÁ – UNIOESTE
CAMPUS DE MARECHAL CÂNDIDO RONDON
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
NÍVEL MESTRADO

ÂNGELA LEMOS PRESTES MARCONDES

**VOLATILIZAÇÃO DE AMÔNIA DE ADUBOS NITROGENADOS
APLICADOS EM SUPERFÍCIE NA CULTURA DO MILHO EM
AMBIENTES DISTINTOS**

MARECHAL CÂNDIDO RONDON
MARÇO/2007

ÂNGELA LEMOS PRESTES MARCONDES

**VOLATILIZAÇÃO DE AMÔNIA DE ADUBOS NITROGENADOS
APLICADOS EM SUPERFÍCIE NA CULTURA DO MILHO EM
AMBIENTES DISTINTOS**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Oeste do Paraná, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Nível Mestrado, para obtenção do título de Mestre.

ORIENTADORA: PROF.^a DR.^a MARIA DO CARMO LANA

MARECHAL CÂNDIDO RONDON
MARÇO/2007

Pai, Mãe, Mano, Cris e Júnior

Dedico

“Omnia Vincit Amor”

AGRADECIMENTOS

Agradeço a Deus, agora e todos os dias, por tudo que tenho e pelo que sou, pela oportunidade de viver e realizar esse sonho.

Agradeço aos meus pais, Francisco e Salete, por todo amor, pelos ensinamentos e incentivo, por acreditarem em mim e por proporcionar todos os meios para que eu chegasse até aqui.

Agradeço a toda minha família, em especial aos meus queridos irmãos Arion e Cristiane, minha base e meu exemplo.

Agradeço ao meu amado marido Júnior, um presente de Deus na minha vida, por todo amor, pela ajuda em todos os momentos, por me incentivar sempre e principalmente, pela compreensão nas horas ausentes suprimidas pelo curso.

Agradeço a professora e orientadora Maria do Carmo Lana, pelo apoio, orientação e compreensão, imprescindíveis a realização deste trabalho.

Agradeço a todos os professores, pela amizade e pelos ensinamentos e a Universidade Estadual do Oeste do Paraná (UNIOESTE), pelo ensino de qualidade, em especial ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Campus de Marechal Cândido Rondon, pela oportunidade de realização deste curso.

Agradeço a CAPES - Coordenadoria de Aperfeiçoamento de Pessoal de Ensino Superior, pela concessão de bolsa de auxílio aos estudos, fundamental.

Agradeço as empresas e a instituição por todo material fornecido, em especial a Fertipar Fertilizantes.

Agradeço a todos os amigos, colegas de curso, alunos de graduação e funcionários, em especial a Karine Zachow, Jucenei Frandoloso, Silvano Fontaniva e Rodrigo Czycza, pelo auxílio indispensável na execução deste trabalho e a Noili, pela ajuda sempre.

Enfim, a todos que contribuíram para o desenvolvimento deste trabalho.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	8
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	10
2.1 Nitrogênio	10
2.1.1 Funções na planta e Sintomas de Deficiência	12
2.1.2 Adubos e Adubação Nitrogenada	12
2.1.3 Perdas de N por volatilização.....	18
2.2 Métodos para estimar perdas por volatilização de amônia no solo	24
3 MATERIAL E MÉTODOS	26
3.1 Caracterização das amostras de solo	26
3.2 Determinação do teor de água na Capacidade de Campo	27
3.3 Experimento em laboratório	27
3.4 Experimento em casa de vegetação	29
3.5 Experimento conduzido em campo	32
4 RESULTADOS E DISCUSSÃO	38
4.1 Experimento em laboratório	38
4.2 Experimento em casa de vegetação	40
4.3 Experimento conduzido no campo	48
5 CONCLUSÕES	57
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58

VOLATILIZAÇÃO DE AMÔNIA DE ADUBOS NITROGENADOS SOB DIVERSAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS NA CULTURA DO MILHO

Foram desenvolvidos experimentos em laboratório e em casa de vegetação com dois solos, um de textura arenosa (PVAd) e outro argiloso (NVdf), além de um estudo a campo, tendo por objetivo avaliar a eficácia agrônômica da adubação nitrogenada, avaliando perdas de N por volatilização de diferentes adubos nitrogenados: uréia; uréia + óleo; uréia + inibidor de urease; uréia + sulfato de amônio e sulfato de amônio, aplicados em cobertura e superficialmente, na cultura do milho. No estudo em laboratório, a determinação do N volatilizado foi realizada com o uso de frascos cilíndricos hermeticamente fechados com uso de coletores em dois períodos de avaliações, (3 e 7 dias), dois solos (arenoso e argiloso) e cinco fontes de nitrogênio. No estudo em casa de vegetação, foram utilizados dois solos (arenoso e argiloso), seis períodos de avaliações (1, 2, 3, 4, 7 e 8 dias) e cinco fontes de nitrogênio. Avaliou-se altura de planta, diâmetro do colmo, produção de biomassa seca e teor de N total. No estudo a campo, foram avaliadas as seguintes fontes de N em cobertura: uréia, uréia embebida em óleo, uréia com inibidor de urease e misturas de 100 kg de N como uréia com doses crescentes de sulfato de amônio (0, 10, 20, 30 e 40 kg ha⁻¹ de N). A quantidade de N-NH₃ volatilizada foi medida por meio de coletores de amônia instalados nas duas linhas centrais de cada parcela no 3º e 7º dia após adubação. Determinou-se N total no tecido foliar e nos grãos, massa de 1000 grãos e produtividade. No estudo em laboratório e em casa de vegetação, verificou-se que a textura do solo, bem como sua CTC e quantidade de matéria orgânica, influenciaram as perdas por volatilização de N-NH₃, sendo maiores no solo arenoso (PVAd) do que no solo argiloso (NVdf) e com aplicação de uréia em ambos os locais, enquanto que a embebição da uréia em óleo não implicou em redução da perda de N-NH₃. A mistura uréia (100 kg ha⁻¹ de N) + sulfato de amônio (40 kg ha⁻¹ de N) contribuiu para redução das perdas de N-NH₃, em média, de 8% na avaliação conduzida em laboratório e em 5% no experimento em casa de vegetação em comparação com a uréia na média dos solos. A adubação de uréia com inibidor de urease apresentou menores perdas e proporcionou um melhor aproveitamento do N. No estudo a campo, a volatilização de amônia ocorreu até o 7º dia após aplicação dos tratamentos, sendo as perdas totais da fonte uréia de 13% e de 4% na uréia com inibidor de urease. A dose de sulfato de amônio em mistura com uréia que implicou em menor perda de N-NH₃ foi de 9 kg ha⁻¹ de N. Devida à baixa disponibilidade de chuva, não houve diferença significativa dos adubos nitrogenados na produtividade de milho, mas a adubação de uréia com inibidor de urease proporcionou um incremento de 377 kg a mais em comparação a uréia.

Termos para indexação: fontes nitrogenadas, perdas de N-NH₃, *Zea mays* L, inibidor de urease, uréia.

VOLATILIZAÇÃO DE AMÔNIA DE ADUBOS NITROGENADOS SOB DIVERSAS CONDIÇÕES AMBIENTAIS NA CULTURA DO MILHO

Experiments in laboratory and house of vegetation with two ground, one of arenaceous texture (PVAd) and another argillaceous one had been developed (NVdf), beyond a study the field, having for objective to evaluate the agronomic effectiveness of the nitrogen fertilization, evaluating losses of N for volatilization of different nitrogen seasonings: urea; urea + oil; urea + inhibiting of urease; urea + sulphate of ammonium and ammonium sulphate, applied in covering and superficially, the culture of the maize. In the study in laboratory, the determination of the volatilized N was carried through hermetically closed cylindrical bottles with use of collectors in two periods of evaluations, (3 and 7 days), two ground (arenaceous and argillaceous) and five nitrogen sources. In the study in vegetation house, two ground (arenaceous and argillaceous), six periods of evaluations (1, 2, 3, 4, 7 and 8 days) and five nitrogen sources had been used. One evaluated height of plant, diameter of colm, production of dry biomass and text of total N. In the study the field, had been evaluated the following sources of N in covering: urea, urea absorbed in oil, urea with inhibitor of urease and mixtures of 100 kg of N as urea with increasing doses of ammonium sulphate (0, 10, 20, 30 and 40 kg ha⁻¹ of N). The volatilized amount of N-NH₃ was measured by means of ammonia collectors installed in the two lines central offices of each parcel in 3^o and 7^o day after fertilization. Total N in the fabric foliar and the grains, mass of 1000 grains and productivity was determined. In the study in laboratory and house of vegetation, the texture of the ground was verified that, as well as its CTC and amount of organic substance, had influenced the losses for volatilization of N-NH₃, being bigger in the ground arenaceous (PVAd) of that in the ground argillaceous (NVdf) and with urea application in both the places, while that the imbibitions of the urea in oil did not imply in reduction of the loss of N-NH₃. The mixture urea (100 kg ha⁻¹ of N) + ammonium sulphate (40 kg ha⁻¹ of N) contributed for reduction of the losses of N-NH₃, in average, of 8% in the evaluation lead in laboratory and 5% in the experiment in house of vegetation in comparison with the urea in the average of ground. The urea fertilization with inhibitor of urease presented minors losses and provided to one better exploitation of the N. In the study the field, the volatilization of ammonia occurred until 7^o day after application of the treatments, being the total losses of the source urea of 13% and 4% in the urea with inhibitor of urease. The dose of ammonium sulphate in mixture with urea that implied in lesser loss of N-NH₃ was of 9 kg ha⁻¹ of N. Divide to low the rain availability, did not have significant difference of seasonings nitrogen in the maize productivity, but the urea fertilization with inhibitor of urease more provided to an increment of 377 kg in comparison the urea.

Index terms: nitrogen sources, losses N-NH₃, *Zea mays* L, inhibitor of urease, urea.

1 INTRODUÇÃO

O agronegócio é o setor mais importante da economia brasileira, sendo responsável por 33,5% do PIB brasileiro, 42% das exportações e 24% dos empregos gerados no Brasil em 2004 (COOPAVEL, 2006).

O milho (*Zea mays* L.) é um dos mais importantes cereais cultivados e consumidos em todo o mundo, seja na alimentação humana ou animal. Constitui-se num dos principais insumos para o segmento produtivo (EMBRAPA, 1997).

A cultura da soja e do milho na safra 2003/04 representou 77% da produção de grãos no Brasil. Quando avaliado o custo de produção do milho para a safra 2004/2005, observou-se que a adubação foi o item que mais se destacou representando 34,8% do custo total de produção do milho. Somente a adubação de cobertura representou 15,1% do custo total e 44% do custo total da adubação (COOPAVEL, 2006).

A produtividade média brasileira de milho corresponde a 2850 kg ha⁻¹, muito abaixo dos 8500 kg ha⁻¹, que representam a média de produtividade dos Estados Unidos (SOARES, 2003).

No Brasil, nos últimos anos, a cultura do milho vem passando por importantes mudanças tecnológicas, resultando em aumentos significativos da produtividade e produção. Entre essas tecnologias, destaca-se a necessidade da melhoria na qualidade dos solos, visando uma produção sustentada. Essa melhoria na qualidade dos solos está geralmente relacionada ao manejo adequado, o qual inclui, entre outras práticas, a rotação de culturas, o plantio direto e o manejo da fertilidade, com o uso de calagem, gessagem e adubação equilibrada com macro e micronutrientes, utilizando fertilizantes químicos e/ou orgânicos (estercos, compostos, adubação verde) (COELHO et al., 2006).

Inúmeros estudos têm demonstrado a eficiência agronômica equivalente de adubos nitrogenados solúveis (CANTARELLA e RAIJ, 1985). Entretanto, em termos práticos, o critério de escolha do fertilizante pelo produtor é baseado no custo da

unidade de nitrogênio. Nesse sentido, a uréia constitui-se uma das fontes mais vantajosas.

A uréia vem sendo empregada há muito tempo no Brasil como fonte de nitrogênio para as culturas, mas somente nas últimas décadas, com a instalação de novos pólos petroquímicos, esse material passou a ser produzido intensamente, tornando-se o mais importante adubo nitrogenado no país (RODRIGUES e KIEHL, 1986).

Por outro lado, Sengik e Kiehl (1995) alertam para as perdas por volatilização de amônia da uréia como um dos processos que podem comprometer sua eficiência e sua vantagem econômica. Além disso, esse fenômeno tem sido considerado um dos principais motivos pelos quais a eficiência da uréia em fornecer nitrogênio às culturas mostra-se, em certas ocasiões, abaixo da esperada.

No Brasil, estudos de laboratório têm justificado essa preocupação, mesmo porque estudos a campo são ainda escassos e contraditórios e a quantificação dessas perdas em condições de campo é fundamental para concluir sobre a conveniência de continuar com essa prática ou optar por um manejo alternativo (ANJOS e TEDESCO, 1976; CANTARELLA e RAIJ, 1985; COELHO et al., 1992). Estimativas de perdas por volatilização da amônia proveniente de fertilizantes nitrogenados aplicados ao solo têm sido efetuadas por sistemas coletores que apresentam, como limitação, a impossibilidade de obter resultados que traduzam a ocorrência do processo em condições naturais (LARA CABEZAS e TRIVELIN, 1990).

A controvérsia pode ser justificada porque, em condições controladas de laboratório, objetiva-se o estudo do potencial de perdas sob a influência de fatores do solo, como pH, poder tampão, CTC e atividade da urease e, em condições de campo (não controladas), as perdas são uma consequência de fatores ambientais, como temperatura, conteúdo de água no solo e trocas gasosas.

Neste contexto, este trabalho teve por objetivo determinar em dois solos distintos a eficácia agronômica da adubação nitrogenada, avaliando perdas de N por volatilização de diferentes adubos nitrogenados, aplicados em cobertura e superficialmente na cultura do milho e em diferentes condições ambientais (laboratório, casa de vegetação e campo).

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Nitrogênio

É amplamente reconhecido o destacado papel do nitrogênio dentre os nutrientes essenciais ao crescimento das plantas, principalmente no que diz respeito ao incremento de produção. Além disso, todos os processos vitais estão associados à presença do nitrogênio, que participa de inúmeros compostos de importância fisiológica no metabolismo das plantas e dos animais (MEIRELES et al., 1980).

Segundo o mesmo autor, a importância do nitrogênio se sobressai principalmente nos solos situados em região de clima tropical úmido, no qual há grande mobilidade do N e alta mineralização da matéria orgânica, além do elevado custo dos fertilizantes nitrogenados. Sendo assim, o uso de fertilizantes nitrogenados tornou-se limitado, exigindo um conhecimento mais profundo dos processos e interações que ocorrem no sistema água-solo-planta visando seu máximo aproveitamento pela cultura. Pesquisas relativas ao movimento, disponibilidade, absorção e perdas do nitrogênio aplicado ao solo, muitas vezes são prejudicadas pelas dificuldades de distinguir o nitrogênio aplicado do existente no solo.

Cerca de 98% do nitrogênio encontra-se como constituinte de compostos da fração orgânica no solo (COELHO et al., 1992). Com a acumulação de resíduos na superfície e conseqüente aumento na atividade biológica, as reações de mineralização do material orgânico e as transformações de N-amoniaco a N-nítrico são intensas. Dois pontos básicos devem ser considerados na redistribuição no solo e aproveitamento do nitrogênio pelas plantas: a) a relação C/N influenciando a taxa de mineralização, a imobilização pelos microrganismos no solo e a relação oferta/demanda pelas culturas; b) o movimento do íon nitrato (SÁ, 1993). A discussão sobre a dinâmica do nitrogênio é complexa e muitas vezes apresenta particularidades aos resultados encontrados. Desse modo, é importante considerar as interações que existem em cada agroecossistema.

Devido à multiplicidade de reações químicas e biológicas, à dependência das condições ambientais e ao papel que desempenha no rendimento das culturas, o nitrogênio é o elemento que apresenta maiores dificuldades de manejo na produção agrícola, mesmo em propriedades tecnicamente orientadas (CAMPOS e TEDESCO, 1979).

Quando se aplica fertilizante nitrogenado a um solo, o nitrogênio pode seguir quatro caminhos diferentes: a) ser perdido por volatilização de amônia, erosão, escoamento superficial, etc.; b) permanecer no solo até o final do cultivo; c) ser extraído pela cultura e d) ser lixiviado para água subterrânea, constituindo-se num poluente. O conhecimento da contribuição de cada um desses caminhos ou componentes do nitrogênio fertilizante aplicado é de grande importância tanto para o agrônomo quanto para o ecologista, visto que o primeiro visa a maximização da produção de uma cultura, enquanto o segundo a minimização da poluição nitrogenada das águas de superfície e subterrâneas (LIBARDI e REICHARDT, 1978).

O nitrogênio é um nutriente que limita a produtividade agrícola, todavia a relação custo/benefício, que é interesse do agricultor, pode limitar seu uso. Portanto, pode também provocar prejuízos ao ambiente pelo elevado custo energético de produção das fontes nitrogenadas (VITTI et al., 1999). Estimativas realizadas indicam que os fertilizantes nitrogenados são responsáveis por 80% dos custos com fertilizantes e 30% de toda energia empregada na produção agrícola (STANGEL, 1984).

O nitrogênio é freqüentemente o principal fator limitante do crescimento em muitas culturas: as plantas utilizam menos de 50% do fertilizante nitrogenado aplicado, devido a perdas por lixiviação e desnitrificação (SAVANT e DEDATTA, 1982). O fertilizante amoniacal deveria aumentar a eficiência do uso do nitrogênio, visto que o amônio não é prontamente lixiviado ou volatilizado. Hoje, inibidores de nitrificação já estão sendo utilizados para inibir a conversão de NH_4^+ a nitrato e, conseqüentemente, aumentar a eficiência de utilização, quando a perda de nitrogênio é alta. Por outro lado, íons NH_4^+ , quando são a única fonte de nitrogênio, em altas doses são tóxicos para muitas plantas, ainda que estas, em crescimento, somente assimilem N nessa forma completamente reduzida.

2.1.1 Funções na planta e Sintomas de Deficiência

Dos três elementos geralmente incluídos nos fertilizantes comerciais, o nitrogênio é o que parece exercer efeitos mais rápidos e mais pronunciados. Sua principal função é estimular o crescimento vegetativo e transmitir as folhas cor verde-escura. Nos cereais, aumenta o tamanho dos grãos e sua percentagem de proteína. Funciona como regulador de todos os vegetais, pois controla em grau considerável a utilização do K, do P e outros nutrientes (BUCKMAN e BRADY, 1968).

O N é parte integrante de todos os aminoácidos, que são blocos fundamentais na constituição das proteínas. Faz parte também da molécula de clorofila, das aminas, amidas, enzimas, alcalóides, ácidos nucléicos, hormônios, etc. (GIANELLO et al., 1995).

As formas preferenciais de absorção de N pelas plantas são o amônio (NH_4^+) e o nitrato (NO_3^-). Compostos nitrogenados simples, como uréia e alguns aminoácidos, também podem ser absorvidos. Em condições de boa drenagem no solo predomina a forma de nitrato, devido à reação de nitrificação que ocorre com a participação de microrganismos. Nos solos alagados predomina o amônio, não ocorrendo a nitrificação e sim a desnitrificação.

Segundo Gianello et al. (1995), devido a sua condição de constituinte das proteínas, a deficiência de N afeta todos os processos vitais na planta: a capacidade fotossintética diminui, o crescimento é retardado e a reprodução é prejudicada. A deficiência de N é visualmente detectada por clorose (amarelecimento) geral da planta em função da diminuição da quantidade de clorofila e pouco desenvolvimento, devido à baixa formação de proteínas e outros compostos.

