

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**VOLATILIZAÇÃO DE AMÔNIA DE FERTILIZANTES
NITROGENADOS APLICADOS NAS CULTURAS DO TRIGO E
DO MILHO EM SISTEMA PLANTIO DIRETO NO SUL DO BRASIL**

**Fernando Viero
(Dissertação)**

UNIVERSIDADE FEDERAL DO RIO GRANDE DO SUL
FACULDADE DE AGRONOMIA
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

**VOLATILIZAÇÃO DE AMÔNIA DE FERTILIZANTES
NITROGENADOS APLICADOS NAS CULTURAS DO TRIGO E
DO MILHO EM SISTEMA PLANTIO DIRETO NO SUL DO BRASIL**

FERNANDO VIERO
Engenheiro Agrônomo (UFRGS)

Dissertação apresentada como
um dos requisitos à obtenção do
Grau de Mestre em Ciência do Solo

Porto Alegre (RS) Brasil
Março 2011

CIP - CATALOGAÇÃO INTERNACIONAL NA PUBLICAÇÃO
Biblioteca Setorial da Faculdade de Agronomia da UFRGS

V665v

Viero, Fernando

Volatilização de amônia de fertilizantes nitrogenados aplicados nas culturas do trigo e do milho em sistema plantio direto no sul do Brasil / Fernando Viero — Porto Alegre : F. Viero, 2011.

xiii, 61 f.; il.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2011.

1. Fertilidade do solo : adubação nitrogenada 2. Volatilização de Amônia 3. Plantio direto I. Título.

CDD: 631.42

FERNANDO VIERO
Engenheiro Agrônomo - UFRGS

DISSERTAÇÃO

Submetida como parte dos requisitos
para obtenção do Grau de

MESTRE EM CIÊNCIA DO SOLO

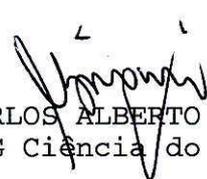
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Faculdade de Agronomia
Universidade Federal do Rio Grande do Sul
Porto Alegre (RS), Brasil

Aprovado em: 15.03.2011
Pela Banca Examinadora

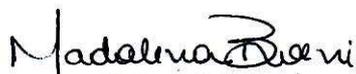
Homologado em: 16.05.2011
Por


CIMÉLIO BAYER
Orientador-PPG-Ciência do Solo


FLÁVIO A. O. CAMARGO
Coordenador do
Programa de Pós-Graduação em
Ciência do Solo


CARLOS ALBERTO BISSANI
PPG Ciência do Solo/UFRGS


MICHELY TOMAZI
PPG Ciência do Solo/UFRGS


MADALENA BOENI
IRGA


PEDRO ALBERTO SELBACH
Diretor da Faculdade
de Agronomia

*À Jean Marcel Viero (in memoriam),
pela sua força e perseverança.*

dedico este trabalho

AGRADECIMENTOS

Ao Professor Cimélio Bayer pela orientação, amizade e a confiança depositada em mim e neste trabalho.

À Pesquisadora Sandra Mara Vieira Fontoura, à Cooperativa Agrária e aos funcionários da Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária, por proporcionar a realização deste trabalho.

Ao Professor João Mielniczuk pelos ensinamentos e pelas histórias contadas durante os nos trabalhos na Estação.

Aos colegas da “salinha” do Manejo e do laboratório, Tiago, Graciele, Cecília, Daniela, Juliana, Renan, Ricardo, Genuir, Luis, Luisa, Mirla, Carla, Michely, Denice, Lucía e Emanuele, pela amizade e companheirismo de toda hora.

Aos colegas do Departamento de Solos e do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da UFRGS.

Ao técnico do Laboratório de Manejo e Biogeoquímica Ambiental, Luiz Antônio (O Magnata do C), e ao secretário Jader, pelos auxílios providenciais.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul pelo ensino de qualidade e gratuito.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de mestrado.

Aos professores do Departamento de Solos da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, pelos conhecimentos repassados.

Ao professor Paulo Cesar do Nascimento pela sua paciência nos ensinamentos durante a IC, e pela amizade.

À minha família que sempre esteve apoiando em tudo: Nona, Pai, Mãe, Cele, Jonei, Ebe, Carmen, Anézia, Darcy, Glória, Pedro, Lili, Augusto, Rita, Marcelo, Luíza, pela compreensão, estímulo, exemplos de vida.

Especialmente à Jakeline pelo amor, carinho, companheirismo dedicados nesses cinco anos de convivência.

Aos que de alguma forma ou de outra contribuíram para a concretização deste trabalho...

...meu sincero agradecimento.

VOLATILIZAÇÃO DE AMÔNIA DE FERTILIZANTES NITROGENADOS APLICADOS NAS CULTURAS DO TRIGO E DO MILHO EM SISTEMA PLANTIO DIRETO NO SUL DO BRASIL¹

Autor: Eng. Agr. Fernando Viero
Orientador: Prof. Cimélio Bayer

RESUMO

A volatilização de amônia é um importante fator influenciando a eficiência dos fertilizantes nitrogenados no sistema plantio direto (SPD). O objetivo da pesquisa foi avaliar a magnitude das perdas de N por volatilização de fontes nitrogenadas aplicadas nas culturas do trigo (2 safras) e do milho (2 safras) num Latossolo Bruno em SPD, na região Centro-Sul do Paraná (estudo 1), e verificar a influência da irrigação, antes e após a aplicação de N, nas perdas de N por volatilização na cultura do milho num Argissolo Vermelho em SPD na Depressão Central do Rio Grande do Sul (estudo 2). Diferentes fontes de N foram avaliadas (uréia, uréia com inibidor de urease, uréia com Cu e B, fertilizante de liberação lenta, fertilizante líquido, nitrato de amônio e sulfato de amônio), bem como diferentes manejos da uréia (aplicação pela manhã e a tarde, e incorporação mecânica). Doses de 150 e 50 kg ha⁻¹ de N foram aplicadas nas culturas do milho e do trigo, respectivamente, em Guarapuava e 180 kg N ha⁻¹ no milho na Depressão Central do RS. Em ambos locais, utilizou-se um delineamento de blocos casualizados. A volatilização foi avaliada com o auxílio de um coletor semi-aberto estático. Na região Centro-Sul do Paraná (Latosolo Bruno), as baixas temperaturas no inverno determinaram baixas perdas de N por volatilização para todos os fertilizantes nitrogenados (inferiores a 5 % do N aplicado na cultura do trigo) e foram independentes do regime de chuvas do período após aplicação do fertilizante. No verão, as perdas de N por volatilização foram semelhantes entre as duas regiões, e mantiveram-se em valores abaixo de 12 % do N aplicado na cultura do milho. Aproximadamente 90 % da perda de N por volatilização ocorreu nos 4 dias que sucederam a aplicação do fertilizante nitrogenado, sendo o regime de chuvas nesse período determinante das perdas totais de N. A irrigação somente demonstrou potencial de reduzir a volatilização de N apenas quando realizada após a aplicação do N, sugerindo que há uma influência favorável da água (~10 mm) na solubilização e deslocamento da uréia aplicada na palhada sobre o solo. A uréia aplicada logo após a irrigação (solo úmido) apresentou uma tendência de apresentar maior volatilização do que quando aplicada em solo seco. O horário da aplicação da uréia (manhã ou tarde) não teve praticamente influência nas perdas de N por volatilização.

¹ Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (61 p.) Março, 2011. Trabalho realizado com apoio financeiro do CNPq e da FAPA – PR.

VOLATILIZATION OF AMMONIA OF FERTILIZER NITROGEN APPLIED IN CROPS OF WHEAT AND CORN IN TILLAGE SYSTEM IN SOUTHERN BRAZIL¹

Author: Agr. Eng. Fernando Viero

Adviser: Prof. Cimélio Bayer

ABSTRACT

Ammonia volatilization is a determinant factor to low efficiency of nitrogen fertilizers in no-till agriculture. The research aimed to quantify the N losses by volatilization in no-till wheat and corn crops in a clayey Oxisol from South-Central region of Paraná State (study 1), and to evaluate the influence of sprinkle irrigation, applied before and after nitrogen fertilizers, on N losses by volatilization in a no-till corn crop in Central Depression region of Rio Grande do Sul State (study 2). Different N sources were evaluated (urea, urea with urease inhibitor, urea with Cu and Bo, slow-release fertilizer, liquid fertilizer, ammonium nitrate, and ammonium sulfate), as well as urea under different management (application at morning or at afternoon, mechanic incorporation, and with and without irrigation before and after fertilizer application). Nitrogen was applied at the rates of 50 and 150 kg ha⁻¹ for wheat and corn crops, respectively, in Guarapuava and 180 kg N ha⁻¹ in maize in the Central Depression of the RS. In both sites, a randomized block design, with three or four field replicates, was used. Ammonia volatilization was evaluated using a semi-open static collector. In the South-Center region of Paraná, the low air temperature in the winter determined insignificant losses of ammonia for all N sources (<5 % of applied N for wheat), and losses were independent of rainfall regime in the period immediately after N application. In summer, volatilization N losses were similar for the two sites and kept lower than 15 % of applied N in corn crop. About 90 % of total N loss occurred in the next 4 days after N input, and the rainfall regime in this short period driven accumulated ammonia volatilization. Irrigation only decrease ammonia volatilization when applied after N fertilizer, suggesting that there is a favorable influence of water (~10 mm) on the solubilization and detachment of urea applied on the straw. In addition, irrigation applied (moist soil) before N addition tended to increase ammonia volatilization in comparison with dry soil (without irrigation). The time of urea application (morning or afternoon) did not effect on ammonia volatilization, while a strong reduction of N losses were verified for incorporated urea.

¹ M.Sc. Dissertation in Soil Science – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul. Porto Alegre. (61 p.) March, 2011.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO GERAL.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	3
3. HIPÓTESES.....	8
4. OBJETIVOS.....	9
5. ESTUDOS REALIZADOS.....	10
5.1. ESTUDO 1. VOLATILIZAÇÃO DE AMÔNIA NAS CULTURAS DO TRIGO E DO MILHO EM PLANTIO DIRETO NO CENTRO-SUL DO PARANÁ.....	10
5.1.1. Resumo.....	10
5.1.2. Introdução.....	11
5.1.3. Material e Métodos.....	13
5.1.3.1. Localização e clima	13
5.1.3.2. Geomorfologia e solo	14
5.1.3.3. Tratamentos	15
5.1.3.4. Avaliação das perdas de N-NH ₃ por volatilização	17
5.1.3.5. Análise estatística	19
5.1.4. Resultados e Discussão.....	20
5.1.4.1. Precipitação e temperatura	20
5.1.4.2. Taxa de volatilização diária	21
5.1.4.3. Perdas acumuladas de N-NH ₃	25
5.1.5. Conclusões.....	34
5.2. ESTUDO 2. VOLATILIZAÇÃO DE AMÔNIA RELACIONADA AO USO DA IRRIGAÇÃO NO SISTEMA PLANTIO DIRETO NA DEPRESSÃO CENTRAL DO RIO GRANDE DO SUL	35
5.2.1. Resumo.....	35
5.2.2. Introdução.....	36
5.2.3. Material e Métodos.....	37
5.2.3.1. Localização e clima	37
5.2.3.2. Tratamentos e condução do experimento	38
5.2.3.1. Avaliação das perdas de N-NH ₃ por volatilização	39
5.2.3.2. Análise estatística	40
5.2.4. Resultados e Discussão.....	41
5.2.4.1. Condições meteorológicas	41

5.2.4.2. Taxa de volatilização diária	43
5.2.4.3. Perdas acumuladas de N-NH ₃	45
5.2.5. Conclusões.....	52
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	53
7. APÊNDICES.....	59

RELAÇÃO DE TABELAS

	Página
Tabela 1. Atributos químicos na camada de 0 – 10 cm do solo nos dois anos de estudo na Região Centro-Sul do PR	15
Tabela 2. Tratamentos conduzidos nos experimentos na cultura do trigo e do milho em plantio direto na região Centro-Sul do PR	16
Tabela 3. Formulação nitrogenada dos fertilizantes utilizados nas safras de inverno e verão	17
Tabela 4. Perda acumulada de N-NH ₃ (% do N aplicado) por volatilização decorrente da aplicação dos diferentes fertilizantes nitrogenados em cobertura na cultura do trigo e do milho em PD, em Guarapuava, PR	30
Tabela 5. Perdas acumuladas por volatilização de amônia, temperatura média e precipitação dos cinco dias após a aplicação da uréia na cultura do trigo e do milho nos dois anos de avaliação.....	32
Tabela 6. Coeficientes e regressão múltipla das perdas acumuladas da uréia (variável dependente), temperatura do ar e da precipitação pluviométrica (variáveis independentes) dos cinco primeiros dias após a aplicação dos fertilizantes nitrogenados em SPD no Centro-Sul do PR.....	33
Tabela 7. Perdas acumuladas de nitrogênio por volatilização no período de 10 dias após aplicação de diferentes fontes nitrogenadas de acordo com o sistema de irrigação aplicado no sistema de PD na região da Depressão Central do RS	49

RELAÇÃO DE FIGURAS

	Página
Figura 1. Localização do município de Guarapuava – Paraná.	14
Figura 2. Dados médios de precipitação e temperaturas, mínima, média e máxima em Entre Rios, Guarapuava, PR, no período compreendido entre 1976 e 2007. Fonte: Estação Meteorológica da FAPA.....	14
Figura 3. Foto ilustrativa do coletor de PVC utilizado nos estudos de volatilização de amônia.....	18
Figura 4. Dados de precipitação e temperaturas mínima, média e máxima no Distrito de Entre Rios, Guarapuava, PR, nos períodos de execução dos experimentos de inverno e verão nos anos de 2009 e 2010. Fonte: Estação Meteorológica da FAPA.	20
Figura 5. Taxas de volatilização diária registradas nos experimentos conduzidos na cultura do trigo na safra 2009 (a) e 2010 (b); e na cultura do milho na safra 2009/10 (c) e 2010/11 (d). Barras verticais indicam a diferença mínima significativa segundo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). NS: não significativo. Observação: as escalas dos eixos verticais referentes às safras de inverno (a e b) e de verão (c e d) são diferentes.	22
Figura 6. Perdas acumuladas de nitrogênio (% do N aplicado) por volatilização de amônia das diferentes fontes nitrogenadas aplicadas na cultura do trigo nas safras 2009 (a) e 2010 (b); e do milho nas safras 2009/10 (c) e 2010/11(d). Observação: as escalas verticais referentes às safras de inverno (a e b) e de verão (c e d) são diferentes.	26
Figura 7. Localização do município de Eldorado do Sul, situado na Depressão Central do RS.	38
Figura 8. Precipitação e temperatura mínima, média e máxima diária registrada durante o período condução do experimento. Fonte:	