2.1.2 Adubos e Adubação Nitrogenada

A energia despendida para produção de 50 kg de fertilizante nitrogenado é equivalente àquela proporcionada por cerca de 80 litros de gasolina, quantidade essa superada pela fixação biológica pela soja, segundo estimativa de pesquisadores norte-americanos (MASCARENHAS et al., 2003).

A eficiência dos diferentes modos de aplicação de adubos para cada solo (a lanço, em faixa, em linha ou em cobertura) e para cada cultivo (adubação de

cobertura), depende da solubilidade dos adubos utilizados e da mobilidade dos nutrientes no solo. Os adubos nitrogenados manufaturados são produzidos a partir da fixação do N do ar por processos industriais. Como todos os adubos minerais nitrogenados são muito solúveis, a permanência do N solo à disposição das culturas depende da quantidade de chuva e da capacidade do solo em reter água. Para diminuir as perdas de fertilizante por volatilização, lixiviação ou desnitrificação, que vão ocorrer em condições de ambiente redutor, a adubação nitrogenada deve ser feita em cobertura e na época em que a planta começa a absorver intensamente os nutrientes (GIANELLO et al., 1995).

As perdas também são reduzidas, quando fontes nitrogenadas com formas de N menos susceptíveis à volatilização são usadas. Fontes de nitrogênio, como nitrato de amônio, nitrato de cálcio e sulfato de amônio, não estão sujeitas às perdas por volatilização de N-NH_3 em solos ácidos (CANTARELLA, 1998).

Depois de aplicado ao solo, o nitrogênio, se utilizado na forma amoniacal, é convertido à forma nítrica em cerca de três semanas (GIANELLO et al., 1995). Dependendo de características de solo e clima, podem ocorrer perdas pelo processo de lixiviação. Uma das práticas bastante utilizadas para minimizar este problema é parcelar a adubação nitrogenada, sendo parte colocada no plantio (1/5 a 1/3 da dose total de nitrogênio a aplicar) e o restante em cobertura. A época e o parcelamento da adubação de cobertura é função do tipo de solo, da dose de nitrogênio e da cultura ser irrigada com sistema que possibilite aplicar o nitrogênio via água de irrigação. Ensaio conduzido por Lara Cabezas (1998), com a cultura do milho em SPD, indicou que, para doses de até 100 kg ha^{-1} de nitrogênio, a adubação de cobertura pode ser feita em uma única época ou todo o nitrogênio ser aplicado no plantio.

De acordo com Meireles et al. (1980), a fertilização nitrogenada deve ser parcelada: 1/3 da dose no plantio, pelo fato de nos primeiros estádios de desenvolvimento da cultura a utilização do fertilizante ser alta, porém com baixa eficiência; e os 2/3 restantes dos 30 aos 45 dias após a germinação, período de maior necessidade de N pela planta e de maior eficiência de utilização do fertilizante nitrogenado. Após 45 dias não se deve fazer adubação nitrogenada pois apesar de haver aumento no teor de nitrogênio total da planta, a contribuição do nitrogênio do fertilizante cai sensivelmente, havendo maior absorção de nitrogênio do solo.

Fernandes et al. (1999), avaliaram o efeito do parcelamento da dose de 120 kg ha^{-1} de nitrogênio em SPD e observaram produtividades semelhantes da cultura

do milho com aplicações de 10 a 80 kg ha⁻¹ de nitrogênio no sulco de semeadura e de 40 a 110 kg ha⁻¹ de nitrogênio em cobertura. Com aplicação de 120 kg ha⁻¹ de nitrogênio no sulco de semeadura houve uma drástica redução no número de plantas e conseqüente perda de produtividade do milho. Em solos de textura média e arenosa, em áreas com intensidade de chuva elevada no início do ciclo, e reduzida profundidade efetiva de exploração do perfil do solo pelas raízes das plantas, é prudente que se utilize 1/3 da adubação nitrogenada no sulco de semeadura e o restante em cobertura.

Para atingir altos níveis de produtividade, a dose de nitrogênio aplicada e o momento da aplicação definem o sucesso da adubação nitrogenada. Teixeira (2004) recomenda, a grosso modo, a aplicação de 15 a 20 kg de N por tonelada de grãos que se deseja produzir. Quanto a época de aplicação, observam-se melhores resultados nas doses de 30 a 45 kg ha⁻¹ de N na semeadura e o restante em cobertura na emissão da 4^a a 6^a folha (estádio fenológico V5), que é o período onde o milho define seu rendimento potencial. Vale lembrar que as menores perdas de N se dão quando a uréia é incorporada, evitando perdas por volatilização e queima das folhas.

Segundo Rajj e Cantarella (1996), as recomendações atuais para a adubação nitrogenada em cobertura são realizadas com base em curvas de resposta, histórico da área e produtividade esperada. A recomendação da adubação nitrogenada em cobertura para a cultura do milho de sequeiro, de modo geral, varia de 40 a 80 kg de N ha⁻¹. Devido à complexa dinâmica do N aplicado ao solo (volatilização, imobilização por microorganismos e lixiviação) e à diversidade de cultivares de milho utilizados (diferentes respostas ao N aplicado e eficiências de utilização do N), é muito difícil saber se a dose recomendada será suficiente ou não para a planta expressar seu potencial produtivo.

2.1.2.1 A Uréia

A uréia, dentre os adubos nitrogenados, continua sendo o principal adubo utilizado, mesmo quando seu uso em cobertura implica em perdas consideráveis de nitrogênio por volatilização da amônia como, por exemplo, nas adubações em

cobertura de pastagens e cultivo de perenes como o de cafeeiro e de pomares (MELLO et al., 1988).

O acentuado aumento na produção de uréia no país, nos últimos anos, fez com que esse produto sintético se tornasse hoje a principal fonte de nitrogênio para a agricultura brasileira. Tem-se observado, ao mesmo tempo, o interesse crescente de pesquisadores em conhecer melhor as condições de emprego da uréia em diferentes climas e culturas; apesar disso, ainda poucos são os trabalhos realizados com esse objetivo (MELLO et al., 1988).

Embora altas perdas de nitrogênio sejam geralmente associadas com o uso da uréia, essa é a fonte de nitrogênio mais utilizada no Brasil, representando 60% da produção nacional de fertilizantes nitrogenados. Conseqüentemente, pesquisas direcionadas para a avaliação de eficiência do uso de fertilizantes nitrogenados devem envolver a uréia (COELHO et al., 1992).

Apesar de possuir a mesma eficiência de outros adubos nitrogenados, a uréia apresenta desvantagens, como a ausência de outros nutrientes e a possibilidade de ocorrência de perdas de até 96% do N aplicado, por volatilização de NH_3 , o que pode implicar problemas de ordem econômica e ambiental (CANTARELLA e TABATABAI, 1985; RODRIGUES e KIEHL, 1986; BRADY, 1989).

A uréia, com 44% de N na forma amídica, não contém NH_4^+ na forma em que é comercializada e usada. No solo, entretanto, ela pode ser hidrolizada rapidamente, na presença de enzima urease, para produzir íons amônio e bicarbonato. Uma série de fatores influenciam quão rapidamente ocorre a hidrólise da uréia, incluindo a quantidade de enzima presente e a temperatura do solo (MANUAL INTERNACIONAL DE FERTILIDADE DO SOLO, 1998).

A uréia aplicada ao solo sofre, em poucos dias, uma reação de hidrólise enzimática que resulta em apreciável liberação de amônia (NH_3). Embora sendo um gás, esse composto é passível de retenção no solo, principalmente sob a forma de amônio (NH_4^+). A retenção se faz às custas da difusão do gás através do solo, sendo esta influenciada por diversos fatores como textura, porosidade, umidade e capacidade do solo em reter a amônia. A distância e a direção de deslocamento a partir do local de aplicação da uréia e o gradiente de concentração de NH_4^+ que aí se forma são as variáveis que irão caracterizar a distribuição da amônia no solo (KIEHL, 1989).

Segundo Rodrigues e Kiehl (1992), a maior parte da amônia (61 a 91%) contida em torno da área de aplicação da uréia sofre nitrificação em nove semanas, independentemente da dose ou do modo de aplicação e não há acúmulo de nitrito no local, mesmo na maior dose de uréia.

Segundo Kiehl (1989), a forma pela qual a uréia se distribui no solo é importante, porque dela depende o aproveitamento do nitrogênio pelas plantas. O grau de distribuição irá determinar a posição deste nutriente em relação às raízes e influir na quantidade de amônia que poderá perder-se para a atmosfera.

De acordo com Rodrigues e Kiehl (1992), a amônia proveniente da uréia aplicada na superfície tende a concentrar-se na camada superficial de 0-1 cm, mas significativa porção difunde-se para o interior do solo. Para a uréia aplicada a 5 cm, a maior parte da amônia permanece nas proximidades, enquanto um terço se difunde até a superfície.

Entre as alternativas de manejo da uréia propostas visando reduzir ou mesmo eliminar as perdas de N pela volatilização da amônia (NH_3) está a incorporação da uréia ao solo. Quando é aplicada na superfície do solo, as perdas de NH_3 por volatilização são pronunciadas devido a pouca chance que a NH_3 tem de ser adsorvida ao solo sob a forma de NH_4^+ . A uréia aplicada na superfície do solo apresenta perdas de até 60% do N-uréia aplicado; entretanto, quando incorporada ao solo a 7,5 cm de profundidade, as perdas reduziram a menos de 10% (COELHO et al., 1992).

2.1.2.2 Sulfato de amônio

O sulfato de amônio contém 20% de N e 22-24% de S. É geralmente produzido como um subproduto na fabricação de coque e nylon. O aumento na frequência das deficiências de enxofre tem resultado em maior utilização desse fertilizante como fonte N e S (MANUAL INTERNACIONAL DE FERTILIDADE DO SOLO, 1998).

A presença de amônia livre na superfície do solo favorece as perdas de nitrogênio por volatilização (SENGIK e KIEHL, 1995), de modo que perdas consideráveis de nitrogênio são próprias de fertilizantes que contenham o nitrogênio na forma amoniacal, como o sulfato de amônio.

O sulfato de amônio, fertilizante utilizado como fonte de nitrogênio e de enxofre, não sofre volatilização de nitrogênio amoniacal (N-NH_3) quando o pH é inferior a 7, mesmo sendo aplicado sobre restos de cultura (VOLK, 1959).

2.1.2.3 Mistura de fontes nitrogenadas

Mediante o uso de mistura de fontes nitrogenadas para minimizar perdas, devem-se avaliar os atributos físico-químicos que influem na qualidade das misturas. A higroscopicidade é a tendência do produto em absorver umidade da atmosfera, afetando a qualidade dos fertilizantes por meio da redução da fluidez, decorrente do empedramento (ALCARDE, 1992). O ângulo de repouso do produto é indicador de sua escoabilidade, influenciando a uniformidade da dose aplicada durante sua distribuição (LUZ, 1997). A granulometria, determinada pelo tamanho e forma das partículas, tem ação sobre a segregação dos constituintes da mistura, com reflexos na higroscopicidade e escoabilidade em consequência da variabilidade de forma e tamanho das partículas.

Vitti et al. (2002) concluíram que a mistura de uréia com sulfato de amônio é viável, pois proporciona diminuição das perdas de N-NH_3 por volatilização. Além disso, os atributos físicos (ângulo de repouso, higroscopicidade e granulometria) não são afetados a ponto de inviabilizar a utilização da mistura de uréia com sulfato de amônio.

Entre os fatores de manejo, diferentes formas de uréia têm sido testadas, misturando-a, por exemplo, com HNO_3 , H_2SO_4 , H_3PO_4 , para reduzir as perdas, por manter o pH ácido na vizinhança do grânulo; alterando-se sua granulometria, o que inibe a nitrificação; adicionando-se sais de K, Ca e Mg junto à aplicação superficial da uréia; reduzindo o potencial de volatilização da amônia e tornando-a de lenta liberação, como os produtos de condensação com formaldeído (CARTER et al., 1986).

Sengik e Kiehl (1995) concluíram que a elevação da CTC resulta em aumento da capacidade do solo em reter NH_4^+ , contribuindo para reduzir a volatilização de NH_3 . Em face da elevada carência nos solos brasileiros em fósforo, é alta a viabilidade de empregar fosfatos solúveis, como o fosfato monocálcio, o fosfato de potássio e o fosfato monoamônico (MAP). O uso de superfosfato triplo,

superfosfato simples, fosfato monoamônico, sulfato ferroso e cloreto férrico em solução ou suspensão com a uréia podem constituir alternativa para reduzir as perdas de amônia por volatilização.

Avaliando o efeito da irrigação sobre a volatilização de amônia após a aplicação de uréia combinada com sulfato de amônio (relação N/S = 2,1/1,0) na primeira cobertura, e apenas uréia na segunda cobertura na cultura do milho, verificou-se que a substituição parcial da uréia por sulfato de amônio apresentou eficiência superior a irrigação em diminuir a perda por volatilização (LARA CABEZAS et al., 1999).

Formas para evitar a volatilização da amônia estão sendo estudadas. As perdas por volatilização analisadas em laboratório foram baixas quando se revestiu a uréia com sulfato de amônio (CANTARELLA et al., 1988). O suprimento de nitrogênio na cultura do milho a partir de grânulos de uréia embebida em óleo de soja resultou em um menor rendimento em função da menor liberação de N a partir da uréia embebida em óleo (BRUNETTO, 2004).

2.1.3 Perdas de N por volatilização

A recuperação pelas plantas do nitrogênio fornecido por fertilizantes é inferior a 50% em relação à quantidade aplicada (RAO et al., 1992), sendo a volatilização um importante processo responsável pela baixa eficiência.

Os trabalhos realizados na tentativa de se reduzir as perdas e aumentar a recuperação do N-fertilizante têm sido baseados em duas concepções básicas: uma de natureza agronômica, relacionada com o manejo do fertilizante no solo e outra de natureza industrial, relacionada com a tecnologia de fabricação do fertilizante. Entre as alternativas de caráter tecnológico estão aquelas para o desenvolvimento de adubos com liberação lenta de N, P e K, mistura de materiais orgânicos com adubos minerais (fertilizantes organominerais) e a utilização de produtos que interferem com atividade biológica no solo, inibidores de urease e de nitrificação (SANTOS, 1991).

Quando os fertilizantes nitrogenados são convenientemente aplicados, em solos bem drenados, praticamente não existem diferenças na eficiência agronômica entre fontes para qualquer sistema de cultivo. Se a fonte de nitrogênio for a uréia, é importante que a mesma seja incorporada, pois, se for aplicada na superfície do solo

ou de restos culturais, pode ocorrer perda de até 54% por volatilização, conforme dados de Lara Cabezas et al. (2000). Para fontes como sulfato de amônio e nitrato de amônio, quando aplicadas na superfície, as perdas são inferiores a 15% (LARA CABEZAS et al., 1997).

As perdas por volatilização de amônia podem ser controladas, pela adição de ácidos (H_3PO_4 , H_2SO_4 e HNO_3), sais (de cálcio, magnésio, amônio e potássio) e inibidores de urease (HARGROVE e KISSEL, 1979).

Os fatores que levaram ao reconhecimento da importância da volatilização de amônia como mecanismo de perdas de nitrogênio do solo foram: a) aumento nas doses de nitrogênio aplicadas; b) uso de amônia anidra e soluções de amônia de preferência aos sais de amônio; e c) acentuado aumento no emprego da uréia, em que o N contido nesse produto precisa sofrer hidrólise para se transformar em amônia, antes de ser utilizado pelas raízes (COELHO et al., 1992).

A baixa capacidade de troca de cátions, elevado pH, baixo poder tampão, alta temperatura, teor de matéria orgânica e o baixo teor de água, são características do solo que podem promover a volatilização de amônia por ocasião da aplicação de uréia (BOUWMEESTER et al., 1985). Embora propriedades do solo, tais como pH, capacidade tampão, CTC, classe textural e atividade da enzima urease sejam, em grande parte, determinantes do potencial de perdas gasosas de amônia, as condições ambientais seguintes são determinantes da magnitude atual das perdas: temperatura, conteúdo de água no solo e intercâmbio gasoso. Por outro lado, esses fatores ambientais interagem com fatores de manejo tais como fonte nitrogenada e sua dose, forma de aplicação, resíduos de culturas e tecnologia de fabricação, modificando a magnitude das perdas ao afetar as propriedades do solo, a taxa de hidrólise da uréia e o equilíbrio químico (HARGROVE et al., 1987).

A maneira como que a amônia se distribui no solo é importante porque determina a posição do nitrogênio em relação às raízes e à superfície; portanto, influi diretamente na quantidade de NH_3 volatilizada para a atmosfera e no índice de aproveitamento do nutriente pelas plantas. Stanley e Smith (1956) verificaram que o movimento do íon NH_4^+ a partir do ponto de aplicação é maior para cima e para os lados do que para baixo.

O processo de volatilização envolve, inicialmente, a hidrólise da fonte nitrogenada por meio da urease. A urease é uma enzima extracelular produzida por bactérias, actinomicetos e fungos do solo, ou ainda, originada de restos vegetais.

Como resultado da hidrólise, tem-se a formação de carbonato de amônio e, por causa das características da urease, fatores que influenciam a atividade dos microorganismos também influenciam a hidrólise da uréia, promovendo grande variação na taxa de hidrólise para diferentes solos (REYNOLDS et al., 1987).

Para inibir as perdas de NH_3 , uma das recomendações mais antigas é o uso de superfosfato simples (TEUSCHER e ADLER, 1965), que apresenta as reações responsáveis pelo mecanismo de fixação:



Na mesma obra encontra-se uma reação semelhante que ocorre apenas entre o carbonato de amônio e o sulfato de cálcio ou gesso:



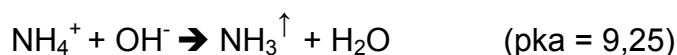
Entretanto, essa reação em excesso de CO_2 pode transformar o carbonato de cálcio em carbonato ácido de cálcio, diminuindo a ação inibidora do gesso, conforme a reação abaixo, também citada por Teuscher e Adler (1965):



De acordo com Silva et al. (1995), as perdas de NH_3 por volatilização diminuíram com a incorporação e localização da uréia no solo, sendo menores quando a uréia foi localizada a 10 cm de profundidade, intermediárias quando incorporada à camada 0-10 cm e maiores quando deixada à superfície. Além disso, as perdas de NH_3 por volatilização aumentaram com o nível de N aplicado.

2.1.3.1 Volatilização x pH do solo

Segundo Gianello et al. (1995), o amônio pode ser transformado em amônia, que é volátil. Em solos alcalinos a concentração de OH^- é elevada, favorecendo o equilíbrio para a direita, com perda de NH_3 por volatilização. A equação de equilíbrio da amônia é dependente do pH:



Parte do N - NH_3 formado reage com íons H^+ da solução do solo e com íons H^+ dissociáveis do complexo coloidal, resultando no cátion NH_4^+ . Entretanto, a neutralização da acidez potencial determina a elevação do pH, que pode atingir valores acima de 7 na região próxima aos grânulos do fertilizante aplicado. Na

camada próxima à aplicação do fertilizante, constatou-se aumento do pH em água de 6,9 para 8,7 (RODRIGUES e KIEHL, 1992).

Smiley e Papendick (1968) encontraram, para as distâncias de 0-2, 2-4 e 4-5 cm do ponto de aplicação teores respectivos de N-NH₃ de 2524 mg kg⁻¹ (pH 8,8); 1337 mg kg⁻¹ (pH 7,7) e 537 mg kg⁻¹ (pH 6,0). A concentração de amônia estava realmente correlacionada com o pH.

Segundo Sengik e Kiehl (1995), estudando o efeito de resíduos orgânicos e do fosfato monocálcico na volatilização de amônia em solo tratado com uréia, concluíram que os períodos de maior intensidade de perda de NH₃ coincidiram com aqueles nos quais os valores de pH da camada superficial da terra eram os mais altos. Os aditivos que melhor controlaram as perdas de amônia foram os que causaram as reduções mais acentuadas no pH do meio.

Rodrigues e Kiehl (1992) concluíram que existe alta correlação entre o teor de N-NH₃ e o pH. O pH na zona de aplicação, que chegou a 8,7 diminuiu com a distância do local de aplicação, assim como os teores de N-NH₃.

A hidrólise da uréia provoca elevações rápidas do pH do solo e de concentrações de nitrogênio amoniacal, associadas a alterações de equilíbrios químicos, de processos microbiológicos como a nitrificação e outras alterações do meio ligadas ao processo de perdas da amônia, formando condições ideais para que ocorra a volatilização da amônia. A zona de aplicação da uréia tende a atingir pH tão elevado como 8,8. Neste valor, cerca de 25% do nitrogênio amoniacal poderá estar na forma de moléculas de NH₃ e 75% como NH₄⁺ (SENGIK E KIEHL, 1995).

O valor do pH tem influência no equilíbrio NH₃/NH₄⁺, governando as concentrações de NH₄⁺ na solução do solo. Desse modo, o pH se torna o fator de maior importância na magnitude da volatilização da amônia (HARGROVE et al., 1987). Por essa razão, tem-se estudado recentemente a possibilidade do emprego de certos sais inorgânicos que, por reduzirem o pH do meio, ou o CO₃²⁻ que resulta da hidrólise da uréia e se decompõe para CO₂ e NH₃, promovem acentuada redução das perdas de NH₃ (KIEHL, 1989).

Segundo Sengik e Kiehl (1995) os tempos de ocorrência da máxima perda de amônia estiveram associados aos maiores valores de pH e, a medida que este se reduziu abaixo de 7,0, as perdas tenderam a desaparecer.

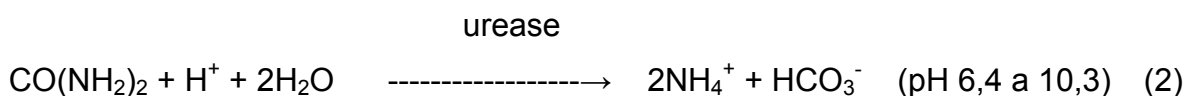
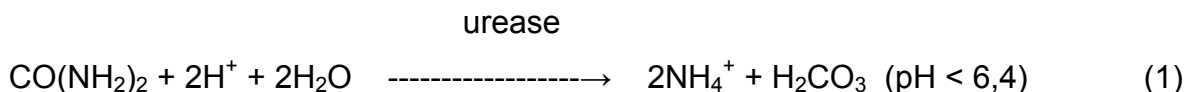
2.1.3.2 Volatilização x Umidade do solo

Segundo Volk (1959), a hidrólise da uréia ocorre em ampla faixa de umidade do solo. Quanto mais rápida a hidrólise, maior o potencial de perda de NH_3 . A adição de água tem influência direta sobre a hidrólise e promove o aumento da difusão da uréia e, conseqüentemente, maior contato com a urease no solo (SAVANT et al., 1987). A uréia aplicada é rapidamente hidrolisada e a taxa de hidrólise depende do tempo, temperatura do solo, umidade, quantidade e forma pela qual a uréia é aplicada (BYRNES, 2000).

A umidade da massa de um solo como um todo não é determinante da perda de amônia, pois uma camada de solo seco de alguns milímetros pode reduzir ou mesmo impedir a hidrólise (FENN e HOSSNER, 1985; MCINNES et al., 1986). Alguns autores recomendam a aplicação de uréia quando a superfície do solo estiver o mais seca possível, como alternativa para reduzir a volatilização da amônia, no entanto, se ocorrer uma chuva de baixa intensidade poderão promover as perdas, mas se ocorrer uma chuva acima de 5 mm, nos dois dias após a aplicação de uréia, as perdas por volatilização de amônia podem ser reduzidas devido ao transporte da uréia para o interior do solo, favorecendo a retenção do NH_4^+ e NH_3 produzidos (BLACK et al., 1987; VLEK e CARTER, 1983). Outros autores como Overrein e Moe (1967) recomendam a aplicação superficial da uréia, seja feita com o solo no teor máximo de umidade, pois aumentará a dissolução da amônia e a adsorção de íons amônio, reduzindo a volatilização do nitrogênio.

As condições adequadas de umidade que favorecem a atividade da urease e a hidrólise da uréia devem ocorrer por um período de pelo menos dois dias, caso contrário, as perdas de amônia podem ser afetadas (FENN e HOSSNER, 1985). A uréia adicionada na superfície do solo poderá ser completamente hidrolizada em três dias, sendo que no momento em que a hidrólise for máxima, o teor de NH_4^+ no solo será mais elevado (SAVANT et al., 1987).

Verifica-se pela reação de hidrólise catalisada pela urease (reações 1 e 2 sugeridas por Ferguson et al., 1984 e Kissel e Cabrera, 1988) a dependência da presença de água no meio para a hidrólise e posterior volatilização de amônia em relação à presença de água no meio (VLEK e CARTER, 1983).



Após a hidrólise da uréia, parte do NH_3 formado ficará dissolvido na solução do solo e poderá ser perdido para a atmosfera ou formar NH_4^+ , o que evidencia a importância do teor de água do solo no processo. Não sendo hidrolizada, a uréia poderá ser transportada para o interior do solo, onde a sua hidrólise não implicará em perdas substanciais de amônia (VLEK e CARTER, 1983 e FENN e HOSSNER, 1985).

Para Savant et al. (1987), a hidrólise da uréia tende a se elevar rapidamente com o aumento do teor de umidade até próximo a capacidade de campo. Com teores extremos de umidade a hidrólise tende ao mínimo, sendo que, em solo seco, a dissolução da uréia será retardada a tal ponto que a hidrólise será muito lenta, ou mesmo nem ocorrer (BOUWMEESTER et al., 1985; LARA CABEZAS et al., 1992).

Segundo alguns autores como Bouwmeester et al. (1985), Rachhpal-Singh e Nye (1986) e Reynolds et al. (1987), para que ocorram perdas elevadas de amônia, no momento da aplicação da uréia a umidade da camada superficial do solo precisa estar na capacidade de campo ou próximo a esta, devendo também ser baixa a umidade relativa do ar.

Segundo Sengik et al. (2001), o teor de umidade do solo para promover a máxima perda de amônia por volatilização foi reconhecida na prática como o estado de sazão ou limite superior de friabilidade e as perdas de nitrogênio na forma de amônia, embora reduzidas, ocorrem mesmo em solos secos ou muito úmidos. As perdas de nitrogênio possuem um pico de máximas perdas no quarto dia, mas ocorrem durante um período de tempo superior a quinze dias. A perda total máxima foi de 35% da quantidade de N aplicada com teor de água de 53% da CC, teor de umidade do solo reconhecida na prática como o estado de friabilidade do solo.

2.2 Métodos para estimar perdas por volatilização de amônia no solo

A desnitrificação e outros processos de perdas gasosas do N do solo tem sido pouco investigados no Brasil. A desnitrificação, umas das causas mais importantes de perdas do N do solo, é considerada indesejável em solos agrícolas. Ao lado do interesse pela natureza desse processo e de suas reações, seu estudo tem recebido especial atenção por suas implicações em práticas agronômicas e poluição ambiental. A estimativa de perdas gasosas do N do solo tem sido dificultada pela falta de uma metodologia adequada (COLAÇO e VICTÓRIA, 1988).

Segundo Lara Cabezas e Trivelin (1990), é possível estimar as perdas por volatilização de amônia do solo provenientes da aplicação de fertilizantes nitrogenados por meio de métodos diretos ou indiretos. Métodos diretos necessitam de aparelhos específicos. Já os métodos indiretos podem ser efetuados por meio do uso de fertilizante isotopicamente marcado (^{15}N). Determinações isotópicas apresentam alto custo, porém podem ser empregadas na calibração de métodos diretos que utilizam câmaras coletoras.

Entre os métodos apresentados na literatura para estimar as perdas por volatilização de amônia do solo, provenientes da aplicação de fertilizantes nitrogenados, os micrometeorológicos (métodos diretos) e o por balanço isotópico de ^{15}N (método indireto) são os únicos que permitem quantificar o processo sem influenciar na atmosfera próxima a superfície do solo, como também nas propriedades químicas e biológicas deste. Os primeiros, que podem ser classificados segundo a forma de determinação do transporte de amônia do solo à atmosfera, necessitam de aparelhos, como detectores de gases e microanemômetros, que os tornam de difícil uso (DENMEAD, 1983).

O método com ^{15}N , ainda pouco utilizado no País, vem sendo muito empregado por pesquisadores de exterior, tanto em estudos de balanço nitrogenado no sistema solo-planta-atmosfera, onde perdas por volatilização podem ser quantificadas, como na calibração de métodos diretos, que se utilizam câmaras de retenção de amônia (NÖNMIK, 1973; MARSHALL e DEBELL, 1980; FILLERY e De DATTA, 1986; HARGROVE et al., 1987). A principal restrição que tem sido feita a seu uso relaciona-se aos custos de fertilizantes marcados com ^{15}N e aos de análises isotópicas, além da impossibilidade de determinar perdas de outras fontes

nitrogenadas, que não a do material marcado (NÖNMIK, 1973; CARTER et al., 1967).

Os sistemas fechado-estático, fechado-dinâmico, e semi-aberto estático são utilizados nas determinações pelos métodos diretos. Sistemas fechados podem impossibilitar a obtenção de observações da volatilização em condições naturais, pois modificam o ambiente na superfície do solo (LARA CABEZAS e TRIVELIN, 1990).

Os coletores descritos por Nönmik (1973), com sistema semi-aberto estático, são utilizados em estudos de campo. Como método direto na estimativa de amônia volatilizada do solo, Nönmik (1973) utilizou um sistema absorvedor semi-aberto estático, constituído por um cilindro de acrílico contendo, no interior e acima da superfície do solo, dois discos de poliuretano embebidos com solução de ácido fosfórico. O disco inferior tinha a finalidade de absorver a amônia proveniente do solo e, o superior, discriminava a amônia do ar no exterior da câmara.

O sistema coletor do tipo semi-aberto estático foi avaliado por Lara Cabezas e Trivelin (1990), os quais observaram que a presença do sistema interferiu no processo de volatilização de amônia do solo significativamente, reduzindo a porcentagem e a quantidade de amônia volatilizada do fertilizante.

Em relação aos sistemas fechados, Nönmik (1973) indicou que os sistemas semi-abertos estáticos possibilitam o intercâmbio relativamente livre do ar entre a superfície do solo e a atmosfera, permitindo a difusão da amônia. São inevitáveis, porém, as alterações temperatura, umidade relativa, taxa de evaporação da água do solo e pressão de amônia no ambiente das câmaras.

Com base nos resultados experimentais obtidos com dois sistemas coletores do tipo semi-aberto estático, Lara Cabezas (1987) sugeriu que a eficiência do coletor é dependente apenas do posicionamento do sistema e de sua estrutura, porém não das condições experimentais, como fonte nitrogenada, doses de N e solo.

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização das amostras de solo

Para os estudos em laboratório e em casa de vegetação, foram utilizadas amostras de um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico – PVAd (EMBRAPA, 2006), proveniente do município de Iporã - PR, de textura arenosa e de um Nitossolo Vermelho distroférico - NVdf típico (EMBRAPA, 2006), proveniente do município de Entre Rios do Oeste - PR, de textura argilosa. A caracterização química e granulométrica de ambos os solos encontra-se na tabela 1.

Tabela 1 - Caracterização química e granulométrica do Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico (PVAd) e do Nitossolo Vermelho distroférico (NVdf) e teores de umidade na capacidade de campo das amostras de solo utilizadas para condução dos experimentos em laboratório e casa de vegetação

Solo	MO ⁽¹⁾ g dm ⁻³	P ⁽²⁾ mg dm ⁻³	pH ⁽³⁾ CaCl ₂	H+Al ⁽⁴⁾ -----	K ⁽²⁾	Ca ⁽⁵⁾ cmolc dm ⁻³	Mg ⁽⁵⁾ -----	SB	CTC	V
PVAd	13,67	15,41	5,60	3,97	0,29	2,22	0,49	3,00	6,97	43,04
NVdf	30,07	8,39	5,20	6,21	0,56	4,27	0,91	5,74	11,95	48,03

Solo	Teor de água na capacidade de campo ⁽⁶⁾ ----- kg kg ⁻¹ -----	Areia ⁽⁷⁾ -----	Silte ⁽⁷⁾ g kg ⁻¹ -----	Argila ⁽⁷⁾ -----
PVAd	0,15	778,00	52,00	170,00
NVdf	0,30	35,40	261,10	703,50

⁽¹⁾ Método Walkey-Black; ⁽²⁾ Extrator Mehlich-1; ⁽³⁾ CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹; ⁽⁴⁾ Acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹; ⁽⁵⁾ Extrator KCl 1 mol L⁻¹; ⁽⁶⁾ Método da Coluna; ⁽⁷⁾ Método do Densímetro de Bouyoucos.

3.2 Determinação do teor de água na Capacidade de Campo

Para determinar o teor de água na capacidade de campo, as amostras de solo foram secas em estufa a 65°C por 72 h e acondicionadas em provetas de um litro de capacidade graduadas a cada 10cm³. Em seguida foi adicionado 500mL de água destilada até a umidade atingir a metade da proveta, deixada descansar por 48 h e vedadas com um filme plástico.

Posteriormente, fez-se a coleta de amostras a cada intervalo de 10 cm³, realizando a pesagem do solo úmido, deixando-as 48 h em estufa 65°C e avaliada a massa do solo seco. Assim foi possível determinar o teor de umidade presente em cada camada; os intervalos nos quais a variação do teor de umidade foi inferior a 1% efetuou-se a média fornecendo o valor do teor de água na capacidade de campo das amostras de solo (Tabela 1).

3.3 Experimento em laboratório

O experimento foi conduzido no Laboratório de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas, na Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE, Campus de Marechal Cândido Rondon - PR.

Foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado, com quatro repetições, em esquema fatorial 2 x 2 x 5, sendo dois solos (arenoso e argiloso), dois períodos de avaliações (3 e 7 dias) e cinco fontes de nitrogênio, totalizando 20 tratamentos.

Foram utilizadas as seguintes fontes de nitrogênio (N): uréia, uréia embebida em óleo, uréia com inibidor de urease, sulfato de amônio e mistura de uréia com sulfato de amônio.

A dose de nitrogênio fornecida por estas fontes foi de 140 kg ha⁻¹ de N aplicadas na superfície do solo. Para a mistura de uréia mais sulfato de amônio, a proporção foi de 100 e 40 kg ha⁻¹ de N, respectivamente.

A uréia embebida com óleo foi obtida utilizando óleo de soja na proporção uréia: óleo de 5: 1. A mistura ficou em repouso por um período de 30 dias. Já a mistura da uréia com o sulfato de amônio foi realizada no dia anterior a sua aplicação.

Para cada parcela, utilizaram-se amostras de 600 g de solo acondicionados em recipientes plásticos com 10 cm de diâmetro e capacidade de um dm^3 (Figura 1). Antes da aplicação dos tratamentos, adicionou-se água até atingir o teor de água da capacidade de campo.



Figura 1 - Coletor instalado em laboratório.

Em seguida foram adicionadas na superfície as fontes de nitrogênio, instalados os coletores de amônia e os recipientes foram hermeticamente fechados (Nõnmik, 1973). Cada sistema coletor instalado apresentava dois discos de espuma de poliuretano absorventes embebidas em 50 mL de uma solução de ácido fosfórico 1 mol L^{-1} e 40 mL de glicerina comercial, colocados sobre suporte de canudos de plástico para evitar o contato com o solo (Figura 1).

As perdas de N-NH_3 foram quantificadas aos 3 e 7 dias após a aplicação dos tratamentos, sendo efetuada a troca dos coletores no terceiro dia.

A extração da N-NH_3 retido nas espumas foi realizada com solução de cloreto de potássio (1 mol L^{-1}), efetuando quatro lavagens consecutivas das espumas com a solução para remoção do nitrogênio amoniacal retido.

O líquido remanescente da lavagem das espumas foi recolhido em béquero ao qual se adicionou o indicador verde de bromocresol e, posteriormente, titulou-se com solução de NaOH padronizado ($0,25 \text{ mol L}^{-1}$). A quantidade de amônia

volatilizada obtida pela equação a seguir foi expressa em % da quantidade de N aplicada:

$$N-NH_3 = (V \text{ branco} - V \text{ amostra}) * 3,5$$

Onde:

N-NH₃= quantidade de N volatilizado em mg;

V branco= volume de base consumida na titulação em branco;

V amostra= volume gasto na titulação das amostras.

Os dados foram submetidos à análise de variância e as médias comparadas pelo teste de Tukey a 5%, utilizando o programa SAEG 8.0 (1999).

3.4 Experimento em casa de vegetação

O experimento foi conduzido na área de cultivo protegido Dr. Mário César Lopes, pertencente à Universidade Estadual do Oeste do Paraná - UNIOESTE, Campus de Marechal Cândido Rondon/PR.

O experimento foi instalado em vasos com capacidade para 4 kg de solo, com 17cm de diâmetro e área de superfície 0,023 m², distribuindo-se 4 sementes por vaso do híbrido de milho Coodetec 304 de ciclo precoce recomendado para região oeste do Paraná. Dez dias após a emergência foi realizado o desbaste, deixando 2 plantas por vaso.

Antes da semeadura, cada vaso foi adubado com superfosfato triplo e cloreto de potássio nas doses de 6,87 g e 0,46 g por vaso, respectivamente, de forma a fornecer 300 mg dm⁻³ de P e 50 mg dm⁻³ de K.

Foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado com quatro repetições, em esquema fatorial 2 x 6 x 6, sendo dois solos (arenoso e argiloso), seis períodos de avaliações (1, 2, 3, 4, 7 e 8 dias) e cinco fontes de nitrogênio além da testemunha, totalizando 72 tratamentos.

Foram utilizadas as seguintes fontes de nitrogênio (N): uréia, uréia embebida em óleo, uréia com inibidor de urease, sulfato de amônio e mistura de uréia com sulfato de amônio.

A dose de nitrogênio fornecida por estas fontes foi de 140 kg ha⁻¹ de N aplicadas na superfície do solo. Para a mistura de uréia mais sulfato de amônio, a proporção foi de 100 e 40 kg ha⁻¹ de N, respectivamente.

A uréia embebida com óleo foi obtida utilizando óleo de soja na proporção uréia: óleo 5: 1. A mistura ficou em repouso por um período de 30 dias. Já a mistura da uréia com o sulfato de amônio foi realizada no dia anterior a sua aplicação.

Quando as plantas apresentavam 4 a 6 folhas, aos 20 dias após a emergência, a umidade do solo foi corrigida para a capacidade de campo por meio de pesagens dos vasos e em seguida, foram adicionados os adubos nitrogenados na superfície do solo.