Estação Meteorológica da Estação Experimental Agronômica – UFRGS.	41
Figura 9. Dados meteorológicos registrados durante o experimento na EEA – UFRGS. Velocidade do vento (a), evapotranspiração diária (b) e umidade relativa do ar (c). Fonte: Estação Meteorológica da Estação Experimental Agronômica – UFRGS.....	42
Figura 10. Taxa de volatilização diária das diferentes fontes nitrogenadas aplicadas no experimento conduzido sem irrigação (a), com irrigação anterior à aplicação (b) e com irrigação posterior à aplicação (c). Barras verticais indicam a diferença mínima significativa segundo o teste de Tukey ($p \leq 0,05$). NS: não significativo.	44
Figura 11. Perdas acumuladas de N por volatilização de amônia dos fertilizantes nitrogenados aplicados em cobertura sem irrigação (a), com irrigação anterior à adubação (b) e com irrigação posterior à adubação (c).	46

RELAÇÃO DE APÊNDICES

Página

Apêndice 1. Dados meteorológicos dos períodos de realização dos experimentos no município de Guarapuava – PR.....	60
Apêndice 2. Dados meteorológicos da Estação Experimental Agronômica do mês de dezembro 2010, Eldorado do Sul – RS.	61

1. INTRODUÇÃO GERAL

O milho e o trigo estão entre as principais culturas anuais do Brasil, ocupando posição de destaque sob o ponto de vista social e econômico. Estas culturas são cultivadas em cerca de 13 e 2,5 milhões de hectares, respectivamente (Conab, 2011). A Região Sul do Brasil produz milho em aproximadamente 4 milhões de hectares e trigo em 2 milhões, com rendimentos médios de lavoura de 5,1 e 2,7 toneladas por hectare, respectivamente. Esses rendimentos são baixos quando comparados com o potencial produtivo dessas culturas observados em condições experimentais, atingindo 16 t ha^{-1} de milho e 8 t ha^{-1} de trigo (Argenta et al., 2003; Pires et al., 2005).

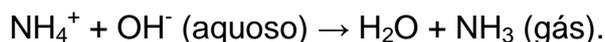
Dentre os fatores que afetam a produtividade dessas culturas está o manejo da adubação. Um dos elementos mais influenciados pelas condições ambientais e de manejo na produção de cereais é o nitrogênio (N), que apresenta uma dinâmica extremamente complexa. Essa dinâmica reflete diretamente sobre a eficiência do N aplicado via fertilizante mineral. A eficiência deste N oriundo de fertilizantes minerais é bastante variável; entretanto, raramente excede 50 % da quantidade aplicada (Lara Cabezas et al., 2000).

A uréia é a fonte de N mais utilizada nas culturas do trigo e do milho, mas pode apresentar diferentes perdas de N dependendo das condições climáticas regionais, mas também da diferente estação do ano (inverno e verão). A baixa eficiência desse fertilizante tem sido atribuída, entre outros fatores, à volatilização da amônia. Experimentos a campo na região Sudeste do Brasil têm registrado perdas equivalentes a 78 % do nitrogênio aplicado via fertilizante em cobertura (Lara Cabezas et al., 1997a). Por sua vez, na região Sul tem sido verificado perdas usualmente inferiores a 20 % (Duarte et al., 2007; Fontoura & Bayer, 2010).

A fim de aumentar a eficiência da adubação nitrogenada e reduzir as perdas por volatilização, várias alternativas têm sido apresentadas, desde a incorporação da uréia mecanicamente ao solo, até a sua substituição por outras fontes nitrogenadas que apresentam menor potencial de perda de N por volatilização. Entretanto, devido ao seu caráter regional onde fatores, principalmente climáticos, afetam a magnitude das perdas de N por volatilização, a adequação desses procedimentos, incluindo também a irrigação, deve ser avaliada em nível regional e para as diferentes culturas de inverno e de verão.

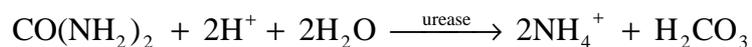
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

A volatilização de amônia consiste na passagem da amônia presente no solo à atmosfera, conforme a seguinte reação (Fenn & Kissel, 1973):



A amônia perdida por volatilização pode ser proveniente do amônio decorrente da mineralização da matéria orgânica ou do fertilizante aplicado, sendo que a flutuação do pH no solo está diretamente relacionado com este processo (Fenn & Kissel, 1973). Essa transformação é rápida, ocorrendo logo após a aplicação de N-uréia, que é o principal fertilizante nitrogenado aplicado na agricultura brasileira (Rodrigues & Kiehl, 1986; Lara Cabezas et al., 1997a). Após a aplicação, a uréia é rapidamente hidrolisada e os picos de emissão ocorrem em dois ou três dias após a aplicação (Duarte et al., 2007).

Quando aplicada no solo, a uréia hidrolisa a carbonato de amônio, que pode nitrificar, ser utilizado pelas culturas e microorganismos, fixar-se aos colóides do solo, ou ser perdida a partir do solo por volatilização ou lixiviação (Chin & Kroontje, 1963). Em solos com pH menor do que 6,3, que representa a expressiva maioria dos solos agrícolas brasileiros, a reação pode ser representada por (Ferguson et al., 1984):



A volatilização de nitrogênio amoniacal originado de fontes de N amídico (uréia) resulta da alcalinização da solução próxima ao grânulo durante

sua hidrólise, devido ao consumo de H^+ , catalisada pela enzima urease, e pela formação de íons bicarbonato (HCO_3^-) e hidroxila (OH^-) (Vitti et al., 2002). Assim, mesmo em solos ácidos, a uréia está sujeita a perdas de N por volatilização de NH_3 . Overrein & Moe (1967) observaram que o pH do solo ao redor dos grânulos de fertilizantes aumentou de 6,5 para 8,8 três dias após a aplicação de uréia.

A enzima urease, responsável pela hidrólise da uréia, é comum na natureza e está presente em microrganismos, plantas e animais. A urease presente nos solos é proveniente da síntese realizada por microrganismos e, provavelmente, também de origem em resíduos vegetais (Paulson & Kurtz, 1969). Os mesmos autores estimaram que 79 a 89 % da atividade da urease em solos se deve a enzimas extracelulares, adsorvidas aos colóides do solo, e a adição de pequenas quantidades de uréia induz a produção de mais urease pelos microrganismos.

A volatilização de $N-NH_3$ é favorecida pela maior atividade da urease, normalmente verificada na camada superficial de solos em PD (Barreto & Westerman, 1989), e pela presença da palhada a qual atua como um obstáculo para o contato do fertilizante com o solo (Keller & Mengel, 1986). Barreto & Westerman (1989) observaram que a atividade de urease em resíduos da cultura de trigo era quase trinta vezes maior que no solo, e em solos sob plantio direto a atividade da urease era quatro vezes maior do que em solos sob cultivo tradicional, demonstrando que a palha é a principal fonte de aumento da atividade desta enzima.

Portanto, a manutenção de palha em superfície e aporte contínuo de restos culturais no sistema plantio direto podem resultar em maior atividade da urease e aumento das perdas de $N-NH_3$. Entretanto, o efeito da palha na manutenção da umidade do solo e os maiores teores de matéria orgânica e de CTC da camada superficial de solos em PD são fatores importantes no aumento do tamponamento das variações de pH (Vieira et al., 2008) e, por sua vez, podem contribuir para a diminuição do potencial de volatilização de NH_3 (Ferguson et al., 1984). Segundo Clay et al. (1990), a cobertura do solo por resíduos reduz a temperatura máxima diária e aumenta o conteúdo de água no solo, ocasionando a redução nas perdas por volatilização da amônia.

A atividade da urease é dependente da umidade do solo e, segundo Volk (1959), pode ocorrer em uma ampla faixa de umidade do solo. Quando o solo está seco, a uréia pode permanecer estável, mas, conforme aumento da umidade do solo, a taxa de hidrólise aumenta até que a umidade atinja 20 %. A partir deste ponto a taxa de hidrólise é pouco afetada pelo teor de água. Assim, a aplicação de uréia em solo seco é preferível à sua adição em solo úmido (Lara Cabezas et al., 1997b) devido à permanência dos grânulos de uréia sobre solo ou sobre os resíduos. A aplicação de uréia em solo seco perde menos N-NH_3 , pois o processo de hidrólise enzimática da molécula de uréia não inicia. No entanto, um pequeno volume de precipitação ou mesmo o orvalho noturno pode desencadear essa reação.

A precipitação pode aumentar as perdas de N, pois adição de água ao solo permite que ocorra a dissolução da uréia e início da hidrólise. A chuva afeta também a diluição da alcalinidade gerada e, principalmente, influencia a umidade do solo que é um fator fundamental para a difusão do íon NH_4^+ no solo (Rodrigues & Kiehl, 1986). A ocorrência de um pequeno volume de precipitação permite que ocorra a hidratação e a hidrólise da uréia, mas a água no solo não é suficiente para que ocorra a difusão e contato do NH_4^+ com o solo, resultando em maiores perdas de NH_3 .

Por outro lado, a chuva tem o potencial para transporte de uréia e N amoniacal em profundidade no solo, aumentando a adsorção e reduzindo as perdas por volatilização. Segundo Kissel et al. (2004), em um solo franco-arenoso, 10 a 20 mm são considerados suficientes para incorporar a uréia e reduzir ou mesmo eliminar as perdas de NH_3 em áreas de solo descoberto. Porém, Lara Cabezas et al. (1997b) mediram perdas substanciais de NH_3 em área de milho em Plantio Direto mesmo após uma irrigação com 28 mm de água realizada após a aplicação da uréia em um Latossolo vermelho-escuro, muito argiloso.

Além da precipitação, as perdas de N por volatilização são muito dependentes de outros fatores climáticos, como a velocidade do vento, temperatura, umidade relativa do ar e evapotranspiração (Bouwmeester et al., 1985; Black et al., 1987; Al-Kanani et al., 1991; Sangoi et al., 2003). Huijsmans et al. (2003) observaram que o aumento da velocidade média do vento de 2 para 5 m s^{-1} resultou, em média, em aumento de 65 % na volatilização total

quando aplicado dejetos suíno em superfície. Da mesma forma, aumentando a temperatura média ambiente de 10 para 20 °C resultou em aumento da volatilização total de 54 % em média para os dejetos aplicados na superfície do solo. Ernst & Massey (1960) observaram que a 8 e a 16 °C as perdas de NH_3 foram reduzidas em 71 e 56 %, respectivamente, da observada a 32 °C.

A volatilização de amônia também está relacionada com alguns atributos químicos do solo, como pH e a capacidade de troca catiônica (Corstanje et al., 2008). O tipo de solo afeta o tamponamento do pH e a retenção do íon NH_4^+ na CTC do solo (Sangoi et al., 2003). Em experimento com dois tipos de solos, um Neossolo Quartzarênico (50 g kg^{-1} de argila) e um Nitossolo Vermelho (520 g kg^{-1} de argila), foi observado que a perda de N- NH_3 foi numericamente maior e o período de máxima volatilização ocorreu antes no solo arenoso. Estes resultados foram atribuídos à maior CTC e pelo maior conteúdo de matéria orgânica do solo argiloso (Sangoi et al., 2003).

A incorporação mecânica é uma prática eficiente em reduzir as perdas de N por volatilização (Overrein & Moe, 1967), e diversos trabalhos conduzidos a campo têm confirmado esta eficiência (Anjos, 1973; Silva et al., 1995; Fontoura & Bayer, 2010). A profundidade de incorporação que garante o controle de perdas depende da textura e CTC dos solos, da umidade e da direção do fluxo de água no perfil. Silva et al. (1995), observaram que, quando a uréia foi aplicada à superfície do solo, as perdas variaram entre 20 e 58 % do N aplicado e, quando incorporada à camada de 0-10 cm de profundidade, as perdas variaram de 1,3 e 7,7 % do N aplicado.

Outra alternativa para a redução das perdas de N por volatilização de amônia é a utilização de fertilizantes nitrogenados menos suscetíveis à esse processo. Dentre essas fontes de N, o sulfato de amônio $[(\text{NH}_4)_2 \text{SO}_4]$ e o nitrato de amônio $[\text{NH}_4\text{NO}_3]$ destacam-se pela sua eficiência na redução da volatilização de NH_3 quando aplicado em superfície (Lara Cabezas et al., 1997b), a qual se deve à reação ácida destes fertilizantes no solo, e da presença dos ânions NO_3^- e SO_4^- , que atuam como íons acompanhantes e favorecem o deslocamento vertical do NH_4^+ no solo (Lara Cabezas et al., 1997a, b).

Em estudos utilizando diferentes fontes nitrogenadas foram registradas perdas de 29,3, 11,5 e 0,3 % do N aplicado na forma de uréia, Uran (nome

comercial de fertilizante líquido) e nitrato de amônio, respectivamente, em pastagens (Volk, 1959). Em experimento conduzido a campo em PD, Fontoura & Bayer (2010) verificaram, na média de 4 anos, perdas de 12,5; 13,8; 8,6 e 1 % do N aplicado na forma de uréia, fertilizante de liberação lenta (N protegido por dupla camada organo-mineral de origem marinha), fertilizante líquido (solução de uréia e nitrato de amônio) e nitrato de amônio, respectivamente.

Inibidores de urease são utilizados, geralmente, em fontes de N que apresentam alto potencial de perdas por volatilização, por exemplo, a uréia, e que são aplicados em situações nas quais o manejo não permite a incorporação do produto ao solo, por exemplo, em lavouras cultivadas em plantio direto, pastagem, etc (Cantarella et al., 2008). A adição de inibidor de urease permite um maior tempo para que o fertilizante seja incorporado ao solo pela chuva, sem que ocorram perdas significativas de N. Alguns estudos têm relatado a eficiência na redução das perdas de N-NH₃ quando adicionado inibidor de urease (NBPT) [N-(n-butyl) thiophosphoric triamide] à uréia. As perdas foram de 2,6 e 2,5 % do N aplicado quando aplicado em solo saturado e úmido, respectivamente, na cultura do arroz, representando uma redução de aproximadamente 85 % em relação à uréia (Scivittaro et al., 2010). Rozas et al. (1999) registraram perdas inferiores a 1 % do N aplicado; Pereira et al. (2009) verificaram reduções de, aproximadamente, 50 % nas de volatilização em relação à uréia comum.