Imediatamente após a aplicação dos fertilizantes foram instalados os coletores de amônia, do tipo semi-aberto estático, desenvolvido por Nönmik (1973), sendo utilizado um coletor por vaso (Figura 2). As perdas de N-NH_3 por volatilização foram avaliadas no período de 8 dias, realizando 6 avaliações, ou seja, com 1, 2, 3, 4, 7 e 8 dias da aplicação dos tratamentos.



Figura 2 - Coletor instalado em casa de vegetação.

Os coletores foram confeccionados com garrafas pet (polietileno tereftalato) de 0,5 L cortadas ao meio, contendo dois discos de espuma de poliuretano absorventes embebidos em 50 mL de uma solução de ácido fosfórico 1 mol L^{-1} e 40 mL de glicerina comercial, fixados às paredes do coletor com cola branca para evitar o contato com o solo (Figura 2).

A extração da N-NH_3 retida nas espumas foi realizada com solução de cloreto de potássio (1 mol L^{-1}), sendo que as espumas sofreram quatro lavagens consecutivas com a solução para remoção do nitrogênio amoniacal retido.

A determinação da amônia retida nos absorvedores foi realizada por titulação. O líquido remanescente da lavagem das espumas foi recolhido em béquer ao qual se adicionou o indicador verde de bromocresol e, posteriormente, titulou-se com solução de NaOH padronizado ($0,25 \text{ mol L}^{-1}$).

Para o cálculo da quantidade de amônia volatilizada foi utilizada a equação citada no item 3.3.

Após 20 dias da aplicação dos tratamentos, foram avaliadas as seguintes variáveis biométricas: altura de planta - distância média, em cm, compreendida entre o nível do solo e o ápice das folhas, com auxílio de uma trena bem como de diâmetro do colmo, com auxílio de um paquímetro.

Em seguida, coletou-se a parte aérea de cada vaso, efetuando o corte rente ao solo que foi acondicionada em saco de papel e colocada em estufa de ventilação forçada a 65°C durante 72 h. O material foi pesado em balança de precisão para determinação da matéria seca, moídas e homogeneizadas.

O conteúdo de nitrogênio total foi determinado por digestão sulfúrica, onde foram utilizadas amostras de 0,2 g de tecido foliar e no extrato, o N total determinado por destilação, método Kjeldahl, de acordo com Tedesco et al. (1995).

Foram calculadas as eficiências de uso do nitrogênio de acordo com índices propostos por Moll et al. (1982) e Siddiqui e Glass (1981).

- **Eficiência de uso do nitrogênio total (EUN)** – produção de biomassa seca (Y) por unidade de nitrogênio acumulado na parte aérea (Nab):

$$\text{EUN} = Y / \text{Nab} \quad (\text{g g}^{-1})$$

- **Eficiência de absorção (EA)** - quantidade de nitrogênio acumulado na parte aérea (Nab) pela quantidade de nitrogênio aplicado (QNa):

$$\text{EA} = \text{Nab} / \text{QNa} \quad (\text{g g}^{-1})$$

- **Eficiência do uso do fertilizante (EUF)** - produção de biomassa seca da parte aérea (Y) pela quantidade de nitrogênio aplicado (QNa).

$$\text{EUF} = Y / \text{QNa} \quad (\text{g g}^{-1})$$

Os dados coletados foram submetidos à análise de variância e de regressão e a comparação entre fontes e solos pelo teste de Tukey a 5%, SAE 8.0 (1999).

3.5 Experimento conduzido em campo

O experimento foi conduzido em condições de campo em sistema plantio direto, na Estação Experimental Prof. Dr. Antônio Carlos dos Santos Pessoa da Universidade Estadual do Oeste do Paraná – UNIOESTE, *Campus* de Marechal Cândido Rondon. A área está localizada sob as coordenadas: longitude W 54° 04' 12" e latitude S 24° 33' 40", com altitude de 420 m. O clima que caracteriza a região, segundo as Cartas Climáticas Básicas editadas pelo Iapar (1978), é do tipo subtropical úmido, com pluviometria média anual de 1804 mm e temperaturas médias variando de 15° C a 28° C.

A caracterização química do Latossolo Vermelho eutroférico - LVef (EMBRAPA, 1999) da área experimental, foi realizada coletando-se sub-amostras de solo da camada de 0-10 e 10-20 cm, conforme descrito por Prochnow e Vitti (1998). A amostra foi seca em estufa a 60° por 48 h, destorroada e passada em peneira com malha 2 mm, para avaliação da fertilidade da área experimental (Tabela 2).

Tabela 2 - Caracterização química e granulométrica do Latossolo Vermelho eutroférico nas profundidades 0-10 cm e 10-20 cm da área do experimento

Prof	MO ⁽¹⁾	P ⁽²⁾	pH ⁽³⁾	H+Al ⁽⁴⁾	K ⁽²⁾	Ca ⁽⁵⁾	Mg ⁽⁵⁾	SB	CTC	V
cm	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	CaCl ₂	-----	-----	cmol _c dm ⁻³	-----	-----	-----	%
0 a 10	30,8	18,7	4,85	5,35	0,29	2,69	2,10	5,08	10,40	48,71
10 a 20	26,7	23,1	4,94	4,96	0,18	3,49	2,26	5,93	10,90	54,45

Prof	Areia ⁽⁶⁾	Silte ⁽⁶⁾	Argila ⁽⁶⁾
cm	-----	g kg ⁻¹	-----
0 a 10	130,00	65,00	650,00
10 a 20	150,00	75,00	775,00

⁽¹⁾ Método Walkey-Black; ⁽²⁾ Extrator Mehlich-1; ⁽³⁾ CaCl₂ 0,01 mol L⁻¹; ⁽⁴⁾ Acetato de cálcio 0,5 mol L⁻¹; ⁽⁵⁾ Extrator KCl 1 mol L⁻¹; ⁽⁶⁾ Método do Densímetro de Bouyoucos.

O delineamento experimental foi em blocos casualizados com quatro repetições e nove tratamentos envolvendo fontes e doses de N apresentados na

tabela 3. Foram eliminadas as duas linhas laterais e 1,0 m de cada extremidade da parcela, avaliando-se as 2 linhas centrais, perfazendo um total de 10,8 m² área útil por parcela, 1200 m² de área total do experimento.

Tabela 3 - Tratamentos incluindo fontes e doses de N aplicadas em cobertura para cultura do milho

Tratamentos	Fonte	Dose de N em cobertura (kg ha ⁻¹)
1	Testemunha	0
2	Uréia	140
3	Uréia embebida em óleo	140
4	Uréia + sulfato de amônio	100 + 0
5	Uréia + sulfato de amônio	100 + 10
6	Uréia + sulfato de amônio	100 + 20
7	Uréia + sulfato de amônio	100 + 30
8	Uréia + sulfato de amônio	100 + 40
9	Uréia com inibidor urease	140

A parcela experimental foi constituída de quatro linhas de oito metros, espaçadas em 0,80 m, distribuindo-se 5 sementes por metro linear do cultivar de milho CD 3121, híbrido simples de ciclo precoce recomendado para região oeste do Paraná.

Na adubação de semeadura foram aplicados 400 kg ha⁻¹ da fórmula 08-28-16, de forma a fornecer 32 kg ha⁻¹ de N, 112 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 64 kg ha⁻¹ de K₂O.

Aos 25 dias após a emergência (DAE) e contendo 4 a 6 folhas totalmente desenvolvidas, aproximadamente no ponto de diferenciação do pendão floral, no período da manhã foram aplicados os tratamentos envolvendo fontes e doses de N em cobertura, em superfície e sem incorporação, de acordo com a tabela 3.

Imediatamente após a aplicação dos fertilizantes foram instalados os coletores de amônia, do tipo semi-aberto estático, desenvolvido por Nönmik (1973) (Figura 3). Foram distribuídos 6 coletores por parcela, nas 2 linhas centrais e

quantificadas as perdas de N-NH_3 por volatilização no período de 14 dias, realizando quatro coletas: aos 3, 7, 10 e 14 dias após a aplicação dos adubos nitrogenados.



Figura 3 - Coletor instalado no campo.

Os coletores foram confeccionados com garrafas pet (polietileno tereftalato) de 2 L cortadas ao meio, contendo dois discos de espuma de poliuretano absorventes. Os discos, antes da instalação e a cada troca de espumas, foram embebidos em uma solução de 50 mL de ácido fosfórico 1 mol L^{-1} e 40 mL glicerina comercial, fixados às paredes do coletor com cola branca para evitar o contato com o solo (Figura 3).

A extração da N-NH_3 retida nos discos de espumas foi realizada com solução de 1 mol L^{-1} de cloreto de potássio, sendo lavados quatro vezes seguidas para remoção do nitrogênio amoniacal retido.

A determinação da amônia retida nas espumas foi realizada por titulação. O líquido remanescente da lavagem das espumas foi recolhido em béquer ao qual se adicionou indicador verde de bromocresol e, posteriormente, titulou-se com solução de NaOH padronizado ($0,25 \text{ mol L}^{-1}$).

Para o cálculo da quantidade de amônia volatilizada foi utilizada a equação citada no item 3.3.

Na ocasião do aparecimento da inflorescência feminina no estágio R1, foi realizada a coleta de material vegetal. Foram coletadas 10 folhas por parcela, sendo

coletada a folha oposta e abaixo da espiga de principal, de acordo com Malavolta et al. (1997). As amostras, após secas em estufa com circulação forçada de ar a 65°C por 72 h foram trituradas em moinho e armazenadas em sacos de polietileno.

Para determinação do teor de N total, foram utilizadas amostras de 0,2 g de tecido foliar que foram submetidas à digestão sulfúrica. No extrato, o N total foi determinado por destilação, pelo método Kjeldahl, de acordo com Tedesco et al. (1995).

Foi avaliado também o teor de N nos grãos conforme metodologia utilizada para análise foliar e calculado o teor de proteína multiplicando-se o teor de N por 6,25 (CUNNIFF, 1998).

Anteriormente a colheita, foi realizada a contagem da população final de plantas por parcela, totalizando 61250 plantas/ha.

A colheita foi efetuada manualmente, coletando-se todas as espigas na área útil de cada parcela. Em seguida, procedeu-se a abertura das espigas e foram avaliados a massa de 1000 grãos e produtividade.

A massa de 1000 grãos foi obtida conforme descrito na Regra de Análise de Sementes - R.A.S. (1992), onde ao acaso foi avaliado o peso de quatro sub-amostras de 100 sementes para cada repetição e pesadas em balança semi-analítica, com umidade corrigida para 13%.

A avaliação do rendimento foi realizada por meio da colheita das espigas de milho que se encontraram dentro da área útil da parcela, nas quais se procedeu a abertura e respectiva debulha, com o auxílio de um debulhador manual, e os grãos pesados em balança semi-analítica, corrigindo a umidade para 13% base úmida e, posteriormente, estimando a produtividade em kg ha⁻¹.

Os dados de precipitação pluviométrica, temperatura e umidade relativa do ar no ciclo da cultura do milho estão apresentados nas figuras 4 e 5.

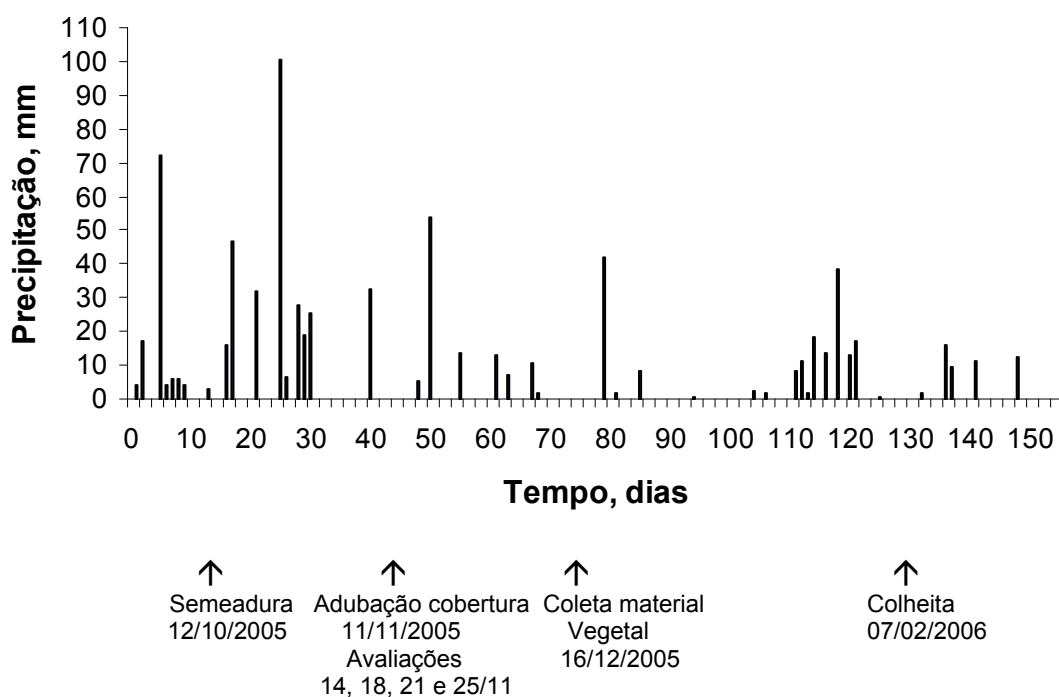


Figura 4 – Precipitação pluviométrica no período de 01/10/05 a 28/02/06 no local do experimento de acordo com dados obtidos da Estação Experimental da Unioeste, M. C. Rondon - PR.

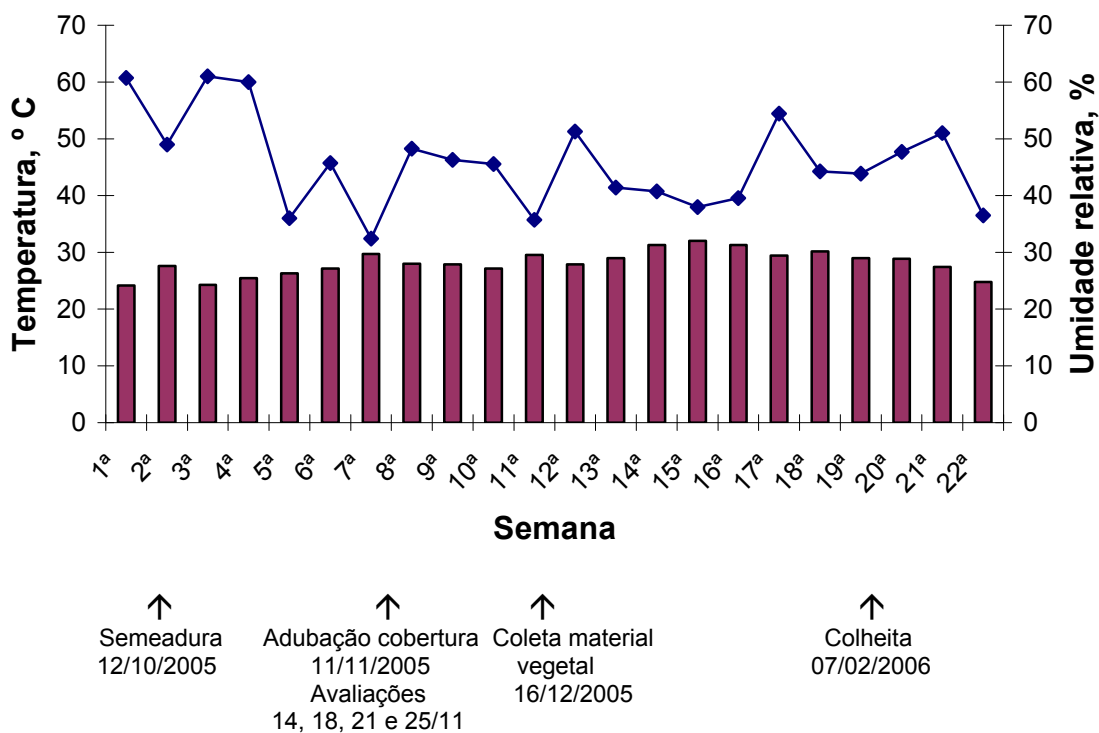


Figura 5 - Temperatura (gráfico de barras) e umidade relativa do ar (gráfico de linha) no período de 01/10/05 a 28/02/06 no local do experimento de acordo com dados obtidos da Estação Experimental da Unioeste, M. C. Rondon - PR.

Os dados coletados foram submetidos à análise de variância e de regressão, e as comparações entre os tratamentos foram realizadas por meio de contrastes não ortogonais, definidos anteriormente de acordo com a tabela 4. As significâncias dos contrastes foram testadas pelo Teste de Bonferroni. Foram utilizados para as análises estatísticas os programas SAEG versão 8.0 (UFV, 1999) e SANEST versão 3.0 (ZONTA e MACHADO, 1980).

Tabela 4 - Representação esquemática do quadro da análise de variância do experimento instalado no campo

Fontes de Variação	Graus de liberdade
Tratamento	8
Regressão	4
Uréia vs Uréia com óleo	1
Uréia em óleo vs Uréia + Sulfato de amônio ($100 + 40 \text{ kg ha}^{-1}$)	1
Uréia vs Uréia com inibidor de urease	1
Uréia em óleo vs Uréia com inibidor de urease	1

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Experimento em laboratório

Os dados de volatilização de amônia avaliados no terceiro e no sétimo dia, bem como a volatilização total após a aplicação dos tratamentos são apresentados na tabela 5. As perdas de amônia foram maiores nos três primeiros dias do que após sete dias após a aplicação, evidenciando que a hidrólise da uréia é um processo rápido, em condições de umidade elevada. Resultados semelhantes foram obtidos por Vitti et al. (2002) em diversos tratamentos envolvendo misturas de uréia e sulfato de amônio, com perdas totais de 37% a 51% ocorridas após três dias de incubação.

Tabela 5 – Perdas de N-NH₃ volatilizada provenientes da aplicação de fontes de nitrogênio em condições de laboratório

Fonte de N	0 - 3 dias		Média de N volatilizado	4 - 7 dias		Média de N volatilizado	Volatilização total 0 - 7 dias	
	PVAd	NVdf		PVAd	NVdf		PVAd	NVdf
				%				
Uréia	15,2 Aa	10,5 Ba	12,8	5,5 Aa	4,4 Ba	4,9	20,7 Aa	14,8 Ba
Uréia + óleo	10,2 Ab	9,2 Bb	9,70	3,9 Ac	3,5 Bb	3,7	14,1 Ab	12,7 Bb
Uréia + inibidor	5,2 Ae	3,3 Be	4,3	1,7 Ae	1,2 Bd	1,4	6,9 Ad	4,5 Be
Uréia + S.A.	8,3 Ad	6,2 Bd	7,3	2,5 Ad	2,4 Bc	2,5	10,8 Ac	8,7 Bd
Sulfato de amônio	9,2 Ac	8,3 Bc	8,7	4,4 Ab	2,7 Bc	3,6	13,6 Ab	11,1 Bc
Médias	9,6 A	7,5 B	8,6	3,6 A	2,8 B	3,2	13,2 A	10,4 B
Valor de F								
F Solo	901,39**			150,25**			803,97**	
F Fonte	1579,34**			361,23**			1532,99**	
F Solo x Fonte	95,88**			21,02**			56,03**	
CV (%)	2,62			6,10			2,74	

Médias seguidas de letras iguais, maiúsculas na coluna e minúsculas na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

A distribuição da uréia em superfície resultou na volatilização de grande quantidade de nitrogênio. Perdas de até 20% foram observadas neste experimento para a fonte uréia enquanto Connell et al. (1979) verificaram aumento na volatilização de 19% para 36% quando a dose de uréia variou de 200 para 300 kg ha⁻¹ de N. A incorporação rasa da uréia ao solo contribuiria para diminuir essa volatilização e aplicações mais profundas permitiriam melhor controle de perdas.