3. HIPÓTESES

- Nas condições de temperatura amena do Centro-Sul do Paraná e da Depressão Central do Rio Grande do Sul, as perdas de N por volatilização de amônia quando da aplicação de uréia no sistema plantio direto são baixas.

- A volatilização de amônia no Centro-Sul do Paraná é menor na cultura do trigo (inverno) do que na cultura do milho (verão) e independe do regime de chuvas e do tipo de fertilizante nitrogenado, devido às baixas temperaturas.

- As menores perdas de N por volatilização podem ser alcançadas com a incorporação da uréia ao solo e com o uso de inibidor de urease.

- A irrigação é eficiente em mitigar a volatilização somente se aplicada posteriormente à adubação nitrogenada.

4. OBJETIVOS

- Mensurar as perdas de N por volatilização de amônia de diferentes fontes nitrogenadas no sistema plantio direto em ambientes climáticos distintos, no Centro-Sul do Paraná e na Depressão Central do Rio Grande do Sul.

- Avaliar a eficiência da irrigação aplicada posteriormente à adubação nitrogenada na redução das perdas de N por volatilização na cultura do milho na Região da Depressão Central do RS.

5. ESTUDOS REALIZADOS

5.1. ESTUDO 1. VOLATILIZAÇÃO DE AMÔNIA NAS CULTURAS DO TRIGO E DO MILHO EM PLANTIO DIRETO NO CENTRO-SUL DO PARANÁ

5.1.1. Resumo

A presença de resíduos culturais na superfície dos solos em plantio direto (PD) pode intensificar a volatilização de amônia quando da aplicação dos fertilizantes nitrogenados em sistemas de produção de cereais. O presente estudo visou avaliar a magnitude das perdas de N por volatilização nas culturas do trigo e do milho num Latossolo Bruno sob PD no Centro-Sul do PR. Diferentes fontes de N (uréia, uréia com inibidor de urease, uréia com B e Cu, fertilizante de liberação lenta, fertilizante líquido, nitrato de amônio e sulfato de amônio) e de manejo da uréia (fertilizante aplicado pela manhã ou a tarde, e incorporado) foram avaliados em experimento conduzido por dois anos, segundo um delineamento de blocos casualizados, com quatro repetições. As perdas de N por volatilização foram avaliadas utilizando um coletor semi-aberto estático aos 1, 3, 5, 9/10 e 19/20/21 dias após a aplicação dos fertilizantes. No inverno, as perdas foram baixas para todas as fontes nitrogenadas as quais não se distinguiram devido as baixas temperaturas. No verão, as taxas de volatilização foram maiores do que no inverno, com destaque para uréia, embora as perdas (< 15 % do N aplicado) sejam muito inferiores às verificadas em regiões mais quentes do Brasil. Nessa condição de maiores temperaturas do verão, o regime de chuvas foi essencial em relação às perdas de N, e a ocorrência de chuvas nos primeiros quatro dias após a aplicação de N promoveu a redução das perdas de N por volatilização, ao contrário do que verificou-se no inverno, quando as perdas de N foram independentes do regime de chuvas. Enquanto no inverno, não se justifica a substituição da uréia por outra fonte alternativa de N, em anos com verão seco, a uréia com inibidor de urease podem ser utilizados visando reduzir o risco de perdas de N quando da não ocorrência de chuvas. Com exceção da fonte de N de liberação lenta que não demonstrou potencial de reduzir as perdas de N por volatilização, a utilização de fontes como o sulfato de amônio, fonte líquida e nitrato de amônio deverá ser avaliada economicamente devido ao seu maior custo por unidade de N e, possivelmente, deverão ser restritas a verões secos.

5.1.2. Introdução

O milho e o trigo estão entre as principais culturas de grãos produzidas no Brasil. O milho ocupa uma área de aproximadamente 13 milhões de hectares, com uma produtividade média de 5,1 toneladas por hectare. O trigo, com mais de 90 % da área cultivada em Sistema Plantio Direto (SPD), ocupa uma área de aproximadamente 2 milhões de hectares com uma produtividade média de 2,7 toneladas por hectare (Conab, 2011). Essas médias de rendimentos são muito baixas, comparadas com o rendimento potencial dessas culturas. Altos rendimentos somente são obtidos quando, em condições ambientais favoráveis, é realizado o suprimento adequado de fertilizantes, dentre eles o nitrogênio (N), que normalmente é realizado por adubação em cobertura na superfície do solo (Fontoura & Bayer, 2008).

O principal fertilizante nitrogenado utilizado, tanto nas culturas de verão, como nas de inverno, é a uréia, que tem se mostrado ser a fonte mais viável economicamente, pelo seu custo mais baixo por unidade de nutriente e sua disponibilidade, tornando-se a fonte de N mais competitiva, particularmente em situações onde as expectativas de perdas por volatilização são mais baixas, como nos meses mais secos e frios (Cantarella et al., 2008).

Entretanto, diversos estudos têm demonstrado uma baixa eficiência na adubação nitrogenada devido às elevadas perdas de N dos fertilizantes por volatilização de amônia, que é uma das transformações do N no solo que mais contribui para a baixa recuperação de N pelas culturas (Sangoi et al., 2003). Perdas de nitrogênio por volatilização, que variam de 35 a 78 % do N aplicado (Lara Cabezas et al., 1997a; Costa et al., 2003; Lara Cabezas & Souza, 2008; Pereira et al., 2009), têm sido registradas em experimentos a campo, na região Sudeste do Brasil, conduzidos sob plantio direto.

A presença de resíduos deixados sobre o solo em áreas conduzidas sob SPD pode influenciar as perdas de N-NH₃. Os resíduos podem promover um aumento na concentração e a atividade da urease, enzima presente no solo e nos resíduos vegetais, acarretando maiores perdas de N por volatilização de amônia. Por outro lado, a cobertura do solo pode diminuir a temperatura e a perda de umidade por evaporação (Bragagnolo & Mielniczuk, 1990), além de

aumentar a CTC do solo (Souza & Alves, 2003), condições essas que não favorecem a transformação do N mineral do solo em amônia.

A volatilização varia muito em função das condições climáticas, principalmente temperatura e precipitação (Al-Kanani et al., 1991; Huijsmans et al., 2003; Sangoi et al., 2003). Regiões com temperaturas mais elevadas, como é o caso da região central do Brasil, o potencial de perdas de nitrogênio por volatilização é maior, pois, nessas condições a atividade microbiana é elevada, o que acelera o processo de transformação da uréia. No entanto, esse processo decresce rapidamente com a redução da temperatura (Ernst & Massey, 1960).

Em condições de baixa precipitação, a solubilização da uréia pode ocorrer, porém a difusão do N no perfil do solo é baixa, aumentando a perda por volatilização (Bouwmeester et al., 1985). No entanto, em regiões nas quais as precipitações são elevadas, como ocorre no verão do Sul do Brasil, os fertilizantes nitrogenados são solubilizados e difundidos no perfil do solo, permanecendo na forma amoniacal e adsorvidos às partículas do solo, reduzindo a volatilização da amônia (Ferguson et al., 1984).

A incorporação mecânica do fertilizante nitrogenado é uma prática de manejo eficiente no controle das perdas de N por volatilização (Overrein & Moe, 1967; Silva et al., 1995). Apesar de a incorporação ser tecnicamente vantajosa na redução da volatilização de NH_3 , outros aspectos devem ser considerados, como o seu alto custo e baixo rendimento operacional (Fontoura & Bayer, 2010). A incorporação dos fertilizantes também pode se dar pela água da chuva ou mesmo pela irrigação. Assim, o uso da irrigação após a aplicação dos fertilizantes pode traduzir-se numa estratégia de manejo para minimizar a perda de N por volatilização. Segundo (Kissel et al., 2004) as perdas de N por volatilização podem ser reduzidas para menos de 1 % do N aplicado na forma de uréia, quando realizada chuva simulada imediatamente após a adubação.

A utilização de fontes nitrogenadas menos suscetíveis à perda de N por volatilização também é uma forma de aumentar a eficiência dos fertilizantes nitrogenados. De acordo com Campos (1976), tanto o nitrato, como o sulfato de amônio apresentam perdas negligenciáveis de N por volatilização. O uso de fertilizante nitrogenado protegido por dupla membrana organo-mineral que permite a liberação gradual do nutriente, a adição de inibidor de urease à uréia

e a utilização de solução líquida de uréia e nitrato de amônio têm sido difundidos como alternativas para a adubação nitrogenada em cobertura em diversas culturas. No entanto, a campo, nem todos têm demonstrado serem eficientes no controle das perdas de nitrogênio por volatilização (Fontoura & Bayer, 2010). De acordo com alguns estudos, a adição de inibidor de urease à uréia tem demonstrado ser eficiente na redução das perdas N por volatilização (Cantarella et al., 2008; Pereira et al., 2009; Scivittaro et al., 2010).

O objetivo deste estudo foi quantificar as perdas de N de diferentes fontes nitrogenadas, por volatilização da amônia, aplicadas em cobertura no sistema plantio direto, no período de inverno e de verão na Região Centro-Sul do Paraná, nas culturas do trigo e do milho.

5.1.3. Material e Métodos

5.1.3.1. Localização e clima

O presente estudo foi desenvolvido na Estação Experimental da Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária (FAPA) da Cooperativa Agrária Mista Entre Rios Ltda., localizada no Distrito de Entre Rios, Município de Guarapuava, Paraná (Figura 1).

O município de Guarapuava, região Centro-Sul do Paraná, está situado no terceiro planalto fisiográfico do Paraná, numa altitude de 800 a 1200 m. O clima da região segundo a classificação climática de Köppen é subtropical úmido – Cfb, sem estação seca durante o ano e com geadas severas e frequentes. A temperatura média anual é de 16,8°C, com uma variação de 20,5 a 12,5°C entre as temperaturas médias mensais, respectivamente, nos meses de janeiro e julho. A precipitação média anual é de 1955 mm, com variações médias mensais de 98 a 218 mm, respectivamente, para os meses de agosto e outubro (Figura 2).



Figura 1. Localização do município de Guarapuava – Paraná.

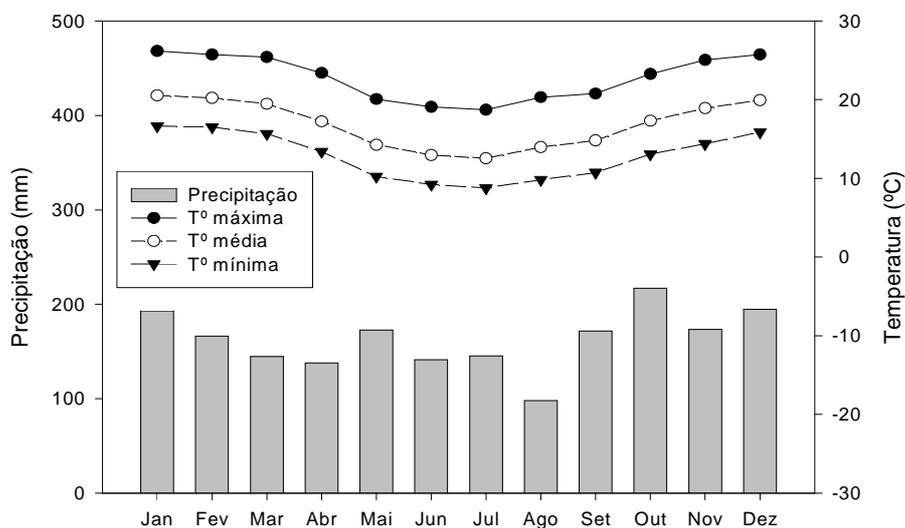


Figura 2. Dados médios de precipitação e temperaturas, mínima, média e máxima em Entre Rios, Guarapuava, PR, no período compreendido entre 1976 e 2007. Fonte: Estação Meteorológica da FAPA.

5.1.3.2. Geomorfologia e solo

Os solos dessa região são originados principalmente de rochas eruptivas da formação Serra Geral, com predominância de basalto. Os Latossolos são predominantes, em especial o Latossolo Bruno aluminico (Embrapa, 2006), argiloso, profundo, bem drenado, com alta saturação por alumínio e baixa saturação por bases em sua condição natural, associado ao

relevo suave ondulado. Neste solo, observa-se na fração argila (610 g kg⁻¹) a ocorrência de aproximadamente 70 g kg⁻¹ de óxidos de ferro (com aproximadamente 80 % de goethita), e 540 g kg⁻¹ de caulinita + gibbsita (com aproximadamente 74 % de gibbsita) (Inda Junior et al., 2007). Os atributos químicos da camada de 0 - 10 cm nos diferentes anos de estudo são fornecidos na tabela 1.

Tabela 1. Atributos químicos na camada de 0 – 10 cm do solo nos dois anos de estudo na Região Centro-Sul do PR

Ano	C	pH ¹	Al + H	Al	Ca	Mg	K	P	T ²	V
	g dm ⁻³		----- cmol _c dm ⁻³ -----					mg dm ⁻³	cmol _c dm ⁻³	%
2009										
TRIGO	38,2	5,5	5,4	0,0	6,8	3,0	0,73	17,1	15,9	66,4
MILHO	30,4	6,0	3,7	0,0	6,7	3,6	1,14	8,2	15,1	75,5
2010										
TRIGO	34,7	5,4	5,4	0,0	6,3	3,0	0,95	18,1	15,6	65,7
MILHO	38,2	6,1	3,2	0,0	7,1	3,9	0,41	16,9	14,6	78,2

¹ CaCl₂ 0.05 mol L⁻¹, ² CTC pH 7,0

5.1.3.3. Tratamentos

Esse estudo consistiu de dois experimentos, conduzidos por duas safras consecutivas, na cultura do trigo e do milho, em sistema plantio direto, com a aplicação de diferentes fertilizantes nitrogenados. Os tratamentos utilizados nos experimentos estão esquematizados na tabela 2. O delineamento utilizado foi de blocos ao acaso e os tratamentos foram aplicados em parcelas, com quatro repetições.

Todos os tratamentos, tanto na cultura do trigo quanto na cultura do milho, foram implantados no início da manhã. A exceção foi o tratamento com uréia aplicada à tarde, no qual o fertilizante foi aplicado no final da tarde.

Tabela 2. Tratamentos conduzidos nos experimentos na cultura do trigo e do milho em plantio direto na região Centro-Sul do PR

Cultura	Ano/Safra	
	2009	2010
Trigo (50 kg N ha ⁻¹)	Testemunha	Testemunha
	Uréia aplicada pela manhã	Uréia aplicada pela manhã
	Uréia com inibidor de urease	Uréia aplicada à tarde
	Fertilizante de liberação lenta	---
	Fertilizante líquido	Fertilizante líquido
	Nitrato de amônio	Nitrato de amônio
	Sulfato de amônio	Sulfato de amônio
Milho (150 kg N ha ⁻¹)	Testemunha	Testemunha
	Uréia aplicada pela manhã	Uréia aplicada pela manhã
	Uréia aplicada à tarde	Uréia aplicada à tarde
	Uréia com boro e cobre	Uréia incorporada
	Uréia com inibidor de urease	Uréia com inibidor de urease
	Nitrato de amônio	Nitrato de amônio
	Sulfato de amônio	Sulfato de amônio

A dose de fertilizante aplicado no trigo foi de 50 kg de N ha⁻¹ e no milho de 150 kg de N ha⁻¹. A quantidade de fertilizante aplicado nos tratamentos foi ajustada de acordo com o teor de N de cada fertilizante, conforme tabela 3.

A uréia é um fertilizante que pode ser utilizado tanto para aplicação na semeadura ou em cobertura, e pode ser usada em mistura de fertilizantes (seco ou líquido). A grande vantagem da uréia em relação aos outros fertilizantes nitrogenados é o alto teor de N (45-46%). À uréia também são adicionados alguns produtos que visam à redução de perdas de N por volatilização, por exemplo, inibidor de urease AGROTAIN (AGROTAIN International LLC), com NBPT (N-butil triamida tiofosfórico) como o ingrediente ativo. Fertilizantes nitrogenados recobertos com polímero organo-mineral de origem marinha visam a liberação lenta de nutrientes para o ambiente convertendo lentamente o N do fertilizante para amônio ou nitrato. Sua liberação é limitada principalmente pela temperatura e pela umidade.

O fertilizante líquido é um polímero solúvel de uréia e de nitrato de amônio, com N prontamente disponível. O nitrato de amônio é um sal inodoro que pode ser aplicado em superfície ou incorporado ao solo e contém em sua formulação, tanto nitrato como amônio. O sulfato de amônio é um fertilizante solúvel, fonte prontamente disponível de N e enxofre (S). A utilização de sulfato de amônio inclui um índice relativamente alto de sal e um maior potencial de acidificação por unidade de N aplicado que qualquer outra fonte contendo amônio.

Tabela 3. Formulação nitrogenada dos fertilizantes utilizados nas safras de inverno e verão

Fertilizante	N-NH ₂	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻	Total
	----- % -----			
Uréia*	45,0	-	-	45,0
Fertilizante de liberação lenta	19,0	4,0	-	23,0
Fertilizante líquido	14,0	9,0	9,0	32,0
Nitrato de amônio	-	17,0	17,0	34,0
Sulfato de amônio	-	26,0	-	26,0

* Uréia aplicada pela manhã e à tarde, uréia incorporada, uréia com inibidor de urease e uréia com boro e cobre.

5.1.3.4. Avaliação das perdas de N-NH₃ por volatilização

Para a avaliação da volatilização de N-NH₃ utilizou-se coletor do tipo semi-aberto estático descrito por Nömmik (1973), com alterações propostas por Lara Cabezas & Trivelin (1990). As câmaras coletoras consistem de um cilindro de acrílico transparente com 0,15 m de diâmetro e 0,35 m de altura, sobre o qual é disposta uma proteção visando evitar a incidência de chuva no interior da câmara (Figura 3) (Da Ros et al., 2005). Estas câmaras foram instaladas sobre bases de cloro polivinil (PVC) previamente inseridas a 2,5 cm de profundidade no solo.



Figura 3. Foto ilustrativa do coletor de PVC utilizado nos estudos de volatilização de amônia.

Cinco bases por parcela foram utilizadas, o que permitiu a utilização de uma base por coleta. Assim, os coletores foram transferidos para as bases subsequentes, a cada coleta, refletindo as condições ambientais (chuva, vento, temperatura) do período anterior, sem as interferências causadas pela presença da câmara (Cantarella et al., 1999).

As bases foram instaladas previamente à aplicação dos fertilizantes e protegidas para não haver entrada de fertilizante. A aplicação foi realizada manualmente a lanço na superfície do solo, posterior a qual as bases foram descobertas e aplicado uma dose equivalente de N na área de cada base. As câmaras coletoras foram instaladas logo após a aplicação dos fertilizantes, e em cada uma foram colocados dois discos absorvedores de polipropileno com 2,0 cm de espessura e densidade 28, embebidas em solução de ácido fosfórico (50 ml L^{-1}) e glicerina (40 ml L^{-1}). A primeira esponja, disposta na parte inferior da câmara, a uma altura de 15 cm do solo, tem o objetivo de captar a NH_3 que é volatilizada do solo na parte interna da câmara. A segunda esponja, disposta a 30 cm do solo, com a função de captar a NH_3 externa as câmaras, evitando a contaminação da esponja inferior (Da Ros et al., 2005).

Os discos absorvedores foram preparados antes de serem instalados nos coletores de amônia, sendo acondicionados em saco de plástico (2L) juntamente com 70 mL da solução preparada com ácido fosfórico e glicerina. Os discos de espuma eram trocados a cada coleta, mas apenas o disco inferior

era armazenado em saco plástico e mantido refrigerado (5 °C) para posterior extração da amônia retida na solução ácida como NH_4^+ (Lara Cabezas et al., 1997b).

Cinco avaliações foram realizadas, aproximadamente, aos 1, 3, 5, 9 e 20 dias após a aplicação das fontes nitrogenadas. O NH_4^+ retido no disco absorvedor foi extraído por sucessivas lavagens, aproximadamente cinco, com solução de KCl 1 mol L^{-1} , coletada em balão volumétrico de 500 mL, cujo volume deve ser completado. Uma alíquota de 20 mL foi retirada desse volume à qual foi adicionada 0,2 g de MgO e submeteu-se à destilação com arraste a vapor em semi-micro Kjeldahl, sendo a NH_3 retida em solução de H_3BO_3 como NH_4^+ , que foi quantificado por titulação com solução de ácido sulfúrico padronizado (Tedesco et al., 1995). A quantidade de N- NH_3 volatilizado foi calculada com base no volume total da solução utilizada para lavagem das esponjas (500 mL), e os resultados expressos em taxas diárias de volatilização de N- NH_3 (kg ha^{-1}). Descontada a volatilização de N do tratamento sem adubação nitrogenada, calculou-se a volatilização acumulada de N- NH_3 de cada fonte, e expressa como proporção (%) da dose de N aplicada.

5.1.3.5. Análise estatística

Os resultados foram submetidos à análise de variância e as médias dos tratamentos comparadas pelo teste de Tukey no nível de 5 % de probabilidade. As perdas acumuladas, a temperatura média diária e a precipitação dos cinco primeiros dias após a aplicação foram submetidas à regressão múltipla.

5.1.4. Resultados e Discussão

5.1.4.1. Precipitação e temperatura

No experimento conduzido na cultura do trigo no inverno de 2009, a temperatura diária oscilou entre 0,7 °C e 25,8 °C, com uma temperatura média diária de 13,8 °C durante o período (Figura 4). Na segunda safra de trigo a temperatura média do período foi de 15,9 °C, sendo que a mínima registrada foi de 0 °C e a máxima de 27,7 °C. Na safra de 2009, a temperatura média no dia da aplicação dos fertilizantes foi de 16,5 °C, enquanto no de 2010 a temperatura média diária foi de 10,2 °C. Essa diferença de 6 °C na temperatura média no dia da aplicação dos fertilizantes pode ter influenciado nas taxas de volatilização diária registradas.

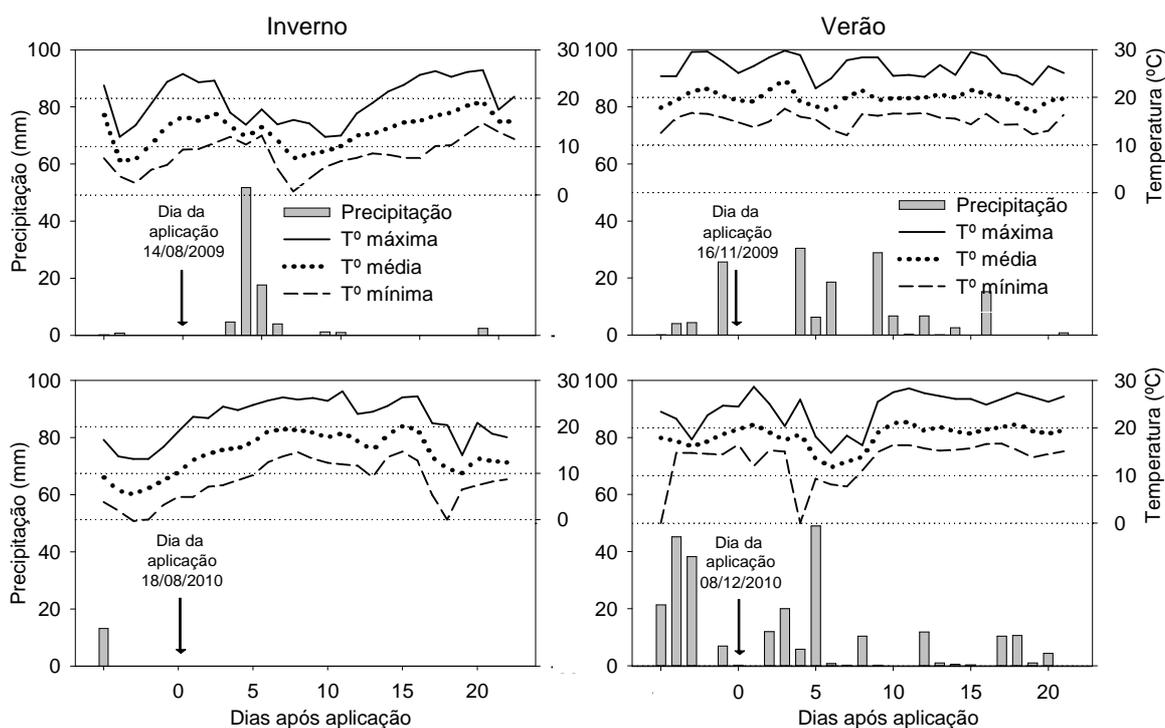


Figura 4. Dados de precipitação e temperaturas mínima, média e máxima no Distrito de Entre Rios, Guarapuava, PR, nos períodos de execução dos experimentos de inverno e verão nos anos de 2009 e 2010. Fonte: Estação Meteorológica da FAPA.

Em 2009, a precipitação acumulada no período do experimento de inverno (19 dias) foi de 83 mm, sendo que 90 % dessa precipitação concentraram-se entre o terceiro e o sexto dia após aplicação dos fertilizantes.

No ano de 2010 não foi registrado nenhum evento de precipitação durante o experimento (20 dias).

Nos experimentos conduzidos durante a estação de verão, a temperatura média diária do período foi de 19,8 °C, oscilando entre 12 °C e 30 °C na safra 2009/10. Na safra 2010/11, a temperatura média diária foi de 18,3 °C, variando de 0 °C a 28,6 °C, ocorrendo uma sequência de quatro dias com temperaturas abaixo de 10 °C a partir do segundo dia após a aplicação.

Ao contrário do que ocorreu nos experimentos de inverno, os períodos de verão em que foi conduzido o experimento caracterizaram-se por elevadas precipitações acumuladas. Nas safras 2009/10 e 2010/11, a precipitação acumulada do período foi de 117 mm e de 138 mm, respectivamente. Contudo, no primeiro ano as chuvas ocorreram a partir do quarto dia após a aplicação, não havendo nenhum evento nos primeiros dois dias após a aplicação do N. Por sua vez, na safra de 2010/11 ocorreu um pequeno volume de chuva no dia da aplicação, mas os eventos concentraram-se entre o segundo e o quinto dia após a aplicação, correspondendo a 65 % do volume de chuva ocorrido no período.

5.1.4.2. Taxa de volatilização diária

Nos experimentos conduzidos no período de inverno, na cultura do trigo, as maiores taxas de emissão diária de N-NH₃ para a atmosfera concentraram-se nos primeiros cinco dias após a aplicação dos fertilizantes no solo, em todos os tratamentos (Figura 5a, b, c, d). As perdas diárias de N da uréia por volatilização da amônia alcançaram picos de 0,45 kg de N ha⁻¹ um dia após a aplicação na safra de 2009 (Figura 5a). Aos 21 dias após a aplicação as perdas por volatilização foram de apenas 0,08 kg de N ha⁻¹. Os demais fertilizantes nitrogenados aplicados apresentaram picos de emissão diários no primeiro dia após a aplicação, atingindo o máximo de 0,63 kg de N ha⁻¹ dia⁻¹.

Na safra seguinte (2010), o pico de emissão diária da uréia reduziu para 0,23 kg de N ha⁻¹ dia⁻¹ (Figura 5b), ocorrendo cinco dias após a adubação, sendo praticamente nula aos 21 dias. Nesta safra, os picos de volatilização diária dos fertilizantes nitrogenados, assim como a uréia, concentraram-se no

quinto dia após a aplicação. As máximas perdas diárias por volatilização registradas foram de 0,52 kg de N ha⁻¹ dia⁻¹.

Normalmente, as máximas perdas diárias de amônia por volatilização concentram-se nos primeiros seis dias após a aplicação do fertilizante (Al-Kanani et al., 1991). Inclusive outros estudos têm verificado que o processo de volatilização de amônia inicia logo após a aplicação da uréia pela rápida hidrólise desta no solo (Rodrigues & Kiehl, 1986; Lara Cabezas et al., 1997a; Da Ros et al., 2005), com picos de emissão ocorrendo entre o primeiro e o terceiro dia em sistema plantio direto (Leguizamon Rojas, 2009).