A textura do solo, a CTC e a matéria orgânica exercem influência sobre as perdas, já que estas foram maiores no solo arenoso (Tabela 5). Além disso, a umidade, mantida na capacidade de campo, foi suficiente para desencadear os processos de hidrólise, mas insuficiente para o transporte da amônia.

Com a mistura uréia + sulfato de amônio, houve uma significativa redução nas perdas de N-NH₃ em comparação com uréia para ambos os solos (Tabela 5). Vitti et al. (2002) também constataram redução significativa da quantidade de amônia volatilizada com a adição de doses crescentes de sulfato de amônio em mistura com uréia. Na adubação nitrogenada, é comum a substituição de parte da uréia por sulfato de amônio, para suprir as necessidades de enxofre na cultura do milho. Entretanto, o uso isolado de sulfato de amônio implicou em maior perda de N do que a mistura desta fonte com uréia (Tabela 5).

Essa adição conjunta de outros compostos à uréia tais como CaCl₂, Ca(NO₃)₂, MgSO₄, fosfato monocálcico e superfosfato simples e triplo, fosfatomonoamônico, sulfato ferroso e cloreto férrico tem se mostrado efetiva em controlar as perdas de amônia na uréia em vista de formação de compostos estáveis do NH₄⁺ com os ânions do sal acompanhante (SENGIK e KIEHL, 1995).

Substituição de parte da uréia aplicada em cobertura por um sal acidificante, ainda que em grânulos separados, pode contribuir de forma significativa para diminuir as perdas de N. O manejo da irrigação também é uma forma de minimizar as perdas de N, cuja efetividade seria mais dependente das condições ambientais no momento de efetuar a adubação de cobertura.

Para o tratamento uréia + óleo, as perdas foram inferiores à aplicação isolada de uréia, mas superiores às demais fontes, indicando que a embebição da uréia em óleo não foi efetiva em reduzir perdas por volatilização de N-NH₃. O tratamento uréia + inibidor de urease apresentou as menores porcentagens de volatilização, evidenciando a atuação do inibidor da urease (Tabela 5).

O inibidor ocupa o local de atuação da urease, inativando a enzima, retardando o início e reduzindo o grau de velocidade de volatilização de NH_3 (KOLODJIEJ, 1994). O atraso na hidrólise reduz a concentração de NH_3 presente na superfície do solo, diminuindo o potencial de volatilização de NH_3 e permitindo o deslocamento da uréia para horizontes mais profundos do solo (CHRISTIANSON et al. 1990). De acordo com Sommer et al. (1997), inibidores de nitrificação são utilizados para inibir a conversão de NH_4^+ a NO_3^- , e conseqüentemente, aumentar a eficiência de utilização, quando a perda de nitrogênio é alta.

Em condições adequadas de aplicação, considerável quantidade de amônio pode se retido, notadamente em solos de textura média a argilosa, que apresentam elevada CTC. Contudo, é necessário que, no caso da uréia, a forma de aplicação permite que a amônia liberada tenha adequado contato com as partículas do solo, e que a dose do fertilizante não exceda a capacidade de retenção do meio; por esse motivo, pode-se concluir que a quantidade e o modo com que a uréia é aplicada ao solo exercem acentuada influência nas perdas de amônia por volatilização (RODRIGUES e KIEHL, 1986).

Em solos arenosos e pobres em matéria orgânica, onde geralmente a capacidade de retenção de amônio é baixa (KIEHL e COBRA NETTO, 1973), a profundidade de aplicação da uréia deve ser aumentada, para compensar a menor retenção. Esse fenômeno também foi observado por Wahhab et al. (1960). Black et al. (1987) quantificaram perdas significativas de N-uréia após a aplicação de uma carga de 16 mm de água sobre um solo seco, no qual a uréia foi aplicada superficialmente. Por outro lado, onde a irrigação é disponível, recomenda-se a aplicação do adubo em solo previamente umedecido, como uma forma de favorecer sua solubilização e o conseqüente aproveitamento pelas plantas (LARA CABEZAS et al., 1997).

4.2 Experimento em casa de vegetação

As perdas de amônia avaliadas após 24 horas até 8 dias da aplicação de uréia na superfície de solos arenoso (PVAd) e argiloso (NVdf) são apresentadas na figura 6.

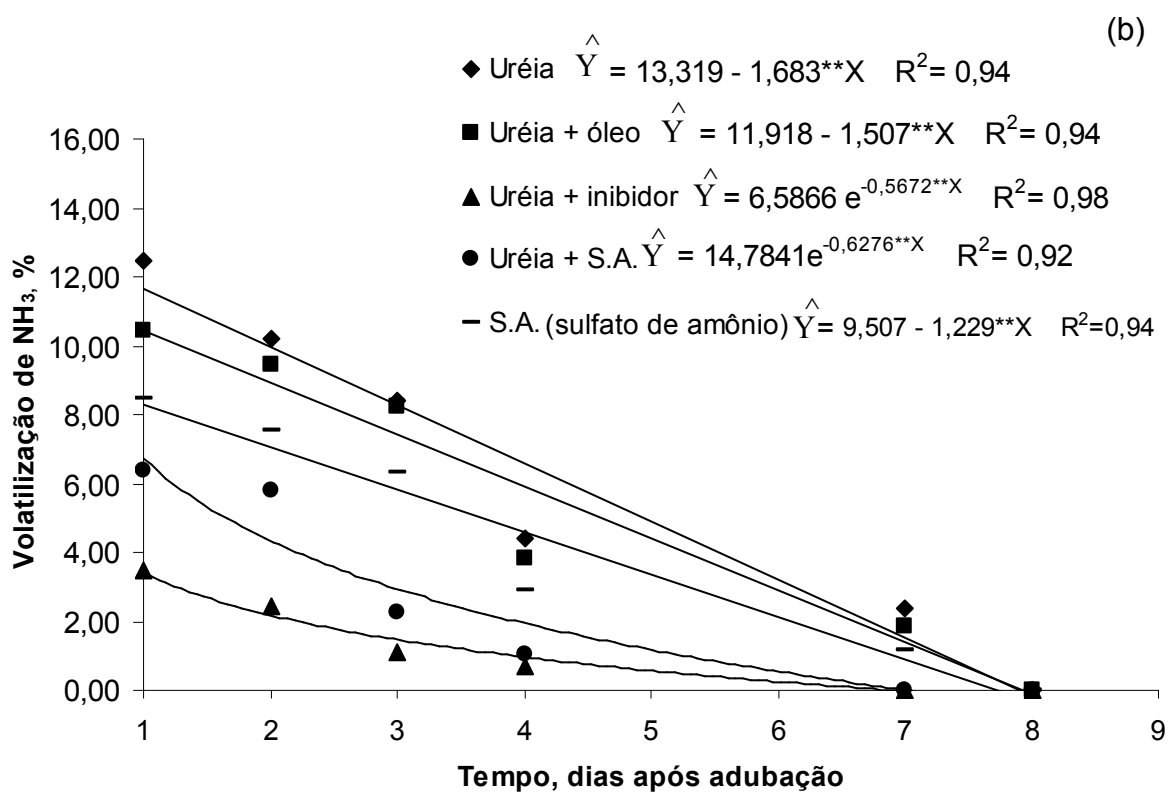
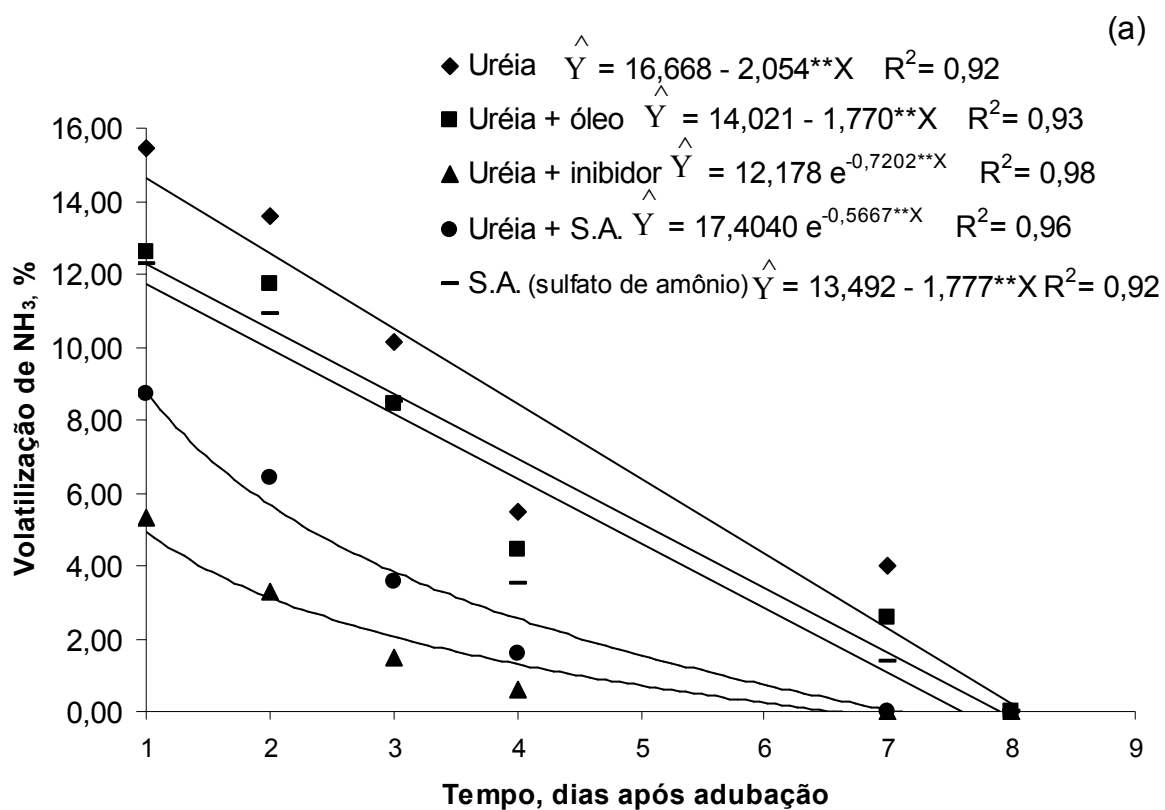


Figura 6 - Volatilização de amônia de diferentes adubos nitrogenados em função do tempo após aplicação dos adubos em solo arenoso (PVA) (a) e argiloso (NVdf) (b).

As perdas foram acentuadas até o 4º dia após a aplicação das fontes, decrescendo a partir daí e tornando-se desprezível a partir do 7º dia da adubação. Resultados semelhantes foram obtidos por Sengik e Kiehl (1995) em estudo no qual avaliaram a volatilização em diferentes graus de umidade do solo.

Elevadas perdas de N-NH_3 foram observadas para a fonte uréia, chegando a aproximadamente 16% para o solo arenoso e 12% para o solo argiloso. Pesquisas realizadas mostram que essas perdas chegam a 20 ou 30% do aplicado, e que, em certas ocasiões, mais da metade do nutriente fornecido pode volatilizar-se (RODRIGUES e KIEHL, 1986).

Comparando os dois solos, o solo argiloso apresentou as menores médias de volatilização em ambos os casos, laboratório (Tabela 5) e casa de vegetação (Figura 6). As diferenças observadas entre os solos quanto à volatilização de amônia podem ser atribuídas a diferentes valores de capacidade de troca catiônica dos mesmos, pois essa propriedade afeta diretamente a retenção de amônia no solo. Nos estudos em casa de vegetação e laboratório, as perdas de amônia no solo argiloso, cuja CTC era $11,95 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, foram inferiores às verificadas no solo arenoso, cuja CTC era $6,97 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$. Resultados semelhantes foram obtidos por Fenn e Kissel (1976), que observando perdas de amônia em solos com diferente capacidade de troca catiônica e textura, verificaram que a volatilização de amônia aumentava acentuadamente com a diminuição da CTC.

Portanto, a uréia não deve ser empregada em doses que excedam a capacidade de retenção de amônio no solo; essa capacidade está diretamente relacionada a CTC, mas também é influenciada por outras propriedades do solo, como textura, acidez potencial, pH e umidade. Embora valores de pH elevados favoreçam a volatilização de amônia, ambos os solos apresentavam pHs ácidos. A diferença de pH entre o solo argiloso (pH 5,20) e arenoso (pH 5,60) parece não ter exercido efeito sobre as perdas, pois no solo arenoso e ligeiramente menos ácido, elas foram maiores do que no solo argiloso (Figura 6). Provavelmente a condição de acidez não tenha sido fator importante na retenção da amônio, por que a hidrólise da uréia causa elevação do pH ao redor do grânulo.

Os elevados índices de volatilização observados para as fontes uréia e uréia + óleo (Figura 6) provavelmente foram verificados pelas condições experimentais favoráveis às perdas de amônia como temperaturas médias elevadas (25 a 35°), utilização de doses relativamente altas de uréia aplicada, resultando em

concentrações de amônia superiores à capacidade de retenção do solo CTC, principalmente no caso do solo arenoso (KIEHL e COBRA NETTO, 1973) e a rápida perda de umidade da camada superficial do solo, fenômeno que favorece a volatilização (WAHHAB et al., 1960).

As perdas de N-NH_3 da aplicação exclusiva de uréia foram maiores, comparadas com as ocorridas pela aplicação conjunta da uréia + sulfato de amônio em ambos os solos (Figura 6), no qual as perdas foram significativamente reduzidas. Nessa condição, como seria esperado, a manutenção da umidade do solo na capacidade de campo não se mostrou efetiva em inibir a volatilização do N-NH_3 hidrolisado da uréia, provavelmente não se traduzindo em transporte efetivo da uréia em profundidade. Como a umidade dos solos foi mantida próxima da capacidade de campo, as perdas gasosas de amônia acompanharam o processo de evaporação.

Bouwmeester (1985) constatou que em solos secos, as perdas podem ser significativas somente se a umidade relativa do ar for alta. A adição de água tem influência direta sobre a hidrólise e promove o aumento da difusão da uréia e, conseqüentemente, maior contato com a urease no solo (SAVANT et al., 1987).

A volatilização encontrada na mistura de 100 kg ha^{-1} de N - uréia com 40 kg ha^{-1} de N - sulfato de amônio, observada na figura 4 pode ser explicada pelo efeito acidificante proporcionado pelo sulfato de amônio reduzindo a volatilização de N-NH_3 . Entretanto, a adição de 140 kg ha^{-1} de N como sulfato de amônio implicou em maior perda de amônia. Este resultado provavelmente se deve à rápida solubilização desta fonte ultrapassando a capacidade de retenção do íon NH_4^+ pela CTC do solo, implicando, portanto, em maior perda de nitrogênio. De acordo com Tisdale et al. (1985), a perda da aplicação de 112 kg ha^{-1} de N como uréia é de 20% quando a CTC é menor que $10 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$, de aproximadamente 10% para valores de CTC de $20 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$ e perdas menores do que 10% para valores acima de $20 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$.

Efeitos da adubação nitrogenada de cobertura, bem como da volatilização de N-NH_3 , sobre as variáveis de crescimento e teor de nitrogênio são apresentados na tabela 6. Para os tratamentos uréia + óleo e sulfato de amônio, as perdas foram semelhantes às ocorridas para a fonte uréia (Tabela 6).

Tabela 6 – Médias de diâmetro de colmo, altura de plantas, produção de biomassa seca da parte aérea, teor foliar de nitrogênio e volatilização total de amônia em plantas de milho em função de diferentes fontes de adubos nitrogenados para os solos arenoso (PVAd) e argiloso (NVdf)

Fonte de N	Altura de planta		Média	Diâmetro colmo		Média	Biomassa seca		Média	Teor de N foliar		Média	Volatilização total		Média
	PVAd	NVdf		PVAd	NVdf		PVAd	NVdf		PVAd	NVdf		PVAd	NVdf	
	cm			mm			g						%		
Testemunha	43,0	42,2	42,6 d	5,2 Be	6,2 Af	5,7	3,5 Ae	4,1 Af	3,8	1,3	1,7	1,5 f	-	-	-
Uréia	62,5	64,7	63,6 c	9,9 Ad	10,4 Ae	10,1	5,8 Bd	10,5 Ad	8,1	2,1	2,6	2,4 e	48,6 Aa	37,8 Ba	43,2
Uréia + óleo	64,7	72,2	68,5 bc	10,9 Ac	11,4 Ad	11,1	6,1 Bd	9,0 Ae	7,6	2,4	2,7	2,6 d	39,9 Ab	33,8 Bb	36,8
Uréia + inibidor	85,0	87,0	86,0 a	15,2 Ba	17,8 Aa	16,5	16,5 Aa	17,2 Aa	16,8	3,9	4,3	4,1 a	10,7 Ae	7,7 Be	9,2
Uréia + S.A.	80,0	82,5	81,2 a	14,4 Ba	15,3 Ab	14,9	15,1 Bb	15,9 Ab	15,5	3,1	3,5	3,3 b	20,3 Ad	15,5 Bd	17,9
Sulfato de amônio	70,0	73,2	71,6 b	12,2 Bb	13,2 Ac	12,7	11,2 Bc	13,9 Ac	12,6	2,5	3,1	2,8 c	36,5 Ac	26,3 Bc	31,4
Médias	67,5 B	70,3 A	68,9	11,3	12,4	11,8	9,7	11,8	10,7	2,6 B	2,9 A	2,8	31,2	24,2	27,7
Valor de F															
F Bloco	0,7**			3,6**			0,9**			1,5**			5,1**		
F Solo	7,5**			64,2**			158,6**			135,2**			766,2**		
F Fonte	149,9**			546,7**			625,3**			389,9**			2446,1**		
F Fonte x Solo	1,1 ^{ns}			5,9**			15,9**			1,3 ^{ns}			36,75**		
CV (%)	5,1			3,9			5,3			4,5			2,9		

Médias seguidas de letras iguais, maiúsculas na coluna e minúsculas na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Embora as perdas de amônia tenham apresentado diferença significativa entre todos os tratamentos, a tendência se mostrou claramente favorável à uréia aplicada junto com o sulfato de amônio e à uréia com inibidor de urease, o que estaria refletindo o efeito residual acidificante do sulfato de amônio, retardando temporariamente as perdas. O sulfato de amônio estaria neutralizando o efeito alcalinizante da hidrólise da uréia e, conseqüentemente, reduzindo as perdas provenientes desse adubo.

O tratamento uréia + inibidor de urease apresentou as menores porcentagens de volatilização, evidenciando a atuação do inibidor da urease enquanto a aplicação de uréia apresentou as maiores perdas de N-NH_3 por volatilização para ambos os solos (Tabela 6).

Diversos trabalhos vem sendo realizados para verificar a eficiência de compostos com potencial de atuar como inibidores da urease, retardando a hidrólise da uréia até que a uréia possa ser incorporada pela chuva. Entre os produtos testados o NBPT (N-(n-butil) tiofosfórico triamida) é o que vêm obtendo maiores resultados de produtividade segundo autores (BREMNER e CHAY, 1986; BRONSON et al., 1989).