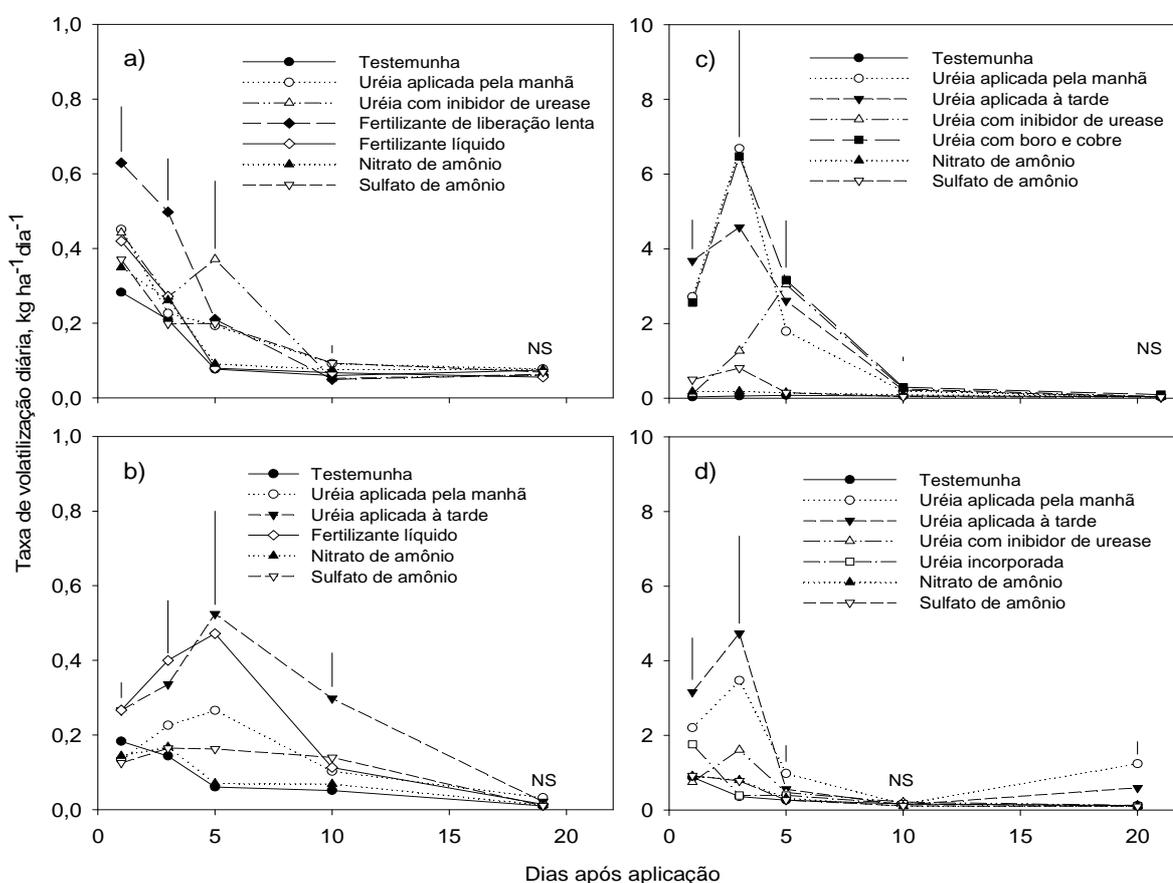


Figura 5. Taxas de volatilização diária registradas nos experimentos conduzidos na cultura do trigo na safra 2009 (a) e 2010 (b); e na cultura do milho na safra 2009/10 (c) e 2010/11 (d). Barras verticais indicam a diferença mínima significativa segundo teste de Tukey ($p \leq 0,05$). NS: não significativo. Observação: as escalas dos eixos verticais referentes às safras de inverno (a e b) e de verão (c e d) são diferentes.

Na primeira safra de inverno, as maiores taxas de volatilização diária, em todos os tratamentos, foram registradas nos dois primeiros dias após aplicação dos fertilizantes. A redução nas taxas de volatilização diária a partir desse período pode estar relacionada ao efeito da chuva, sendo que os eventos iniciaram-se a partir do terceiro dia, concentrando-se no quarto e quinto dia após aplicação. Após 10 dias da aplicação dos fertilizantes, as perdas de nitrogênio foram baixas.

Essa precipitação pode ter aumentado a difusão dos fertilizantes no solo (Rodrigues & Kiehl, 1986) e, segundo Bouwmeester et al. (1985), uma chuva de 40 mm é suficiente para reduzir as perdas de N por volatilização em 30 %, pois chuvas intensas apresentam potencial para transportar o N no perfil do solo, reduzindo as perdas por volatilização e aumentando a adsorção do N amoniacal no solo.

Na segunda safra de inverno (2010), ao contrário do que aconteceu na safra anterior, não ocorreu nenhum evento de precipitação no período de condução do experimento. Isso pode explicar o porquê dos picos de volatilização terem se concentrado do primeiro ao quinto dia após a aplicação dos fertilizantes. De acordo com Keller e Mengel (1986), a permanência dos grânulos do fertilizante sobre o solo ou sobre os resíduos leva a uma menor perda de N no dia da aplicação, pois não inicia o processo de hidrólise da molécula. Também, a presença de palha na superfície do solo no sistema plantio direto poderia estar limitando o contato fertilizante – solo, restringindo a sua dissolução e difusão no solo, e conseqüentemente potencializando a volatilização do nitrogênio (Rodrigues & Kiehl, 1992).

No verão, as taxas de volatilização diária entre os períodos variaram de um ano para outro (Figura 5c, d), sendo que as maiores taxas diárias de N-NH₃ ocorreram na safra 2009/10. Nas duas safras, as maiores perdas diárias de N por volatilização corresponderam aos fertilizantes nitrogenados com nitrogênio na forma amídica. Os picos de volatilização desses fertilizantes foram registrados no terceiro dia após a aplicação, corroborando com os dados encontrados por Leguizamon Rojas (2009). A uréia com inibidor de urease foi a exceção entre os tratamentos, apresentando o máximo de perda diária no quinto dia após aplicação na safra 2009/10.

Na primeira safra de verão, as taxas de volatilização diária atingiram valores máximos próximos a $7 \text{ kg de N ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ no terceiro dia após a aplicação para a uréia aplicada pela manhã. Após dez dias da aplicação, as perdas de N da uréia aplicada pela manhã foram próximas a zero. Nas demais fontes nitrogenadas aplicadas, as perdas máximas registradas atingiram o máximo de $6,5 \text{ kg de N ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ e, assim como a uréia aplicada pela manhã, as perdas foram muito baixas a partir do décimo dia após a adubação. Na safra 2010/11 as maiores taxas de volatilização diária também foram registradas nos fertilizantes com N de origem amídica. No entanto, a maior emissão diária da uréia aplicada pela manhã atingiu pico máximo de $3,5 \text{ kg de N ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ e as demais fontes nitrogenadas apresentaram perdas diárias máximas de $4,7 \text{ kg de N ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$.

Os maiores picos de volatilização diária registrados na safra 2009/10 em relação à safra seguinte podem estar relacionados com a ausência de precipitação nos dois dias que seguiram a aplicação dos fertilizantes. Segundo Duarte et al. (2007), a hidrólise enzimática inicia-se rapidamente após a aplicação, seguindo máximas perdas dois ou três dias após a adubação. As perdas de N da uréia reduziram, aproximadamente, 50 % de um ano para o outro. Essa redução ocorreu devido ao efeito de diluição e incorporação do N no solo pela água da chuva, pois nesse segundo ano os eventos de precipitação concentraram-se nos primeiros dias após aplicação.

As taxas da volatilização diária verificadas nos experimentos de verão (Figura 5c, d) foram superiores às registradas nos experimentos de inverno (Figura 5a, b) nos tratamentos com aplicação de uréia em superfície. De forma geral, as perdas de N por volatilização da amônia são maiores nos primeiros dias após aplicação, tanto no inverno quanto no verão, mas é importante observar que as perdas de N aplicado na forma de uréia são aproximadamente 10 vezes menores quando aplicadas no inverno. Um dos fatores que influencia esse comportamento está relacionado com a dose de N aplicada. Enquanto no trigo foi aplicada uma dose de $50 \text{ kg de N por hectare}$, no milho essa dose foi 3 vezes superior. Outro fator que diferencia as perdas entre as épocas de aplicação nos experimentos é a temperatura, pois, as temperaturas elevadas no verão aceleram a atividade microbiana e a degradação dos fertilizantes nitrogenados (Bouwmeester et al., 1985). Portanto, as temperaturas amenas

registradas no período de inverno na Região Centro-Sul do PR, com temperaturas médias diárias abaixo de 15 °C, reduzem a atividade microbiana e, conseqüentemente, as perdas de N por volatilização de amônia são reduzidas nessa estação.

5.1.4.3. Perdas acumuladas de N-NH₃

As perdas de N por volatilização da amônia na primeira safra de inverno (2009) foram baixas, menores que 3 % do N aplicado em todos os tratamentos (Figura 6a). A fonte nitrogenada que mais perdeu nitrogênio foi o fertilizante de liberação lenta, seguido por uréia com inibidor de urease e uréia comum. As condições meteorológicas do inverno na região Centro-Sul do PR não são favoráveis para que ocorram perdas de N por volatilização. Assim, essas perdas de N da uréia assemelharam-se com as perdas ocorridas com as demais fontes nitrogenadas. Tanto o nitrato quanto o sulfato de amônio são fertilizantes utilizados em cobertura que, naturalmente não perdem N por volatilização devido à reação ácida que ocorre quando são aplicados ao solo. As perdas desses dois fertilizantes por volatilização normalmente ficam próximas a 1 % do N aplicado (Volk, 1959; Anjos, 1973; Lara Cabezas & Souza, 2008; Fontoura & Bayer, 2010).

O fertilizante líquido, por conter em sua formulação N de origem amídica, quando em condições ambientais favoráveis, com temperaturas elevadas, também está sujeito a perdas por volatilização de amônia, apresentando perdas que se aproximam de 10 % do N aplicado por volatilização (Volk, 1959; Fontoura & Bayer, 2010). No entanto, assim como a uréia, em temperaturas amenas e com alta precipitação essas perdas são reduzidas, chegando a perdas menores que 1 % do N aplicado nessa safra (Figura 6a).

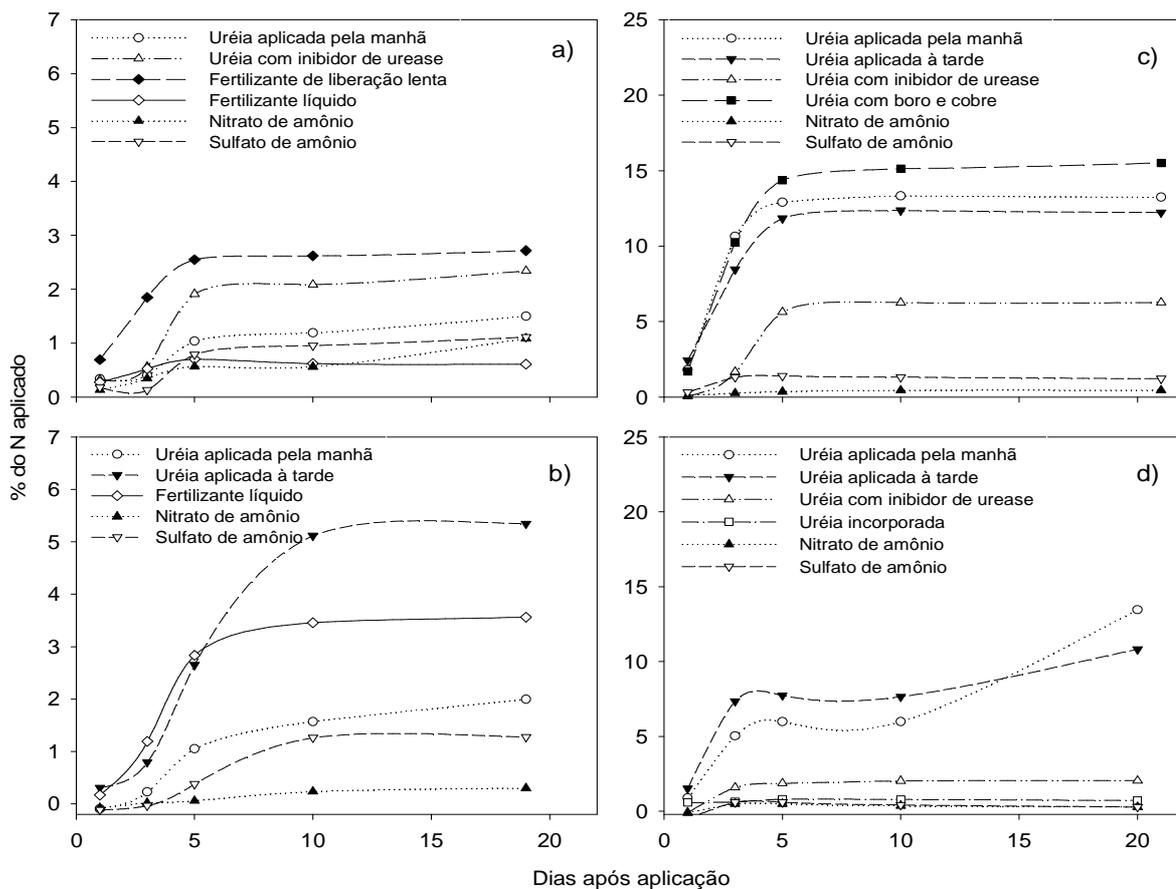


Figura 6. Perdas acumuladas de nitrogênio (% do N aplicado) por volatilização de amônia das diferentes fontes nitrogenadas aplicadas na cultura do trigo nas safras 2009 (a) e 2010 (b); e do milho nas safras 2009/10 (c) e 2010/11(d). Observação: as escalas verticais referentes às safras de inverno (a e b) e de verão (c e d) são diferentes.

Na safra de inverno de 2009, as perdas acumuladas de N por volatilização concentraram-se nos primeiros dias após aplicação dos fertilizantes no trigo na safra de 2009. Cerca de 50 % do N volatilizado da uréia comum e com inibidor de urease haviam sido perdidos cinco dias após a adubação nitrogenada de cobertura. O fertilizante de liberação lenta, no mesmo período, havia perdido aproximadamente 70 % do total das perdas por volatilização. Tanto o nitrato de amônio quanto o sulfato de amônio perderam nitrogênio em taxas menores e mais constantes durante a avaliação. Dez dias após a aplicação, estes haviam perdido apenas 70 % do total de N volatilizado.

Na safra de trigo de 2010, a uréia aplicada à tarde foi o fertilizante nitrogenado que mais perdeu N por volatilização. A aplicação na parte da tarde não foi uma estratégia de manejo eficiente na redução das perdas de N

conforme esperado. A uréia aplicada pela manhã, assim como no ano anterior, apresentou baixas perdas, aproximadamente 2 % do N aplicado foi perdido por volatilização. Essa perda foi inferior à registrada no tratamento com fertilizante líquido que foi próxima a 3,5 % do N aplicado.