Conin et al. (2006) concluíram que o tratamento uréia + inibidor de urease provocou um retardamento no início do processo de volatilização de NH_3 , devido à inibição da atividade da urease. O inibidor não paralisa as perdas de NH_3 por volatilização. Ele ocupa o local de atuação da urease, inativando a enzima, retardando o início e reduzindo o grau de velocidade de volatilização de NH_3 . Com o atraso da hidrólise, a concentração de NH_3 presente na superfície do solo é menor, diminuindo o potencial de volatilização. Dessa forma, a uréia desloca-se para horizontes mais profundos do solo.

Vários fatores podem ter contribuído com a volatilização de N-NH_3 , como por exemplo, o transporte à superfície da uréia e do N-NH_4^+ , produto da hidrólise, através da corrente de evaporação de água do solo (FERGUSON e KISSEL, 1986), associada às altas temperaturas da casa de vegetação (25 a 35° C), o aumento do pH no sítio da hidrólise, pelo baixo poder tampão do solo, no caso do solo arenoso e a maior atividade da urease na superfície (KOELLIKER e KISSEL, 1988).

Houve diferença significativa entre solos e fontes para todas as variáveis em estudo e interação significativa entre solo e fonte para diâmetro de colmo, produção de biomassa seca da parte aérea e volatilização de amônia (Tabela 6). Pode-se

observar que devido à alta exigência de nitrogênio, o milho é uma cultura que responde a adubação nitrogenada com incremento em várias características que influenciam a produção final, como altura de planta, diâmetro de colmo, produção de biomassa seca e teor de N no tecido foliar, dados semelhantes encontrados por Da Ros (2003), Mariano et al. (2003) e Lara Cabezas et al. (1997).

O uso de uréia com inibidor de urease proporcionou maiores valores de altura de planta, diâmetro de colmo, biomassa seca e teor de N no tecido foliar, indicando um melhor aproveitamento do N a partir desta fonte e menor volatilização de amônia (Tabela 6).

A utilização de parte do nitrogênio como sulfato de amônio (uréia + sulfato de amônio) apresentou resultados semelhantes, com pequena redução na produção de biomassa seca e teor de N foliar e maior volatilização de N-NH_3 em comparação ao uso de uréia com inibidor de urease. Entretanto, a perda de N-NH_3 foi inferior às demais fontes tanto no solo argiloso como no arenoso. De modo geral, a volatilização de amônia foi maior no solo de textura arenosa.

A embebição da uréia em óleo proporcionou pequena redução na volatilização de amônia, mas a mistura de uréia com sulfato de amônio foi mais efetiva em reduzir a perda de N com melhores resultados do que o uso isolado de sulfato de amônio (Tabela 6).

A biomassa produzida por uma cultura, durante seu desenvolvimento, provém em sua maior parte da fotossíntese. No entanto, a produção total depende da disponibilidade de nutrientes, embora o mesmo constitua apenas uma pequena proporção do peso da matéria seca da planta (BOARO et al., 1997). A produtividade de grãos e de matéria seca da parte aérea da planta de milho aumenta com a elevação das doses de nitrogênio (ARAÚJO, 2006), podendo relacionar a produção de matéria seca com a produtividade de grãos. Desta forma, o nitrogênio é um dos mais importantes elementos para o desenvolvimento e produção das plantas, pois afeta seu crescimento, a produção de grãos, teor de óleo e proteína (SANZONNOWICZ, 2001).

A partir da quantidade de N aplicado nos tratamentos, matéria seca e o teor de N foliar foram obtidos os índices de eficiência de uso do nitrogênio, eficiência de absorção do nitrogênio e eficiência de uso do fertilizante (Tabela 7).

Tabela 7 – Eficiência de uso do nitrogênio (EUN), Eficiência de absorção de nitrogênio (EA) e Eficiência de uso do fertilizante (EUF) em plantas de milho em função de diferentes fontes de nitrogênio

Fonte de N	EUN			EA			EUF		
	PVAd	NVdf	Média	PVAd	NVdf	Média	PVAd	NVdf	Média
	----- g g ⁻¹ -----								
Testemunha	2,6 Ac	2,5 Ac	2,5	-	-	-	-	-	-
Uréia	2,7 Bc	4,0 Aa	3,4	4,2	5,3	4,7 e	10,8 Be	12,8 Ae	11,8
Uréia + óleo	2,5 Bc	3,3 Ab	2,9	7,4	8,5	7,9 d	18,8 Bd	27,8 Ad	23,3
Uréia + inibidor urease	4,2 Ab	4,0 Aab	4,1	12,1	13,2	12,6 a	50,8 Aa	53,1 Aa	51,9
Uréia + S.A.	4,9 Aab	4,5 Aa	4,7	9,5	10,9	10,2 b	46,5 Bb	49,1 Ab	47,8
Sulfato de amônio (S.A.)	4,4 Aab	4,4 Aa	4,4	7,8	9,7	8,8 c	34,7 Bc	42,9 Ac	38,8
Médias	3,6	3,8	3,7	8,2 B	9,5 A	8,8	32,3	37,1	34,7
Valor de F									
F Bloco	1,7**			1,3**			0,7**		
F Solo	8,3**			98,78**			74,33**		
F Fonte	74,6**			416,70**			726,53**		
F Fonte x Solo	10,8**			1,5 ^{ns}			7,76**		
CV (%)	7,7			4,6			5,1		

Médias seguidas de letras iguais, maiúsculas na coluna e minúsculas na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

Quanto à eficiência de uso do nitrogênio, ou seja, produção de biomassa seca pela quantidade total de nitrogênio absorvido, as fontes uréia + inibidor de urease; sulfato de amônio e uréia + sulfato de amônio foram as fontes de maior eficiência na conversão do N absorvido em biomassa seca. Entre os solos, o NVdf apresentou maior eficiência em comparação ao PVAd apenas para as fontes uréia e uréia + óleo, para as demais fontes não houve diferença significativa entre os solos.

As misturas uréia + sulfato de amônio e uréia + inibidor de urease, como consequência da menor volatilização e maior absorção de N (Tabela 7), foram mais eficientes na produção de massa seca de folha e colmo. A presença de enxofre na mistura deve ter favorecido a utilização do elemento, uma vez que a fonte sulfato de amônio teve eficiência semelhante.

Quanto à eficiência de uso do fertilizante (produção de biomassa seca da parte aérea pela quantidade de nitrogênio aplicado) e eficiência de absorção do N (quantidade de nitrogênio acumulado na parte aérea pela quantidade de nitrogênio aplicado), a fonte uréia + inibidor de urease foi mais eficiente, diferindo significativamente das demais (Tabela 7). Entre solos, o NVdf foi mais eficiente para ambas as variáveis, que o PVAd.

Villas Boas et al. (1993) também verificaram aumento na concentração do N-uréia na folha do milho de 3,6% e 4,6%, quando efetuada a substituição de 20 e 50% de uréia por sulfato de amônio, respectivamente. De acordo com Oliveira (2003), considerando que a uréia aplicada na superfície do solo proporciona uma baixa eficiência de aproveitamento de N pelo milho, em decorrência de perdas por volatilização de amônia, é possível que a sua substituição parcial ou total por sulfato de amônio aumente a eficiência da adubação nitrogenada em cobertura, contribuindo para que os ganhos em produtividade ocorram em doses menores de N aplicado.

4.3 Experimento conduzido no campo

Os dados de volatilização de amônia avaliada no terceiro e no sétimo dia após a aplicação dos tratamentos, bem como a volatilização total, a massa de 1000 grãos, produtividade, concentração de nitrogênio no tecido foliar e teor de proteína no grão são apresentados na tabela 8. A testemunha foi avaliada apresentando perda de NH_3 nula.

A perda de amônia avaliada no 10º e 14º dia após a adubação foi nula, portanto, são apresentadas as perdas ocorridas no terceiro e sétimo dia após adubação em cobertura.

Tabela 8 – Médias de massa de 1000 grãos e produtividade, teor de proteína nos grãos, nitrogênio nas folhas e volatilização de amônia no 3º, 7º dia e total após aplicação dos tratamentos em função de fontes e doses de adubos

Tratamento	Massa 1000 grãos	Produtividade	Proteína	N foliar	3º dia	7º dia	Volatilização total
	--- g ---	--- kg ha ⁻¹ ---	-----			%	-----
Testemunha	192,34	2907,61	9,84	2,10	0,00	0,00	0,00
Uréia	167,66	2777,50	11,34	2,45	8,83	3,88	12,71
Uréia + óleo	182,08	2463,19	11,07	2,34	8,17	3,01	11,18
100 + 0 (u. + s.a.)	193,39	2473,97	10,80	2,34	8,96	4,05	13,01
100 + 10 (u. + s.a.)	190,16	2495,76	10,53	2,40	5,67	3,37	9,04
100 + 20 (u. + s.a.)	181,87	2275,13	10,53	2,16	5,55	2,58	8,13
100 + 30 (u. + s.a.)	181,89	2823,79	10,66	2,40	14,83	8,09	22,92
100 + 40 (u. + s.a.)	189,91	2435,17	11,34	2,45	10,57	5,11	15,68
Uréia + inibidor	185,32	3154,23	11,35	2,38	2,63	1,66	4,29
Valor de F							
F blocos	2,17 ^{ns}	3,59*	0,05 ^{ns}	1,17 ^{ns}	9,28**	6,62**	15,46**
F tratamentos	1,40 ^{ns}	1,27 ^{ns}	1,08 ^{ns}	0,75 ^{ns}	241,31**	150,28**	382,33**
F Dose S.A.	0,61 ^{ns}	0,63 ^{ns}	0,48 ^{ns}	0,62 ^{ns}	185,88**	134,90**	311,62**
F Linear	0,51 ^{ns}	0,10 ^{ns}	0,63 ^{ns}	0,23 ^{ns}	191,86**	137,30**	323,53**
F Quadrático	1,50 ^{ns}	0,003 ^{ns}	1,26 ^{ns}	0,68 ^{ns}	49,88**	6,08**	52,64**
F Cúbico	0,34 ^{ns}	0,76 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,06 ^{ns}	349,48**	207,56**	552,60**
F Desvio	0,06 ^{ns}	1,67 ^{ns}	0,02 ^{ns}	1,50 ^{ns}	152,28**	188,67**	317,69**
Adicionais	2,18 ^{ns}	1,90 ^{ns}	1,68 ^{ns}	0,89 ^{ns}	296,71**	165,56**	311,37**
C.V. (%)	7,3	19	8,9	12,2	7,8	10,4	6,3

u. + s.a.: uréia + sulfato de amônio; * e **: significativo em nível de 5% e 1%, respectivamente pelo teste F; ns: não significativo em nível de 5% pelo teste F; Tratamentos adicionais: testemunha; uréia; uréia + óleo e uréia + inibidor.

Verifica-se que não houve diferença significativa dos tratamentos para massa de 1000 grãos, produtividade, teor de N foliar e teor de proteína nos grãos (Tabela 8), mesmo com as diferenças verificadas para perdas por volatilização. A baixa produtividade obtida se deve a ocorrência de veranico durante enchimento e a fase crítica de grãos, conforme pode ser observado na figura 2.

A falta de chuvas após aplicação dos tratamentos também influenciou a volatilização, já que uma chuva de 54 mm ocorreu na área no 8º dia após a aplicação dos tratamentos. Essa precipitação deve ter contribuído para a manutenção da umidade da palhada, facilitando a dissolução rápida da uréia e sua incorporação ao solo.

As perdas de N-NH_3 foram altas, chegando a aproximadamente 25%, além de terem sido maiores no terceiro dia após da aplicação dos tratamentos do que no sétimo dia, evidenciando que a hidrólise da uréia é um processo rápido (Tabela 8). Deanmead et al. (1990) e Cantarella et al. (1999) citam que as perdas de N-NH_3 por volatilização podem chegar a 94%.

Apesar das menores perdas por volatilização ocorridas no 3º e 7º dia com uso de inibidor, não houve diferença significativa dos tratamentos. O tratamento uréia + inibidor de urease apresentou as menores porcentagens, contudo, essa redução das perdas de N volatilizado não resultou em aumento da absorção do nutriente, já que não variou o teor de N foliar e o teor de proteína nos grãos, tampouco influenciou a produtividade do milho. Lara Cabezas et al. (1997) também verificaram que as diferenças de comportamento entre as fontes em termos de perda por volatilização não se refletiram sobre a produtividade do milho.

As altas perdas de N por volatilização de amônia nesse período foram favorecidas pela alta temperatura e baixa umidade relativa do ar (Figura 3), já que o experimento encontrava-se a campo nos meses de novembro e dezembro. Maiores temperaturas nos períodos mais quentes do ano podem potencializar as perdas de nitrogênio por volatilização, porque também favorecem a decomposição, proporcionando maiores quantidades de N mineral (N-NH_4) em relação ao total. Isso porque o N mineral está prontamente disponível para os microrganismos responsáveis pelo processo de nitrificação, ao passo que o N orgânico presente necessariamente passa primeiro pelo processo de mineralização para posterior nitrificação.

Outras variáveis ambientais como velocidade do vento e umidade do solo, têm grande influência sobre perdas de nitrogênio por volatilização (BYRNES, 2000). A constante renovação da camada limite é importante para um incremento na taxa de volatilização e, por isso, a velocidade do vento é apontada como um importante fator que afeta as perdas de N-NH_3 e que pode ser observado no trabalho de Thompson et al. (1990) e Sommer et al. (1991).

A distribuição irregular de chuvas durante o ciclo, especialmente nas fases de pendoamento e enchimento de grãos, prejudicando a produção de grãos (Figura 2). No ciclo da cultura, no estágio inicial a disponibilidade de chuva não afetou o desenvolvimento vegetativo, mas nos estádios seguintes florescimento e enchimento de grãos, a distribuição foi irregular, concentrando-se em determinados períodos o que afetou a produtividade.

A cultura do milho exige um mínimo de 600 mm de precipitação pluviométrica para que possa manifestar seu potencial produtivo, sem a necessidade de utilizar irrigação (FANCELLI, 2002).

Para Basso (2003), o principal fenômeno de perdas de nitrogênio durante os cultivos de milho e nabo forrageiro é a volatilização de amônia, favorecida pelo aumento de temperatura nos períodos de cultivo destas espécies.

De acordo com Moal et al. (1995), as perdas são de 83, 43 e 0% do total de N aplicado ao meio dia, no entardecer e próximo à meia noite, respectivamente. Já Beauchamp et al. (1982) também obtiveram as maiores perdas de N-NH₃ com aplicação próxima ao meio dia em comparação com o aplicado no início da manhã. As menores perdas de N-NH₃ com aplicação no início da manhã podem estar associadas com as menores temperaturas do solo neste horário, já que há necessidade de energia para o processo de volatilização (SOMMER et al., 1997).

Independentemente das perdas de amônia serem grandes ou pequenas, a maioria dos trabalhos mostram que essas ocorrem nas primeiras horas após a aplicação dos tratamentos (BLESS et al., 1991; MOAL et al., 1995; SOMMER et al., 1997; SUBAIR et al., 1999).

As maiores perdas de N-NH₃ nos primeiros dias após a aplicação dos tratamentos têm respaldo na literatura (THOMPSON et al., 1990; MOAL et al., 1995; SOMMER et al., 1997), mas ocorreram em percentuais inferiores, quando comparado ao trabalho de Lara Cabezas e Trivelin (1990). A explicação pode ser devido ao uso nesse trabalho de coletor semi-aberto estático, que subestima as perdas de N-NH₃.

Cantarella et al. (1999) observaram que as ocorrências de chuvas mantiveram baixo o nível de volatilização e concluíram que as taxas de perda eram mais acentuadas quando as chuvas não eram suficientes para incorporar a uréia ao solo. Também de acordo com Lara Cabezas et al. (1997), é mais importante o

umedecimento do solo depois da aplicação da uréia na superfície, do que a condição de umedecimento do solo no momento da aplicação.

Sommer et al. (2001) demonstraram uma correlação entre perdas N-NH_3 e a temperatura do ar imediatamente após a aplicação dos tratamentos, que nesse período do ano é alta.

Já para Thompson et al. (1990), a temperatura do ar parece ter um efeito direto sobre a volatilização de amônia logo após a aplicação de esterco suíno. Entretanto, por um período mais longo, Brunke et al. (1988) não encontraram alta correlação entre a temperatura e as perdas de amônia. Para os autores, a temperatura pode ter um efeito contrário sobre as perdas de amônia pela dificuldade de difusão do gás imposta pela crosta formada.

Volk (1959) verificou que a quantidade de amônia volatilizada aumentava em proporção maior que a dos acréscimos das doses, enquanto Wahhab et al. (1960) encontraram 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. De acordo com Rodrigues e Kiehl (1986), o enterrio do adubo a 5 cm de profundidade mostrou ser um método superior ao da incorporação a camada 0-5 cm. Essa diferença entre incorporar e enterrar já havia sido observada por Fenn e Kissel (1976), nesse caso para o sulfato de amônio.

A desproporcionalidade verificada entre perda e dose para a uréia aplicada talvez se deva à influência do fenômeno de retenção da amônia no solo: como a capacidade de retenção do solo é limitada, nas doses baixas a porcentagem retida é elevada, diminuindo à medida que a dose se eleva e o teor de amônia se aproxima do ponto de saturação do solo (LARA CABEZAS et al., 1997).

Lara Cabezas et al. (1997) verificaram que a produção foi diminuída em $19,3 \text{ kg ha}^{-1}$ de grãos por kg de N volatilizado. No presente trabalho, a maior fertilidade do solo supriu a cultura com maior quantidade de N-nativo, minimizando o efeito de N volatilizado.

A testemunha apresentou uma produtividade comparável às fontes de N. O N nativo do solo estaria compensando a menor eficiência de utilização dos adubos nitrogenados, que, em termos práticos, não afetou a produtividade.

Segundo Bremmer (1995), o risco de perdas gasosas por volatilização de amônia é particularmente alto em sistema plantio direto, nos quais a uréia é aplicada superficialmente, como é o caso do local do experimento.

Diversos autores, assim como Lara Cabezas e Yamada (1999), demonstraram com clareza que a aplicação da uréia em superfície na cultura do milho em condições de campo para sistema convencional e plantio direto é inconveniente, sendo importante incorporar a uréia para maximizar a rentabilidade. Cantarella et al. (1999) observaram perdas superiores a 50% do N aplicado em diversos tipos de solos para a cultura do milho em condições de campo.

As comparações estabelecidas entre fontes de nitrogênio, considerando a mesma dose de N aplicada, 140 kg ha^{-1} de N, foram avaliadas pelos contrastes não ortogonais (Tabela 9).

Tabela 9 – Contrastes não ortogonais analisados pelo teste de Bonferroni, com seus respectivos valores para massa de 1000 grãos e produtividade, teor de proteína nos grãos, nitrogênio nas folhas e volatilização de amônia no 3º e 7º dia de aplicação dos tratamentos em função de fontes e de adubos nitrogenados

Tratamento	C1	C2	C3	C4
Uréia	1	0	1	0
Uréia embebida em óleo	-1	1	0	1
Uréia+Sulfato de amônio ($100+40 \text{ kg ha}^{-1}$)	0	-1	0	0
Uréia com Inibidor urease	0	0	-1	-1
Massa 1000 grãos (g)	-14,42 ^{ns}	-7,83 ^{ns}	-17,66 ^{ns}	-3,24 ^{ns}
Produtividade (kg ha^{-1})	314,31 ^{ns}	28,02 ^{ns}	-376,73 ^{ns}	-691,04 ^{ns}
Proteína (%)	0,27 ^{ns}	-0,27 ^{ns}	-0,01 ^{ns}	-0,28 ^{ns}
N foliar (%)	0,11 ^{ns}	-0,11 ^{ns}	0,07 ^{ns}	-0,04 ^{ns}
3 dias (% N volatilizado)	0,66 ^{ns}	-2,40 ^{ns}	6,20 ^{tt}	5,54 ^{tt}
7 dias (% N volatilizado)	0,87 ^{tt}	-2,10 ^{ns}	2,22 ^{tt}	1,35 ^{tt}
Volatilização total (%)	1,53 ^{tt}	4,50 ^{ns}	8,42 ^{tt}	6,89 ^{tt}

^{tt}: significativo em nível de 1% pelo teste de Bonferroni e ns: não significativo em 5% pelo teste de Bonferroni.

Para todos os contrastes avaliados não houve diferença significativa na comparação entre as fontes para as variáveis: massa de 1000 grãos, produtividade,

teor de proteína nos grãos e teor de N no tecido foliar. Por outro lado, houve diferença significativa para os contrastes estabelecidos entre as fontes uréia x uréia com inibidor de urease (C3) e uréia embebida em óleo x uréia com inibidor de urease (C4), para a quantidade total de N-NH_3 volatilizada e aos 3 e 7 dias após a adubação de cobertura. O contraste uréia x uréia embebida em óleo (C1) foi significativo somente aos 7 dias de aplicação dos tratamentos.

No 3º dia após aplicação dos tratamentos, a perda por volatilização foi 6,20% superior com uso de uréia e de 2,22% no 7º dia em comparação a uréia com inibidor de urease, totalizando 8,42%. Para produtividade, esta fonte produziu 376,7 kg ha^{-1} de milho a mais em relação à uréia, entretanto, esta diferença não é significativa (Tabela 9).

Em comparação com a mistura (uréia + sulfato de amônio), esta fonte implicou numa perda de amônia de 5,54% e 1,35% superior a uréia com inibidor de urease, avaliada no 3º e 7º dia após adubação, respectivamente, com uma perda total de 6,89% (Tabela 9).

Na figura 7 são apresentadas as curvas de perdas de N-NH_3 avaliadas após o 3º e 7º dia de aplicação da adubação nitrogenada em cobertura, em função das doses de sulfato de amônio. A volatilização de N-NH_3 apresentou efeito cúbico em função das misturas de N como sulfato de amônio com 100 kg ha^{-1} de N como uréia. No terceiro dia, a adição de 9,25 kg ha^{-1} de N como sulfato de amônio implicou em menor quantidade de amônia volatilizada. A partir desta dose, ocorreu aumento da perda de N-NH_3 até adição de 33,33 kg ha^{-1} de N (Figura 7 a). Comportamento semelhante foi observado no sétimo dia. A adição de 8,49 kg ha^{-1} de N como sulfato de amônio proporcionou menor perda de N enquanto que adição de 32,64 kg ha^{-1} como sulfato de amônio maior perda de N-NH_3 (Figura 7 b).

A figura 8 apresenta a curva de perda total de N-NH_3 após a aplicação da adubação nitrogenada em cobertura, em função das doses de sulfato de amônio. A volatilização de N-NH_3 apresentou efeito cúbico em função das misturas de N como sulfato de amônio com 100 kg ha^{-1} de N como uréia. A adição de 9,00 kg ha^{-1} de N como sulfato de amônio implicou em menor quantidade de amônia volatilizada. A partir desta dose, ocorreu aumento da perda de N-NH_3 até adição de 33,13 kg ha^{-1} de N.

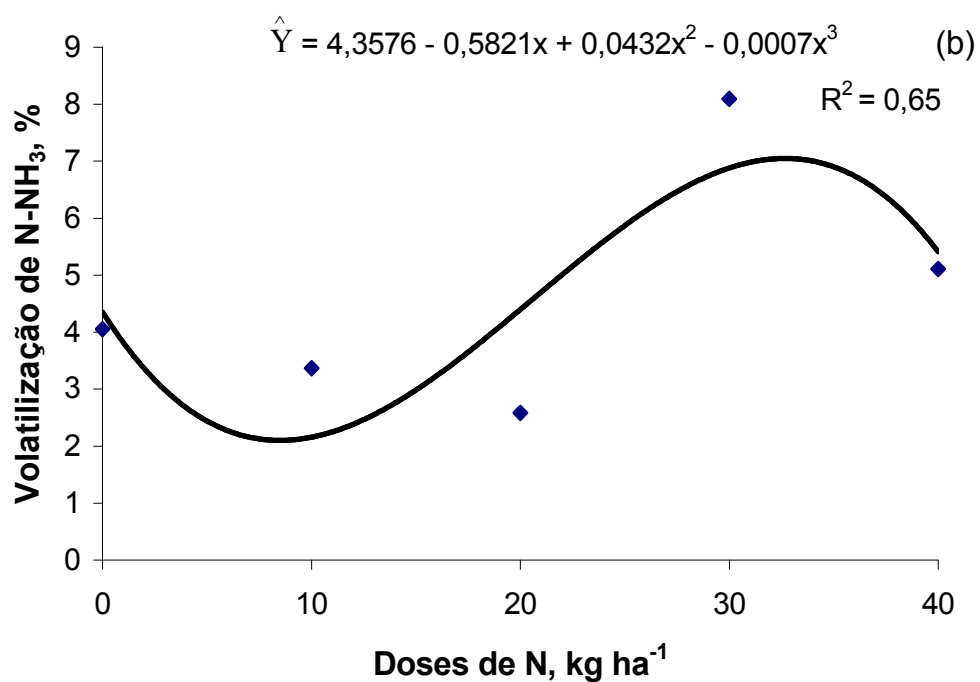
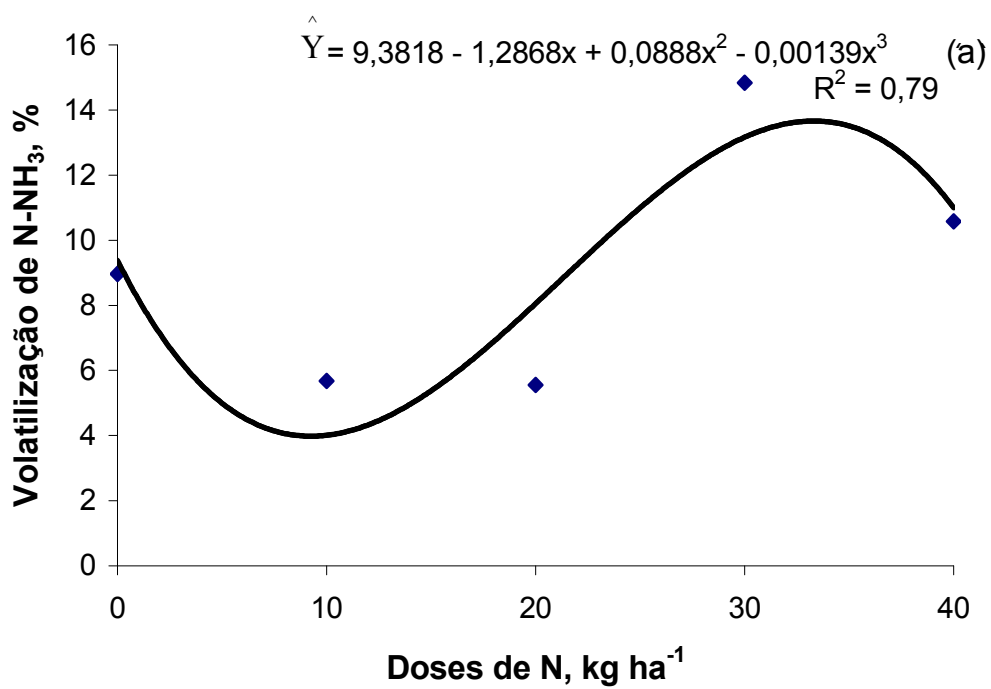


Figura 7 - Volatilização de N-NH₃ (%) em função de doses de N - Sulfato de amônio no terceiro dia (a) e no sétimo dia (b) após aplicação das misturas de uréia com sulfato de amônio.

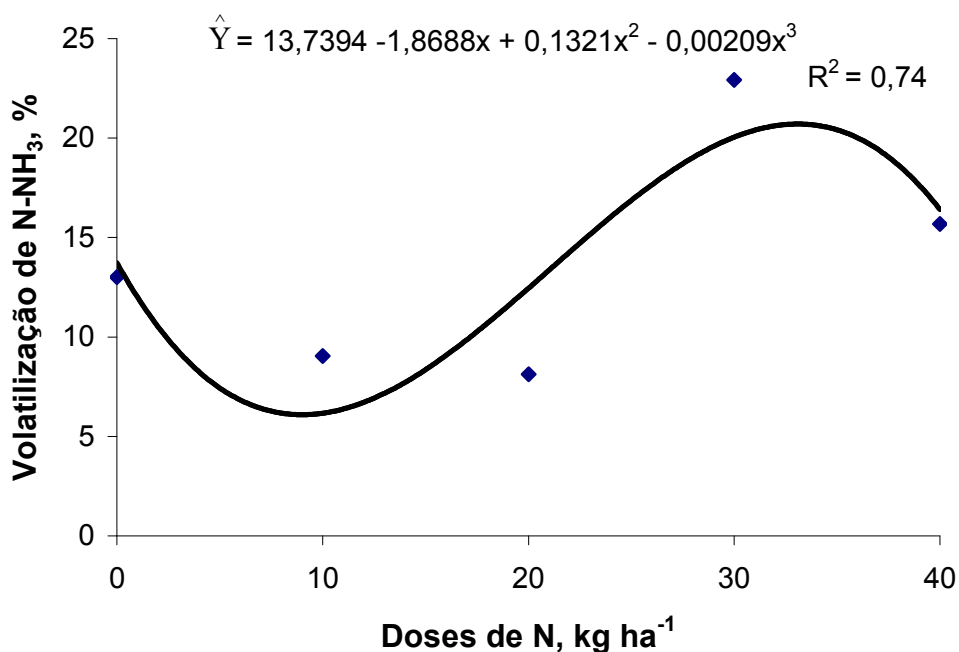


Figura 8 - Volatilização total de N-NH₃ (%) em função de doses de N - Sulfato de amônio após aplicação das misturas de uréia com sulfato de amônio.

Vitti et al. (2002) realizaram experimento em laboratório e observaram que a mistura de 50% de uréia com 50% de sulfato de amônio aplicada ao solo resultou em menor volatilização de amônia em relação às misturas com menores quantidades de sulfato de amônio e à aplicação exclusiva de uréia. Os mesmos autores atribuíram a menor perda ao efeito de controle de elevação de pH e à redução na quantidade de N-amídico proporcionados pela mistura.

Apesar da disponibilidade de chuva ter afetado o desenvolvimento da cultura do milho, os resultados evidenciam que a mistura de uréia com sulfato de amônio, na dose 10 kg ha⁻¹ de N, proporcionou redução da perda de N por volatilização, portanto, é uma prática que além de minimizar a perda de N fornece enxofre para a cultura do milho.

5 CONCLUSÕES

Estudo em laboratório e em casa de vegetação:

- A volatilização de amônia ocorreu até 8º dia após aplicação dos tratamentos.
- A textura do solo, bem como sua CTC e quantidade de matéria orgânica, influenciaram as perdas por volatilização de N-NH_3 , sendo maiores no solo arenoso (PVAd) do que no solo argiloso (NVdf).
- Perdas mais elevadas ocorreram para a fonte uréia em ambos os locais, enquanto que a embebição da uréia em óleo não implicou em redução da perda de N-NH_3 .
- Em ambos os solos a mistura uréia (100 kg ha^{-1} de N) + sulfato de amônio (40 kg ha^{-1} de N) contribuiu na redução das perdas de N-NH_3 . Estas perdas foram, em média, de 8% na avaliação conduzida em laboratório e de 18% no experimento em casa de vegetação.
- A uréia com inibidor de urease apresentou menores perdas e proporcionou um melhor aproveitamento do N.

Estudo a campo:

- Perdas totais de N-NH_3 da fonte uréia foi de 13% e de apenas 4% para uréia com inibidor de urease.
- A dose de sulfato de amônio em mistura com uréia que implicou em menor perda de N-NH_3 foi de 9 kg ha^{-1} de N.
- Devida à baixa disponibilidade de chuva, não houve diferença significativa dos adubos nitrogenados na produtividade de milho, mas a adubação de uréia com inibidor de urease proporcionou um incremento de 377 kg ha^{-1} de milho a mais em comparação a uréia.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALCARDE, J.C.; MALAVOLTA, E.; BORGES, A.L.; MUNIZ, A.S.; VELOSO, C.A.; FABRÍCIO, A.C.; VIEGAS, J.M. **Avaliação da higroscopicidade de fertilizantes e corretivos**. Revista Scientia Agrícola, v. 49, p. 137-144, 1992.

ANJOS, J.T. e TEDESCO, M.J. **Volatilização de amônia proveniente de dois fertilizantes nitrogenados em solos cultivados**. Científica, Jaboticabal, v. 4, p. 49-55, 1976.

ARAÚJO, L.A.N.; FERREIRA, M.E.; CRUZ, M.C.P. **Nitrogen fertilization to corn**. Pesquisa agropecuária brasileira, v.39, n.8, p.771-777. Arquivo capturado online e disponível em <http://www.scielo.br>. Acesso em 10 de Outubro de 2006.

Arquivo capturado on line e disponível em <http://www.coopavel.com.br>. Acesso em 10 de maio de 2006.

BASSO, C.J. **Perdas de nitrogênio e fósforo com aplicação no solo de dejetos líquidos de suínos**. UFSM, 2003. 125 p. (Tese de Doutorado).

BEAUCHAMP, E.G.; KIDD, G.E.; THURTELL, G. **Ammonia volatilization from liquid dairy cattle manure in the field**. Canadian Journal of Soil Science, v.62, n.1, p.11-19, 1982.

BLACK, A.S.; SHERLOCK, R.R.; SMITH, N.P. **Effect of urea granule size on ammonia volatilization from surface-applied urea**. Fert. Res., Hague, n. 11, p. 87-96, 1987.

BLESS, H-G.; BEINHAUER, R.; SATTELMACHER, B. **Ammonia emission from slurry applied to wheat stubble and rape in North Germany**. J. Agric. Sci., New York, v.117, n.1, p.225-231, 1991.

BOARO, C.S.F.; RODRIGUES, J.D.; PEDRAS, J.F.; RODRIGUES, S.D.; DELACHIAVE, M.E.A.; ONO, E.O. **Produção de matéria seca de feijoeiros submetidos a diferentes níveis de magnésio em solução nutritiva**. PAB, Pesquisa Agropecuária Brasileira, v. 32, n. 9, 1997.

BOUWMEESTER, R.J.B; VLEK, P.L.G.; STUMPE, J.M. **Effect of environmental factors on ammonia volatilization from a urea-fertilised soil**. Soil Science Society Am. J., Madison, v. 49, p. 376-381, 1985.

BRADY, N.C. **Natureza e propriedades dos solos: aspectos econômicos do enxofre e do nitrogênio dos solos**. Rio de Janeiro, p. 323-372, 1989.

BREMNER, J.M. **Recent research on problems in the use of urea as a nitrogen fertilizer**. Fert. Res., v. 42, p. 321 – 329, 1995.

BREMNER, J.M. e CHAY, H.S. **Evaluation of N-butyl phosphorotic triamide for retardation of urea hidrolisis in soil.** Soil Sci. Plant Anal, v. 35, p. 191-199, 1986.

BRUNETTO, P.A. **Produtividade do milho em função de diferentes fontes e modo de aplicação do nitrogênio em cobertura.** UNIOESTE, 2004. 31 p. (Monografia de Graduação).

BRONSON, K.F.; TOUCHTON, J.T.; HILTBOLD, A.E.; HENDRICKSON, L.L. **Control of ammonia volatilization with N- (n-butyl) thiofosphoric triamide in loamy sands.** Commum soil Sci Plant Anal, v. 20, p. 1439-1459, 1989.

BRUNKE, R.; ALVO, P.; SCHUEPP, P. e GORDON, R. **Effects of meteorological parameters on ammonia loss from manure in the field.** J. Environ. Qual., Madison, v. 17, n. 3, p. 431-436, 1988.

BUCKMAN, H. e BRADY, N.C. **Natureza e propriedades dos solos.** Rio de Janeiro: Bastos, 1968. 593 p.

BYRNES, B.H. **Liquid fertilizers and nitrogen solutions.** In: International Fertilizer Development Center. Fertilizer manual. Alabama, Kluwer Academic, p. 20-44, 2000.

CAMPOS, A.X.; TEDESCO, M.J. **Eficiência da uréia e do sulfato de amônio na cultura do milho (*Zea mays* L.).** Agronomia. Porto Alegre, v. 15, p. 119-125, 1979.

CANTARELLA, H.; RAIJ, B. Van. **Adubação nitrogenada no Estado de Sao Paulo.** In: *SIMPÓSIO SOBRE ADUBAÇÃO NITROGENADA NO BRASIL.* Ilhéus, CEPLA/Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 47-79, 1985.

CANTARELLA, H.; TABATABAI, M.A. **Volatilização de amônia de alguns fertilizantes nitrogenados aplicados a solos.** In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Belém, Resumos, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. p. 90-91, 1985.

CANTARELLA, H.; GALLO, P.B.; CAMARGO, A.P. **Modos de aplicação de fertilizantes nitrogenados em milho.** REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO, Guarapari. Resumos. Sociedade Brasileira Ciência Solo, p. 37-38, 1988.

CANTARELLA, H. **Adubação nitrogenada em sistema de cana crua.** STAB. Açúcar, Alccol Subpr., v. 16, p. 21-22, 1998.

CANTARELLA, H.; ROSSETO, R.; BARBOSA, W.; PENNA, M.J.; RESENDE, L.C.L. **Perdas de nitrogênio por volatilização da amônia e resposta da cana de açúcar à adubação nitrogenada, em sistema colheita cana sem queima prévia.** Congresso Nacional da Stab, Anais. Álcool Subpr., Londrina. p. 82-87, 1999.

CARTER, M.F.; VLEK, P.L.G.; TOUCHTON, J.T. **Agronomic evaluation of new ureaforms for flooded rice.** Soil Sci. Soc. Am., Madison, v. 50, p. 1055-1060, 1986.

CARTER, J.N.; BENNETT, O.L.; PERSSON, R.W. **Recovery of fertilizer nitrogen under field conditions using N-15.** Soil Sci. Soc., Madison, v. 31, p. 50-56, 1967.

COELHO, A.M.; FRANÇA, G.E.; BAHIA FILHO, A.F.C.; GUEDES, G.A.A. **Doses e métodos de aplicação de fertilizantes nitrogenados na cultura do milho sob irrigação**. Revista Brasileira Ciência do Solo, Campinas, v. 16, p. 61-67, 1992.

COELHO, A.M.; FRANÇA, G.E.; PITTA, G.V.E.; ALVES, V.M.C.; HERNANI, L.C. **Cultivo do milho: Nutrição e Adubação**. Comunicado técnico. Sete Lagoas: Ministério da agricultura pecuária e abastecimento. Capturado on line e disponível em <http://www.cnpms.embrapa.br/>. Acesso em 09 de outubro de 2006.