Nessa safra, o fertilizante líquido apresentou uma perda superior à safra de inverno de 2009. Essa diferença pode estar associada à ocorrência de chuvas, pois na safra de 2010 não ocorreram eventos de chuva após a aplicação dos fertilizantes como no ano anterior. A precipitação ocorrida no ano de 2009 pode ter diluído o fertilizante e o incorporado ao solo (Rodrigues & Kiehl, 1986). Na ausência de precipitação, somente o orvalho não foi suficiente para incorporar todo o fertilizante, permanecendo maior tempo sobre a palha no sistema plantio direto e não sendo retido às cargas negativas do solo ou disponível para a absorção das plantas. Nesse caso, o fator limitante que proporcionou baixas perdas por volatilização do N do fertilizante líquido foi a temperatura ambiente, que se manteve amena durante o período (Figura 4).

Boaretto et al. (2004), conduzindo um experimento na cultura do trigo durante o inverno no Estado de São Paulo, verificaram que as perdas de nitrogênio por volatilização variaram de 5 a 12 % do N aplicado na forma de uréia. Esses resultados são superiores aos encontrados no inverno na região Centro-Sul do Paraná. Essa menor perda de N por volatilização registrada no Centro-Sul do PR está relacionada com a menor temperatura média diária. Durante o período de inverno as temperaturas médias giraram em torno de 14 °C, enquanto que no experimento conduzido por Boaretto et al. (2004) a temperatura média estava próxima aos 21°C, semelhante às que ocorrem durante a estação de verão no município de Guarapuava.

As perdas dos fertilizantes nitrogenados por volatilização mantiveram-se baixas durante os períodos de inverno (< 5,5 % do N aplicado). Isso pode ser atribuído às temperaturas amenas do período que reduzem a atividade microbiana e conseqüentemente a hidrólise da uréia (Ernst & Massey, 1960). As perdas de nitrogênio por volatilização da amônia no inverno de 2009, assim como no ano de 2010, concentraram-se nos primeiros cinco dias após a aplicação dos fertilizantes (Figura 6b). No entanto, em 2010 as perdas da uréia aplicada pela manhã, aplicada à tarde e o sulfato de amônio apresentaram perdas até dez dias após a aplicação, estabilizando após esse período. Esse

maior período em que ocorreram as perdas de N está relacionado com a ausência de chuva, o que manteve os fertilizantes por mais tempo na superfície do solo ou sobre a palhada sem incorporá-lo ao solo

No primeiro ano em que foi conduzido o experimento na cultura do milho (2009/10), as maiores perdas por volatilização foram registradas nos tratamentos com uréia comum (Figura 6c). A maior perda registrada foi no tratamento com uréia tratada com boro e cobre (16 % do N aplicado), seguida por uréia aplicada pela manhã e uréia aplicada pela tarde (12 e 13 % do N aplicado, respectivamente). As fontes nitrogenadas que apresentaram as menores perdas acumuladas foram o nitrato e o sulfato de amônio que perderam aproximadamente 1 % do N aplicado. A uréia com inibidor de urease apresentou perdas intermediárias entre os tratamentos, com perdas próximas a 6 % do N aplicado.

Semelhante à safra 2009/10, na safra 2010/11 as maiores perdas de N por volatilização foram registradas nos tratamentos com uréia, variando entre 10 e 13,5 % do N aplicado (Figura 6d). No tratamento em que foi aplicada uréia com inibidor de urease as perdas não ultrapassaram 2 % do N aplicado. Por sua vez, o nitrato e o sulfato de amônio apresentaram perdas negligenciáveis, menores de 0,3 % do N aplicado.

Assim como nos experimentos conduzidos no inverno, as maiores perdas dos fertilizantes nitrogenados por volatilização nas safras de verão concentraram-se nos primeiros cinco dias após a adubação (Figura 6c, d). Na safra 2009/10, as perdas mais expressivas foram nos tratamentos com uréia com boro e cobre; uréia aplicada pela manhã; uréia aplicada pela tarde e uréia com inibidor de urease. Cindo dias após a aplicação nestes tratamentos haviam sido perdidos 94, 93, 90 e 84 % do total do N volatilizado, respectivamente. De acordo com Lara Cabezas & Trivelin (1990), aproximadamente, 95 % do N proveniente do fertilizante é volatilizado nos primeiros 6 dias após a aplicação.

Na segunda safra de verão (2010/11), as perdas acumuladas de N por volatilização de amônia dos diferentes fertilizantes nitrogenados foram mais lentas que na safra anterior. Nesse ano, no mesmo período de cinco dias após a adubação, as perdas acumuladas nos tratamentos com uréia haviam volatilizado 46 % do total das perdas quando a uréia foi aplicada pela manhã e

67 % quando aplicada à tarde. Os demais tratamentos haviam acumulado perdas próximas a 65 % do total das perdas por volatilização no mesmo período.

As perdas acumuladas de N-NH₃ com a aplicação superficial de uréia na cultura do milho (<15 % do N aplicado) ainda assim foram baixas comparadas com as perdas superiores a 50 % do N aplicado registradas na Região Sudeste do Brasil (Lara Cabezas et al., 1997b; Costa et al., 2003; Pereira et al., 2009), porém aproxima-se às encontradas por Da Ros et al. (2005) e Leguizamon Rojas (2009) na Região Sul do Brasil.

As aplicações da uréia pela manhã e pela tarde apresentaram perdas semelhantes, sem diferença significativa nos experimentos no verão (Tabela 4). Assim, nas condições climáticas de verão, a aplicação do fertilizante ao final da tarde não se mostrou uma estratégia de manejo eficiente para as reduções das perdas de N por volatilização. Essa similaridade entre os tratamentos indica que não há restrição quanto ao horário de aplicação da uréia a campo, ou seja, é possível aplicar em um maior número de horas diárias, aumentando a operacionalidade da adubação nitrogenada em cobertura. Basso et al. (2004), aplicando dejetos suínos em diferentes períodos do dia, também verificaram que o horário de aplicação do dejetos não interferiu de maneira consistente sobre as perdas de N por volatilização de amônia, corroborando com os resultados obtidos neste experimento.

Com base no princípio de que a atividade da urease é inibida por cátions de metais pesados, foi estabelecido um tratamento com uréia recoberta com cobre para verificar a eficiência na redução das perdas de N da uréia por volatilização. Segundo Volk (1961), esse método não é eficiente, pois a uréia difunde para fora da zona de efeito do cobre, tornando assim ineficaz. O cobre é facilmente imobilizado pelo solo, enquanto a uréia se move livremente no solo com a umidade ou por difusão. A ineficiência da utilização de cobre junto com a uréia na redução das perdas de N por volatilização de amônia pode ser verificada nesse experimento, visto que esse tratamento foi o que mais sofreu perdas por volatilização (Tabela 4).

Tabela 4. Perda acumulada de N-NH₃ (% do N aplicado) por volatilização decorrente da aplicação dos diferentes fertilizantes nitrogenados em cobertura na cultura do trigo e do milho em PD, em Guarapuava, PR

Tratamentos	Inverno		Verão	
	2009	2010	2009/10	2010/11
	----- % do N aplicado -----			
Uréia aplicada pela manhã	1,5 bc	2,0 bc	13,3 ab	13,5 a
Uréia aplicada à tarde	-	5,3 a	12,2 ab	10,8 a
Uréia incorporada	-	-	-	0,7 b
Uréia com boro e cobre	-	-	15,5 a	-
Uréia com inibidor de urease	2,3 ab	-	6,3 bc	2,0 b
Fertilizante de liberação lenta	2,7 a	-	-	-
Fertilizante líquido	0,6 c	3,6 ab	-	-
Nitrato de amônio	1,1 c	0,3 c	0,4 c	0,3 b
Sulfato de amônio	1,1 c	1,3 bc	1,2 c	0,3 b
CV (%)	28,8	60,2	34,3	48,3

Tratamentos com médias seguidas por diferentes letras na coluna diferem pelo teste de Tukey ao nível de 5 %.

A utilização de uréia com inibidor de urease tem se destacado pela redução nas perdas de N-NH₃. Em relação aos tratamentos com uréia comum, as perdas por volatilização foram reduzidas em aproximadamente 50 %, demonstrando a eficiência do inibidor de urease na redução da volatilização. Segundo Cantarella et al. (2008), o uso de inibidor de urease proporciona reduções de 15 a 78 % nas perdas por volatilização, dependendo das condições climáticas nos dias posteriores à aplicação de N, dias secos ou chuvosos. Dados semelhantes foram encontrados por Rawluk et al. (2001), que, durante 12 dias, registraram reduções nas perdas de N-NH₃ que variaram de 28 a 88 % quando utilizado inibidor de urease junto à uréia.

Entretanto, em temperaturas amenas, o efeito do inibidor de urease nas reduções das perdas por volatilização não é visualizado em relação à uréia comum. Isso pode ser verificado na avaliação realizada no período de inverno de 2009, no qual a perda de N da uréia com inibidor de urease foi superior a da uréia comum. Nas condições climáticas do inverno do Sul do Brasil, as perdas

por volatilização de N da uréia comum não são favorecidas, visto as baixas perdas registradas nos dois invernos analisados.

Quando as condições ambientais são favoráveis às perdas de nitrogênio por volatilização, a incorporação da uréia é uma estratégia de manejo da adubação que permite um melhor aproveitamento do N aplicado. No experimento conduzido na cultura do milho na safra 2010/11, verificou-se uma perda acumulada abaixo de 1 % do N aplicado na forma de uréia quando incorporada ao solo (Figura 6d). Vários estudos destacam a eficiência da incorporação do N no solo (Overrein & Moe, 1967; Anjos, 1973; Silva et al., 1995; Fontoura & Bayer, 2010).

A profundidade de incorporação que garante o controle de perdas depende da textura e da CTC dos solos, da umidade e da direção do fluxo de água no perfil. Dados publicados por Silva et al. (1995) registram perdas de nitrogênio por volatilização de amônia que variam na faixa 0,9 e 2,3 % do N aplicado quando incorporada uréia a 10 cm de profundidade. Resultados semelhantes foram encontrados por Fontoura & Bayer (2010) que, na média de 4 anos de avaliação, registraram 1,1 % do N aplicado perdido por volatilização de amônia quando a uréia foi incorporada ao solo. Essa redução na volatilização de NH_3 pela incorporação da uréia deve-se ao maior tamponamento do pH resultante do maior contato solo-fertilizante (Rodrigues & Kiehl, 1986; Lara Cabezas et al., 2000; Sangoi et al., 2003).

Outra estratégia de manejo que visa à redução das perdas de N por volatilização é a utilização do sulfato de amônio e do nitrato de amônio na adubação de cobertura em sistema plantio direto. Esses fertilizantes têm apresentado baixas perdas por volatilização. Isso pode ser verificado nos experimentos realizados, tanto no inverno quanto verão. As perdas nos períodos avaliados foram inferiores a 1,5 % do N aplicado (Tabela 4). Esse comportamento está relacionado ao fato desses fertilizantes não resultarem numa elevação do pH ao redor do grânulo quando da sua dissolução, ao contrário do que ocorre quando da hidrólise da uréia (Vitti et al., 2002). Assim, como o íon NH_4^+ é estável na faixa usual de pH do solo, a volatilização de NH_3 é muito baixa quando da aplicação destes fertilizantes (Lara Cabezas et al., 1997a). A presença dos ânions NO_3^- e SO_4^{2-} , os quais atuam como íon

acompanhante, favorecem a migração do NH_4^+ para regiões de menor pH e a sua retenção na CTC do solo (Lara Cabezas et al., 1997b).

O fertilizante de liberação lenta, cujo inibidor de nitrificação consiste de dupla membrana organo-mineral de origem marinha que retarda a liberação das moléculas, apresentou uma perda acumulada de 2,7 % do N aplicado no inverno de 2009, superior aos demais tratamentos. A maior volatilização com inibidores de nitrificação tem sido atribuída ao aumento da concentração de NH_4^+ no solo devido à menor taxa de nitrificação (Prakasa Rao & Puttanna, 1987).

Nos períodos de inverno, com temperaturas amenas, as fontes de N de liberação lenta, com inibidor de urease e a fonte líquida apresentaram perdas por volatilização iguais ou superiores à uréia superficial (Tabela 4). O nitrato e o sulfato de amônio não são influenciados pela temperatura, haja vista que as perdas permanecem baixas mesmo com a sazonalidade das temperaturas. Esses dois fertilizantes, pela sua solubilidade, sofrem mais influência das chuvas e estão mais propensos a perdas por lixiviação do que por volatilização.

No ano em que ocorreu a maior perda acumulada por volatilização da amônia no verão, a temperatura média diária também foi maior e a precipitação menor nos cinco primeiros dias após a adubação (Tabela 6). Quando as perdas da uréia por volatilização foram menores no período de verão, a temperatura média diária foi menor e a precipitação foi maior nos cinco dias que sucederam a aplicação, todavia, não há como discriminar qual dos fatores, temperatura ou precipitação, foi mais determinante na redução das perdas nas perdas de N por volatilização.

Tabela 5. Perdas acumuladas por volatilização de amônia, temperatura média e precipitação dos cinco dias após a aplicação da uréia na cultura do trigo e do milho nos dois anos de avaliação

Ano	Perda Acumulada		Temperatura	Precipitação
	kg ha ⁻¹	%	°C	mm
Inverno 2009	1,3	1,1	14,8	74,0
Inverno 2010	1,1	1,1	14,1	0,0
Verão 2009/10	19,7	13,0	20,5	56,0
Verão 2010/11	11,1	6,0	16,8	87,6

As perdas acumuladas da uréia por volatilização nos experimentos conduzidos durante as estações de inverno e verão estão fortemente relacionadas com as condições climáticas da região. A interação entre a temperatura média diária e precipitação nos cinco primeiros dias após a aplicação dos fertilizantes são determinantes sobre a quantidade de nitrogênio volatilizado ($y = -27,44 + 1,94 T + 0,011 PP \quad r^2 = 0,73^{**}$). De acordo com os coeficientes padronizados da regressão múltipla (Tabela 5), a temperatura média diária (Beta 0,849) exerce maior influência sobre as perdas de N por volatilização que a precipitação (Beta 0,068) do período. Ou seja, com o aumento da temperatura média diária as perdas da uréia por volatilização seriam maiores que com o aumento da precipitação.