COLAÇO, W.; VICTÓRIA, R.L. **Desnitrificação em solos com adição de nitrato e glucose medida pela técnica de inibição da redução do óxido nitroso por acetileno**. Revista Brasileira Ciência do Solo, Campinas, v. 12, p. 81-86, 1988.

CONIN, T; CANTARELLA, H; DIAS, F.L.F; TRIVELIN, P.C.O. **Avaliação do efeito do inibidor da urease nbpt (n-(n-butil) tiofosfórico triamida) sobre a eficiência da uréia fertilizante em cana-de-açúcar**. XXVII Reunião Brasileira de Fertilidade do Solo e Nutrição de Plantas. Anais, Bonito, 2006.

CONNEL, J.H.; MEYER, R.D.; MEYER, J.L.; CARLSON, R.M. **Gaseous ammonia losses following nitrogen fertilization**. Calif. Agric., Berkeley, v. 33, p. 11-12, 1979.

CHRISTIANSON, C.B.; BYRNES, B.H.; CARMONA G. **A comparison of the sulfur and oxygen of phosphoric triamide urease inhibitors in reducing urea hydrolysis and ammonia volatilization**. Fertilizer Research, v. 26, p.21-27, 1990.

CUNNIFF, P. **Official methods of analysis of the Association of Official Analytical Chemists – AoAc**. 16 ed. Virginia, 1998.

DA ROS, C.O. **Disponibilidade de nitrogênio e produtividade de milho e trigo com diferentes métodos de adubação no sistema de plantio direto**. Ciência Rural, Santa Maria, v. 33, n. 5, p. 799-804, 2003.

DENMEAD, O.T. **Micrometeorological methods for measuring gaseous losses of nitrogen in the field**. Netherlands, v. 9, cap. 5, p. 133-157, 1983.

DENMEAD, O.T.; FRENEY, J.R.; JACKSON, A.V.; SMITH, J.W.B.;SAFFIGNA, P.G.; WOOD, A.W.; CHAPMAN, L.S. **Volatilization of ammonia from urea and ammonium sulfate applied to sugarcane trash in North Queensland**. Proc. Austr. Soc. Sugar Cane Technol., v. 12, p. 72-78, 1990.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro de Pesquisa Agropecuária do Oeste (Dourados, MS). **Milho: Informações Técnicas**. Dourados, p. 75-77, 1997. (EMBRAPA-CPAO, Circular Técnico, 5).

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro, 1999. 412 p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2ª ed. Rio de Janeiro, 2006. 306 p.

FANCELLI, A.L. **Tecnologia da produção do milho**. Passo Fundo, 2002, 96 p.

FENN, L.B.; HOSSNER, L.R. **Ammonia volatilisation from ammonium or ammonium-forming nitrogen fertilisers**. Soil Sci., NY, v. 1, p. 123-169, 1985.

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 Sci. Soc. Am. J., Madison, v. 40, p. 394-398, 1976.

FERNANDES, F.M.; KURAMOTO, C.M.; MELLO, L.M.M. **Resposta da cultura do milho (*Zea mays* L.) a adubação nitrogenada, sob semeadura direta na região do Cerrado**. Revista Plantio Direto. Passo Fundo, v. 54, p. 35, 1999.

FERGUSON, R.B.; KISSEL, D.E.; KOELLIKEL, J.K.; BASEL, W. **Ammonia volatilisation from surface-applied urea: effect of hydrogen ion buffering capacity**. Soil. Sci. Am. J., Madison, v. 48, p. 578-582, 1984.

FERGUSON, R.B.; KISSEL, D.E. **Effects of soil drying on ammonia volatilization surface-applied urea**. Soil Sci. Soc., Madison, v.50, p. 485-490, 1986.

FILLERY, I.R.; DE DATTA, S.K. **Ammonia volatilization from nitrogen sources applied to rice fields**. Soil Sci. Soc. Am. J., Madison, v. 50, p. 80-86, 1986.

GIANELLO, C.; BISSANI, C.A.; TEDESCO, M.J. **Princípios de fertilidade do solo**. Porto Alegre: Departamento de Solos de UFRGS, 1995. 276 p.

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

HARGROVE, W.L.; BOCK, B.R.; RAUNIKAR, R.A.; URBAN, W.J. **Comparison of a forced-draft technique to nitrogen-15 recovery for measuring ammonia volatilization field conditions**. Soil Sci. Soc., Madison, v. 51, p. 124-128, 1987.

IAPAR, Instituto Agrônômico do Paraná. **Cartas Básicas do Estado do Paraná**. Hermany Godoy, coord. Londrina, 1978, não paginado.

JANSSON, S.L.; PERSSON, J. **Mineralization and immobilization of soil nitrogen**. Nitrogen in agricultural soils, Madison, p. 229-252, 1982.

KIEHL, J.C. **Distribuição e retenção da amônia no solo após aplicação de uréia**. Revista Brasileira Ciência do Solo, Campinas, v. 13, p. 75-80, 1989.

KIEHL, J.C.; COBRA NETTO, A. **Capacidade de retenção de amônia de alguns solos do município de Piracicaba**. O Solo, Piracicaba, v. 65, p. 60-64, 1973.

KISSEL, D.E.; CABRERA, M.L. **Factors affecting urea hydrolysis**. In: BOCK, B.R.; KISSEL, D.E. **Ammonia volatilisation from urea fertilizers**. Alabama, National Fertilizer Development Center, p. 53-66, 1988.

KOELLIKER, J.K.; KISSEL, D.E. **Chemical equilibria affecting ammonia volatilization**. Alabama, National Fertilizer Development Center, p. 37-52, 1988.

KOLODJIEJ, A.F. **The chemistry of nickel-containing enzymes**. Prog. Inorg. Che, v. 41, p. 493-598, 1994.

LARA CABEZAS, W.A.R. **Calibração de um método para estimar perdas por volatilização de N-NH₃ de fertilizantes nitrogenados aplicados no solo**. Dissertação Mestrado. Piracicaba, Esc Sup. Agr. "Luiz de Queiroz", 1987. 202 p.

LARA CABEZAS, W.A.R.; TRIVELIN, P.C.O. **Eficiência de um coletor semi-aberto estático na quantificação de N-NH₃ volatilizado da uréia aplicada ao solo**. Revista Brasileira de Ciência do Solo, Campinas, v. 14, p. 345-352, 1990.

LARA CABEZAS, W.A.R.; TRIVELIN, P.C.D.; BOARETO, A.E. **Efeito do tamanho de grânulo e relação N/S da uréia aplicada em superfície na volatilização de amônia sob diferentes umidades iniciais do solo**. Revista Brasileira Ciência do Solo, Campinas, v. 16, p. 409-413, 1992.

LARA CABEZAS, W.A.R.; KORNDORFER, G.H.; MOTTA, S.A. **Volatilização N-NH₃ na cultura do milho: I Efeito irrigação e substituição parcial da uréia por sulfato de amônio**. Revista Brasileira Ciência Solo, Campinas, v. 21, p. 481-487, 1997.

LARA CABEZAS, W.A.R.; KORNDORFER, G.H.; MOTTA, S.A. **Volatilização de N-NH₃ na cultura do milho: II Avaliação de fontes sólidas e fluidas em sistemas plantio direto e convencional**. Revista Brasileira Ciência do Solo, Campinas, v. 21, p. 489-496, 1997.

LARA CABEZAS, W.A.R. **Comportamento dos adubos nitrogenados em clima e solo de Cerrado**. Revista Plantio Direto, maio/junho, p. 52-60, 1998.

LARA CABEZAS, W.A.R.; YAMADA, T. **Uréia aplicada na superfície do solo: um péssimo negócio**. Piracicaba: Potafós, 1999 (Informações Agronômicas, 86).

LARA CABEZAS, W.A.R.; TRIVELIN, P.C.O.; KORNDORFER, G.H.; PEREIRA, S. **Balanco da adubação nitrogenada sólida e fluida de cobertura na cultura do milho, em sistema plantio direto no triangulo mineiro (MG)**. Revista Brasileira Ciência do Solo, Campinas, v. 24, p. 363-376, 2000.

LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K. **Destino de uréia aplicada a um solo tropical**. Revista Brasileira Ciência do Solo, Campinas, v. 2, p. 40-44, 1978.

LUZ, P.H.C. **Determinação do ângulo de repouso de fertilizantes e corretivos**. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", 1997, 8p.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G.C.; OLIVEIRA, S.A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2 ed. Piracicaba: POTAFOS, 1997. 319p.

MANUAL INTERNACIONAL DE FERTILIDADE DO SOLO. 2^a ed. Piracicaba: POTAFOS, 1998.

MARIANO, F.A.S.; AMARAL FILHO, J.P.R.; FORNASIERI FILHO, D.; FARINELLI, R.; PENARIOL, F.G. **Influência do espaçamento, densidade populacional e adubação nitrogenada nos componentes fenológicos da cultura de milho.** Anais. XXIX Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Ribeirão Preto, 2003.

MARSHALL, V.G.; DEBELL, D.S. **Comparison of four methods of measuring volatilization losses of nitrogen following urea fertilization of forest soils.** Can. J. Soil Sci., Ottawa, v. 60, p. 549-563, 1980.

MASCARENHAS, H.A.A.; TANAKA, R.T.; WUTKE, E.B. **A cultura da soja geradora de nitrogênio assimilável para a produção de milho, arroz, trigo, sorgo e cana-de-açúcar.** Economia na adubação nitrogenada. 2003. 5 p.

MCINNES, K.J.; FERGUSON, R.B.; KISSEL, D.E.; KANEMASU, E.T. **Field measurements of ammonia loss from surface applications of urea solution to bare soil.** Agron. J. Madison, v. 78, p. 192-196, 1986.

MEIRELES, N.M.F.; LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K. **Absorção e lixiviação de nitrogênio em cultura de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.).** Revista Brasileira Ciência do Solo, Campinas, v. 4, p. 83-88, 1980.

MELLO, F.A.F; ARZOLLA, S; KIEHL, J.C.; BRITO NETO, J. **Efeito de doses e modos de aplicação de uréia na produção de milho.** Revista Brasileira Ciência do Solo, Campinas, v. 12, p. 269-274, 1988.

MOAL, J.-F.; MARTINEZ, J.; GUIZIOU, F.; COSTE, C-M. **Ammonia volatilization following surface-applied pig and cattle slurry in France.** J. of Agricultural Science, Madison, v. 125, n. 2, p. 245-252, 1995.

MOLL, R.H.; KAMPRATH, E.J.; JACKSON, W.A. **Analysis and interpretation of factors which contribute to efficiency utilization.** Agron. L., v.74, p. 56-565, 1982.

NÖNMIK, H. **Assessment of volatilization loss of ammonia from surface-applied urea on forest soil by ^{15}N recovery.** Pl. Soil, The Hague, v. 38, p. 589-603, 1973.

NÖNMIK, H. **The effect of pellet size on the ammonia loss from urea applied to forest soils.** Plant Soil., The Hague, v. 39, p. 309-318, 1973.

OLIVEIRA, J.M.S.; CAÍRES, E.F. **Adubação nitrogenada em cobertura para o milho cultivado após aveia preta no sistema plantio direto.** Acta Scientiarum Agronomy. Maringá, v.25, n.2, p. 351-357, 2003.

OVERREIN, L.N.; MOE, P.G. **Factors affecting urea hydrolysis and ammonium volatilisation in soil.** Soil Sci. Soc. Amer. Proc., Madison, v. 31, p. 57-61, 1967.

PROCHNOW, L.I.; VITTI, G.C. **Interpretação de análise química de terra para fins de adubação.** Associação Brasileira Educação Agrícola Superior, 1998.

RACHHPAL-SINGH NYE, P.H. **A model of ammonia volatilisation from applied urea.** Development of the model. J. Soil Sci., Oxford, v. 37, p. 9-20, 1986.

RAIJ, B.V.; CANTARELLA, H. **Milho para grãos e silagem**. In: RAIJ, B.V.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. Campinas: Instituto Agrônômico, p.56-59, 1996. (Boletim Técnico 100).

RAO, A.C.S.; SMITH, J.L.; PARR, J.F.; PAPENDICK, R.I. **Considerations in estimating nitrogen recovery efficiency by the difference and isotopic dilution methods**. *Fer. Res.*, v. 33, p. 209-217, 1992.

R.A.S. – Regra para Análise de Sementes. Brasília, p. 183-186, 1992.

REYNOLDS, C.M.; WOLF, D.C.; ARMBRUSTER, J.A. **Factors related to urea hydrolysis in soils**. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, v. 49, p. 104-108, 1987.

RODRIGUES, M.B.; KIEHL, J.C. **Volatilização de amônia após emprego de uréia em diferentes doses e modos de aplicação**. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 10, p. 37-43, 1986.

RODRIGUES, M.B.; KIEHL, J.C. **Distribuição e nitrificação da amônia proveniente da uréia aplicada ao solo**. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Campinas, v. 16, p. 403-408, 1992.

SÁ, J.C. de M. **Manejo da Fertilidade do Solo no Plantio Direto**. 1993. 96 p.

SANTOS, J.C.P. **Efeito do inibidor de nitrificação N-serve aplicado ao solo com diferentes fontes de nitrogênio, sobre a eficiência de uso do N pelo milho (*Zea mays* L.)**. Itaguaí, 1991. 168 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo), Universidade Federal do Rio de Janeiro.

SANZONNOWICZ, C.; AMABILE, R.F. **Adubação nitrogenada do girassol, no período chuvoso e na safrinha na região do cerrado**. Embrapa Cerrados, Planaltina, 2001. 2p. (Recomendação técnica, 30).

SAVANT, N.K.; DeDATTA, S.K. **Nitrogen transformations in wetland rice soils**. *Adv. Agron.*, New York, v. 35, p. 241-302, 1982.

SAVANT, N.K.; JAMES, A.F.; McCLEAN, G.H. **Effect of amounts and sequence of additions of urea and water on hydrolysis of surface-applied granular urea in unsaturated soils**. *Fertil. Res.*, v. 11, p. 231-234, 1987.

SENGIK, E.; KIEHL, J.C. **Controle da volatilização de amônia em terra tratada com uréia e turfa pelo emprego de sais inorgânicos**. *Revista Brasileira Ciência do Solo*, Campinas, v. 19, p. 321-326, 1995.

SENGIK, E.; KIEHL, J.C. **Efeito de resíduos orgânicos e do fosfato monocálcico na volatilização de amônia em terra tratada com uréia**. *Revista Brasileira Ciência do Solo*, Campinas, v. 19, p. 455-461, 1995.

SENGIK, E.; MARTINS, E.N.; SILVA, M.A.G. DA; PALANGANA, D.C. **Volatilização de amônia em amostras de um Nitossolo tratado com uréia e submetido a**

diferentes teores de água. Revista Scientia Agrária Paranaensis, v. 1, n. 2, p. 99-111, 2001.

SIDDIQUI, M.Y.; GLASS, A.D.M. **Utilization index: a modified approach to the estimation and a comparison of nutrient utilization efficiency in plants.** J. Plant Nutr., v. 4, n. 3, p. 289-302, 1981.

SILVA, A.J. da; LIMA JÚNIOR, M.A.; FERREIRA, N.C.M.; FRAGA, V. Da S. **Perdas de amônia por volatilização proveniente da uréia aplicada a solos dos trópicos úmidos.** Revista Brasileira Ciência do Solo, Campinas, v. 19, p. 141-144, 1995.

SMILEY, R.W.; PAPERDICK, R.I. **A portable injector for dispensing liquid anhydrous NH₃ in the field.** Soil. Sci. Soc. Am., Madison, v. 32, p. 729-731, 1968.

SOARES, M.A. **Influência de nitrogênio, zinco e boro e de suas respectivas interações no desempenho da cultura do milho (*Zea mays* L.).** Piracicaba, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, 2003, 92 p.

SOMMER, S.G.; OLSEN, J.E. **Effects of dry matter content and temperature on ammonia loss from surface-applied cattle slurry.** J. Environ. Qual., Madison, v. 20, n. 3, p. 679-683, 1991.

SOMMER, S. G.; FRIIS, E.; BACH, A.; SCHJIRRING, J. K. **Ammonia volatilization from pig slurry applied with trail hoses or broadcast to winter wheat: effects of developmental stage, microclimate, and leaf ammonia absorption.** Journal of Environmental Quality, Madison, v. 26, n. 4, p. 1153-1160, 1997.

SOMMER, S. G.; HUTCHINGS, N. J. **Ammonia emission from field applied manure and its reduction: invited paper.** European Journal of Agronomy, Amsterdam, v. 15, n. 1, p. 1-15, 2001.

STANGEL, P.J. **World nitrogen situation, trends, outlook, and requirements.** In: HANCK, R.D., ed, Nitrogen in crop production. Madison, American Society Agronomy, p. 23-54, 1984.

STANLEY, F.A.; SMITH, G.E. **Effect of soil moisture and depth application on retention of anhydrous ammonia.** Soil. Sci. Soc., Madison, v. 20, p. 557-561, 1956.

SUBAIR, S.; FYLES, J.W.; O'HALLORAN, I.P. **Ammonia volatilization fom liquid hog manure amended with paper products in the laboratory.** J Environ. Qual., Madison, v. 28, n. 1, p. 202-207, 1999.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análise de solo, plantas e outros materiais.** Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174 p.

TEIXEIRA, D.V. **Milho – Superando limites de Produtividade.** Divulgação técnica, Manah, ano XXII, nº 166, abr/mai/jun-2004. Disponível em <http://www.manah.com.br> Acesso em 26 de maio de 2005.

TEUSCHER, H.; ADLER, R. **El suelo y su fertilidad**. México, Companhia Editorial Continental, 1965, 510 p.

THOMPSON, R. B.; PAIN, B. F.; LOCKYER, D. R. **Ammonia volatilization from cattle slurry following surface application to grassland – II: influence of application rate, wind speed and applying slurry in narrow bands**. Plant and Soil, Dordrecht, v. 125, n. 1, p. 119-128, 1990.

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

UFV, Universidade Federal de Viçosa. **SAEG: Sistema para análises estatísticas**. Viçosa: UFRV, 1999 (versão 8.0).

VILLAS BOAS, R.L., FERNANDES, D.M.; BOARETTO, A.E.; TRIVELIN, P.C.O. **Efeito da uréia, do sulfato de amônio e da mistura de ambos na recuperação de N pelo milho**. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo. Goiânia, v.2, p. 37-38, 1993.

VILLAS BOAS, R.L. **Recuperação do nitrogênio da uréia pelo milho: efeito da mistura com sulfato de amônio, da dose e do modo de aplicação**. Piracicaba, Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, 1995. 128 p. (Tese de Doutorado).

VITTI, G.C.; FAVARIN, J.L.; RESENDE, L.O.; TREVISAN, W. **Manejo do nitrogênio em diversos sistemas de produção agrícola**. Piracicaba, Serrana, 1999. 338 p.

VITTI, G.C.; TAVARES JR, J.E.; LUZ, P.H.C.; FAVARIN, J.L.; COSTA, M.C.G. **Influência da mistura de sulfato de amônio com uréia sobre volatilização nitrogênio amoniacal**. Revista Brasileira Ciência Solo, v. 26, p. 663-671, 2002.

VLEK, P.L.G.; CARTER, M.F. **The effect of soil environment and fertiliser modifications on the rate of urea**. Soil Science, Baltimore, v. 36, p. 56-63, 1983.

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

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

ZONTA, E.P.; MACHADO, A.A. **Sanest: Sistema de Análise Estatística**. Piracicaba: Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, 1980.