Tabela 6. Coeficientes e regressão múltipla das perdas acumuladas da uréia (variável dependente), temperatura do ar e da precipitação pluviométrica (variáveis independentes) dos cinco primeiros dias após a aplicação dos fertilizantes nitrogenados em SPD no Centro-Sul do PR

	Coeficiente não padronizado		Coeficiente padronizado	Sig. dos coeficientes
	B	Erro padrão	Beta	
Constante	-27,441	5,742		0,000
Temperatura (°C)	1,940	0,343	0,849	0,000
Precipitação (mm)	0,011	0,023	0,068	0,658

No verão, além da temperatura média diária, a ocorrência de chuva nos primeiros dias após a adubação também influencia sobre as perdas de N por volatilização. Assim, não sendo considerados os fatores intrínsecos ao solo, pode-se inferir que a volatilização é resultante da interação temperatura e precipitação.

5.1.5. Conclusões

- Em cultivos de inverno, sob temperaturas mais baixas, as perdas de N por volatilização no sistema plantio direto são baixas para a uréia bem como para as demais fontes nitrogenadas, e são menos influenciadas pelo regime de chuva no período após a aplicação do que no verão.

- As maiores temperaturas no verão determinaram elevadas taxas de volatilização de NH_3 da uréia do que as verificadas no inverno, mas estas se mantêm inferiores a 15 % do N aplicado.

- A incorporação da uréia mostrou-se eficiente na redução da volatilização, enquanto quando aplicada em superfície, as perdas foram independentes do horário de aplicação (manhã ou tarde).

5.2. ESTUDO 2. VOLATILIZAÇÃO DE AMÔNIA RELACIONADA AO USO DA IRRIGAÇÃO NO SISTEMA PLANTIO DIRETO NA DEPRESSÃO CENTRAL DO RIO GRANDE DO SUL

5.2.1. Resumo

A utilização da irrigação é uma prática de manejo eficiente na redução das perdas de N por volatilização de amônia. Este estudo teve por objetivo avaliar o efeito da irrigação sobre as perdas de N por volatilização em um solo sob plantio direto (PD) na Depressão Central do RS. O estudo foi conduzido na Estação Experimental da UFRGS, localizada no município de Eldorado do Sul, RS. O experimento consistiu da aplicação de diferentes fontes nitrogenadas em cobertura (uréia comum, uréia com inibidor de urease, fertilizante de liberação lenta, sulfato de amônio e um tratamento controle), sem irrigação e com irrigação (~10 mm) imediatamente anterior e posterior a aplicação dos fertilizantes nitrogenados. Utilizou-se delineamento de blocos casualizados com três repetições. As coletas foram realizadas aos 1, 2, 4, 6 e 10 dias após a aplicação dos fertilizantes, utilizando coletor semi-aberto estático. As maiores perdas acumuladas foram nos tratamento com uréia (12 % do N aplicado). As perdas concentraram-se até quatro dias após a adubação sendo que aproximadamente 90 % das perdas totais de N dos fertilizantes ocorreram nesse período. A utilização de inibidor de urease reduziu em aproximadamente 50 % as perdas de N da uréia por volatilização na condição natural de campo e quando aplicada em solo úmido. Quando não foi realizada irrigação os picos de volatilização concentraram-se no segundo dia após a aplicação, porém quando utilizada irrigação, tanto anterior quanto posterior à adubação, esses picos foram no primeiro dia após a aplicação, mas com magnitudes diferentes. Quando os fertilizantes foram aplicados em solo úmido houve uma tendência em aumentar as perdas por volatilização, principalmente nos fertilizantes que apresentam maiores concentrações de N de origem amídica. Entretanto, quando a irrigação foi realizada após a adubação, essa se mostrou eficiente na redução das perdas por volatilização. De modo geral, todas as fontes nitrogenadas que apresentam em sua formulação N de origem amídica foram influenciadas pela irrigação. Por sua vez, a aplicação de sulfato de amônio apresentou menores perdas de N por volatilização.

5.2.2. Introdução

As perdas de N dos fertilizantes por volatilização de amônia, variam de acordo com a umidade do solo na hora da aplicação. Quando aplicado ao solo, havendo umidade suficiente para solubilizar o fertilizante, o processo de volatilização inicia logo após a aplicação da uréia, pela rápida hidrólise desta no solo (Rodrigues & Kiehl, 1986; Lara Cabezas et al., 1997b). O teor de umidade do solo é um fator importante na hidrólise, pois a adição de água pode promover o aumento da difusão da uréia e, conseqüentemente, maior contato com a urease no solo (Volk, 1959), aumentando as perdas por volatilização.

A umidade do solo e a precipitação, tanto podem aumentar como reduzir as perdas de N por volatilização; isso depende da intensidade da precipitação (Bouwmeester et al., 1985). Uma baixa precipitação pode aumentar as perdas de N, pois com a adição de água ao solo pode ocorrer a dissolução do fertilizante e o início da hidrólise, mas não a incorporação deste ao solo. No entanto, um evento de chuva intenso e duradouro tem o potencial para o transporte de uréia e N amoniacal no solo, (Bouwmeester et al., 1985). A chuva também afeta a diluição da alcalinidade gerada e, principalmente, influencia a umidade do solo que é um fator fundamental para a difusão do íon NH_4^+ no solo (Rodrigues & Kiehl, 1986).

De maneira geral, a hidrólise pode ocorrer em ampla faixa de umidade do solo (Duarte et al., 2007), pois a atividade da urease é dependente da umidade do solo. Segundo Volk (1959), quando o solo está seco, o fertilizante nitrogenado pode permanecer estável, mas, conforme aumento da umidade do solo, a taxa de hidrólise aumenta até que a umidade atinja 20 %; a partir deste ponto, a taxa de hidrólise é pouco afetada pelo teor de água.

As perdas de N por volatilização podem ser maiores e mais rápidas sob condições de aquecimento e solo úmido do que em condições de seca e calor, sendo que a baixa umidade específica nessa condição pode impedir a completa dissolução dos grânulos dias após a aplicação, reduzindo assim a hidrólise e a volatilização (Beyrouy et al., 1988). As perdas de N por volatilização são maximizadas pela manutenção da umidade adequada no solo para a hidrólise de uréia, ou com a umidade relativa entre 80 e 95 % e também parece depender do grau de evaporação (Denmead et al., 1978).

A volatilização de amônia é resultante da interação de diversos fatores ambientais, com fatores intrínsecos ao solo e à própria característica dos fertilizantes nitrogenados. Diversos estudos têm verificado a influência desses fatores sobre as perdas de N por volatilização (Kissel et al., 2004; Duarte et al., 2007; Lara Cabezas & Souza, 2008), elucidando a ação desses sobre o processo de volatilização. A partir disso, é possível buscar alternativas de manejo que permitam aumentar a eficiência da adubação nitrogenada de cobertura, seja pela substituição da uréia por fontes nitrogenadas alternativas, seja pela adição de inibidores ou mesmo pela utilização de práticas de manejo que favoreçam a incorporação dos fertilizantes ao solo, reduzindo as suas perdas para a atmosfera.

Este estudo teve por objetivo mensurar as perdas de N por volatilização de amônia de diferentes fertilizantes nitrogenados aplicados em cobertura na cultura do milho no sistema plantio direto e avaliar o efeito da irrigação aplicada anterior e posterior à adubação nitrogenada sobre as perdas de N por volatilização na Depressão Central do RS.

5.2.3. Material e Métodos

5.2.3.1. Localização e clima

Este estudo foi conduzido na Estação Experimental Agronômica (EEA) da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (30 ° 50 ' 52 '' sul e 51 ° 38 ' 08'' oeste), no município de Eldorado do Sul, Rio Grande do Sul. O relevo da área é ondulado com altitude de 46 m e a vegetação nativa predominante é campo nativo, composto principalmente por gramíneas rasteiras e desmódio (*Desmodium* sp). A área é pertencente à região fisiográfica da Depressão Central (Figura 7).



Figura 7. Localização do município de Eldorado do Sul, situado na Depressão Central do RS.

O clima da região é classificado como subtropical úmido, Cfa, segundo a classificação de Köppen. A temperatura média anual é de 19,4 °C, variando de 9 °C no mês mais frio e 25 °C no mês mais quente do ano (Bergamaschi et al., 2003). A precipitação média é de 1.440 mm, com curtos períodos de déficit hídrico no verão. O solo do experimento é um Argissolo Vermelho distrófico típico (EMBRAPA, 2006), derivado de granito com 240 g kg⁻¹ de argila, sendo que os principais minerais na fração argila são caulinita (720 g kg⁻¹) e óxidos de ferro (109 g kg⁻¹) (Lovato et al., 2004).

5.2.3.2. Tratamentos e condução do experimento

Este estudo consistiu na aplicação de diferentes fertilizantes nitrogenados, na dose de 180 kg N ha⁻¹, aplicados em cobertura na cultura do milho em sistema plantio direto.

As fontes nitrogenadas utilizadas para a aplicação em cobertura foram:

1. Uréia comum;
2. Uréia com inibidor de urease;
3. Fertilizante de liberação lenta;
4. Sulfato de amônio e
5. Tratamento controle, sem adubação nitrogenada.

Os fertilizantes foram aplicados sem irrigação e com irrigação (10 mm), a qual foi aplicada imediatamente anterior e posterior à adubação. Esse experimento foi instalado no dia 07 de dezembro de 2010 numa área da Estação Experimental conduzida sob plantio direto há 25 anos, na sucessão milho/aveia. Utilizou-se um delineamento de blocos casualizados com três repetições

5.2.3.1. Avaliação das perdas de N-NH₃ por volatilização

Para a avaliação da volatilização de N-NH₃ utilizou-se coletor do tipo semi-aberto estático descrito por Nömmik (1973), com alterações propostas por Lara Cabezas & Trivelin (1990), conforme descrita no Estudo 1. Cinco bases de PVC foram utilizadas para cada tratamento, permitindo a utilização de uma base por coleta. Assim, os coletores foram transferidos para as bases subsequentes, a cada coleta, refletindo as condições ambientais (chuva, vento, temperatura) do período anterior, sem as interferências causadas pela presença da câmara (Cantarella et al., 1999).

As bases foram instaladas previamente à aplicação dos fertilizantes e protegidas para não haver entrada de fertilizante. A aplicação foi realizada manualmente a lanço na superfície do solo e, posteriormente, as bases foram descobertas e aplicado uma dose equivalente de N na área de cada base. No experimento em que foi realizada a irrigação antes da aplicação dos fertilizantes e o experimento sem a irrigação, as câmaras coletoras foram instaladas logo após a aplicação do N. Quando se procedeu a adubação nitrogenada antes da irrigação, as câmaras coletoras com os discos absorvedores foram instaladas logo após a irrigação.

As coletas foram realizadas até dez dias após a aplicação dos fertilizantes e, nesse período, foram feitas cinco coletas: aos 1, 2, 4, 6 e 10 dias após a aplicação das fontes nitrogenadas. As esponjas foram trocadas a cada coleta sendo armazenadas apenas as que estavam dispostas na parte inferior para posterior extração do N retido. A extração foi realizada com solução de KCl 1 mol L⁻¹, coletada em balão volumétrico de 500mL. Uma alíquota de 20 mL dessa solução foi submetida à destilação com arraste a vapor em semi-micro Kjeldahl (Tedesco et al., 1995). A quantidade de N-NH₃ volatilizado foi

calculada com base no volume total da solução utilizada para lavagem das esponjas e os resultados expressos em taxas diárias de volatilização de N-NH_3 e, a partir desses resultados, calculou-se a volatilização acumulada expressa como proporção (%) da dose de N aplicada.

5.2.3.2. Análise estatística

Os resultados de volatilização de amônia foram submetidos à análise de variância e as médias dos tratamentos comparadas pelo teste de Tukey ao nível de 5 % de probabilidade.

5.2.4. Resultados e Discussão

5.2.4.1. Condições meteorológicas

Durante a condução dos experimentos na EEA – UFRGS a temperatura média diária foi de 21,4 °C. A temperatura mínima registrada foi de 7,1 °C e a temperatura máxima 32,9 °C. Nesse período, ocorreram eventos de chuva no dia seguinte da aplicação (2,0 mm), no terceiro dia após a adubação (19 mm) e no quinto dia posterior à fertilização com 6,0 mm (Figura 8).

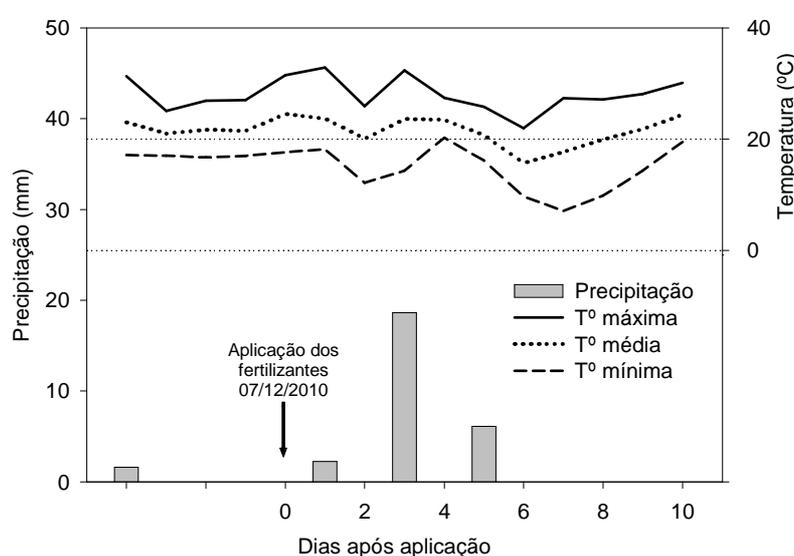


Figura 8. Precipitação e temperatura mínima, média e máxima diária registrada durante o período condução do experimento. Fonte: Estação Meteorológica da Estação Experimental Agronômica – UFRGS.

Segundo Huijsmans et al. (2003), as perdas de N por volatilização também são influenciadas por fatores ambientais, como a velocidade do vento, evapotranspiração e da umidade relativa do ar. Durante o experimento, a umidade relativa do ar permaneceu acima de 80 % na maioria dos dias (Figura 9c). A umidade relativa do ar está diretamente relacionada com a formação do orvalho que, em determinadas situações, é suficiente para solubilizar o fertilizante e incorporá-lo ao solo ou mesmo iniciar o processo de hidrólise enzimática (Bouwmeester et al., 1985).

A velocidade do vento e a temperatura do ar influenciam sobre a evapotranspiração diária, sendo que está relacionada com a difusão

ascendente de água no solo (Al-Kanani et al., 1991). O aumento da velocidade do vento de 2 para 5 m s⁻¹ provocou um aumento de aproximadamente 65 % nas perdas por volatilização (Huijsmans et al., 2003). Esse aumento é atribuído ao maior fluxo ascendente de amônia juntamente com vapor d'água proveniente do solo para a atmosfera. No entanto, a maior temperatura e velocidade do vento podem ocasionar um maior ressecamento da superfície do solo, reduzindo a troca gasosa entre o solo e a atmosfera (Bouwmeester et al., 1985).

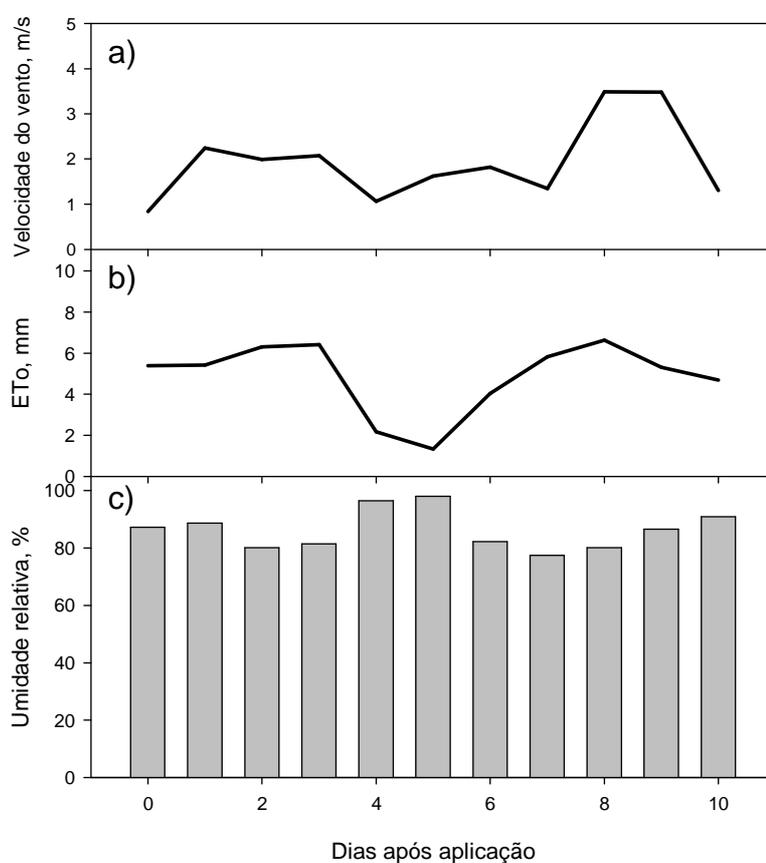


Figura 9. Dados meteorológicos registrados durante o experimento na EEA – UFRGS. Velocidade do vento (a), evapotranspiração diária (b) e umidade relativa do ar (c). Fonte: Estação Meteorológica da Estação Experimental Agrônômica – UFRGS.

5.2.4.2. Taxa de volatilização diária

As maiores taxas de volatilização diária nos tratamentos concentraram-se nos quatros primeiros dias após a aplicação dos fertilizantes, com os maiores picos de emissão no segundo dia após a adubação (Figura 10a, b, c). Os fatores meteorológicos (temperatura elevada, alta umidade relativa do ar e evapotranspiração e o aumento da velocidade do vento) no início das avaliações favoreceram as maiores perdas de N por volatilização. Quando os tratamentos foram aplicados sem a irrigação, a maior taxa de volatilização diária ocorreu na uréia comum, atingindo pico de 11 kg de N ha⁻¹ dia⁻¹ dois dias após a aplicação. O fertilizante de liberação lenta e a uréia com inibidor de urease apresentaram picos de emissão menores que a uréia, com 9 e 4,5 kg de N ha⁻¹ dia⁻¹, respectivamente, também no segundo dia após a aplicação. As perdas diárias do sulfato de amônio foram muito baixas, menores que 1 kg de N ha⁻¹ dia⁻¹.

Quando os fertilizantes foram aplicados em solo úmido, a fonte nitrogenada que apresentou a maior taxa de volatilização diária foi a uréia comum, com pico de emissão de 17 kg ha⁻¹ dia⁻¹ no primeiro dia após a aplicação. Segundo Clay (1990), a taxa de volatilização de NH₃ a campo é maior um dia após a aplicação de uréia quando a época de aplicação corresponde com a temperatura máxima diária do solo e o decréscimo do teor de água do solo. A disponibilidade de água, temperatura elevada e alta evapotranspiração foram condições favoráveis para a maior transformação da uréia e conseqüente perda para a atmosfera.

O fertilizante de liberação lenta apresentou comportamento similar ao da uréia, ou seja, com alta perda no primeiro dia e reduzindo bruscamente nos dias seguintes. Assim como a uréia, o fertilizante de liberação lenta apresentou pico de volatilização próximo de 17 kg de N ha⁻¹ dia⁻¹. Como esse fertilizante apresenta em sua formulação 19 % de N de origem amídica, este também está sujeito a perdas por volatilização. Esta maior volatilização está relacionada ao aumento da concentração de NH₄⁺ no solo devido à menor taxa de nitrificação (Prakasa Rao & Puttanna, 1987).

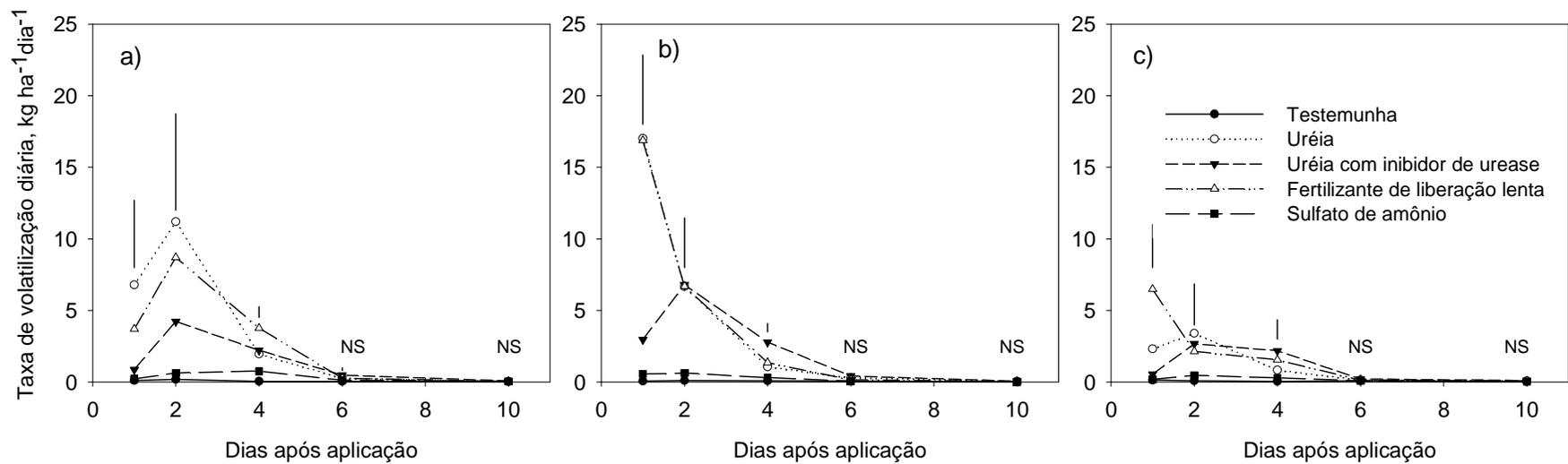


Figura 10. Taxa de volatilização diária das diferentes fontes nitrogenadas aplicadas no experimento conduzido sem irrigação (a), com irrigação anterior à aplicação (b) e com irrigação posterior à aplicação (c). Barras verticais indicam a diferença mínima significativa segundo o teste de Tukey ($p \leq 0,05$). NS: não significativo.

Com as condições ambientais favoráveis às perdas de N por volatilização e com alta umidade do solo, o efeito do inibidor de urease adicionado à uréia na redução das perdas de N por volatilização fica mais pronunciado. A adição de inibidor de urease à uréia retardou o pico de volatilização diária para o segundo dia após a aplicação, bem como reduziu o pico de emissão diária para $7 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$, enquanto o pico da uréia foi no primeiro dia e quase 2,5 vezes superior. O sulfato de amônio, mesmo com a umidade do solo elevada no momento da aplicação, manteve as taxas diárias muito baixas também nesse tratamento.

Quando realizada a irrigação após a adubação nitrogenada os picos de volatilização diária foram reduzidos na maioria dos fertilizantes. O pico de volatilização de N da uréia manteve-se no segundo dia após a aplicação, porém a perda máxima diária baixou de $17 \text{ kg de N ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ quando aplicada em solo úmido (irrigação anterior) para $3,4 \text{ kg de N ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ quando irrigado posteriormente à adubação. O fertilizante de liberação lenta também teve seu pico de emissão reduzido em relação aos demais experimentos. O máximo atingido foi de $6,5 \text{ kg de N ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ no primeiro dia após a adubação. O sulfato de amônio, nesse experimento, apresentou perdas negligenciáveis de N por volatilização, assemelhando-se às perdas naturais do solo, registradas no tratamento sem adubação nitrogenada.

5.2.4.3. Perdas acumuladas de N-NH₃

Os diferentes fluxos de emissão de N-NH₃ provocados pelas diferentes épocas de irrigação resultaram em diferentes quantidades de amônia volatilizada acumulada no período. As perdas acumuladas de N por volatilização da amônia das diferentes fontes nitrogenadas estão ilustradas na figura 11a, b, c.

No experimento conduzido sem irrigação (Figura 11a), a fonte nitrogenada aplicada em cobertura em PD que apresentou a maior perda acumulada por volatilização da amônia foi a uréia, acumulando 12,6 % do N aplicado. Essa perda de N foi semelhante ao encontrado por Rozas et al. (1999), quando aplicaram uréia em superfície, 13 % do N aplicado.

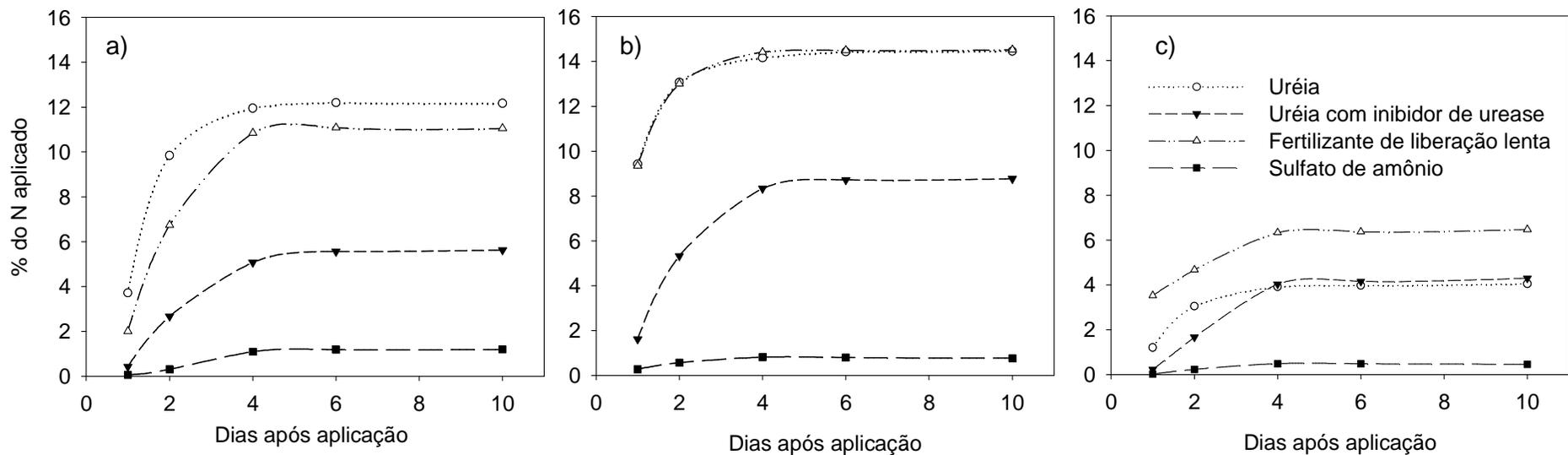


Figura 11. Perdas acumuladas de N por volatilização de amônia dos fertilizantes nitrogenados aplicados em cobertura sem irrigação (a), com irrigação anterior à adubação (b) e com irrigação posterior à adubação (c).

As perdas de fertilizante de liberação lenta foram semelhantes às perdas da uréia, correspondendo a 11 % do N aplicado. Esses resultados corroboram com os dados obtidos por Fontoura & Bayer (2010) na região Centro-Sul do Paraná, que, na média de quatro anos, registraram perdas de 13 % do N aplicado. Em condições naturais de campo, a utilização de inibidor de urease nesse experimento mostrou-se eficiente na redução das perdas de N da uréia por volatilização. O acumulado desse tratamento foi de 5,6 % do N aplicado, representando uma redução de aproximadamente 50 % em relação à uréia comum.

Pereira et al. (2009) e Cantarella et al. (2008) também demonstraram a eficiência do inibidor de urease, com reduções que variaram de 15 a 78 % nas perdas por volatilização, dependendo das condições ambientais. Artola et al. (2011) registraram maiores teores de N no tecido vegetal proveniente da uréia quando adicionado à ela inibidor de urease, representando uma maior recuperação do N pelas plantas, refletindo numa maior eficiência na adubação nitrogenada de cobertura.

Em diversos estudos já relatados (Anjos, 1973; Lara Cabezas et al., 1997b; Vitti et al., 2002), o sulfato de amônio tem sido eficiente na redução das perdas de N por volatilização. Experimentos conduzidos a campo têm registrado perdas muito baixas, próximas a 1 % do N aplicado. Essa eficiência na redução das perdas por volatilização com a substituição da uréia pelo sulfato pode ser verificada nesse experimento, no qual as perdas acumuladas atingiram o máximo de 1,2 % do N aplicado no período observado. Essa eficiência tem sido atribuída à natureza ácida da reação desse fertilizante e à presença do íon SO_4^- , que atua como íon acompanhante (Lara Cabezas et al., 1997a, b).

No experimento em que os fertilizantes foram aplicados sobre o solo úmido, devido à irrigação realizada previamente (Figura 11b), as maiores perdas acumuladas por volatilização foram da uréia e do fertilizante de liberação lenta, ambos perdendo 14,5 % do N aplicado. Na aplicação de uréia com inibidor de urease, as perdas de N por volatilização foram menores, 8,8 % do N aplicado. No entanto, essa redução nas perdas acumuladas não representou uma diferença significativa entre os tratamentos (Tabela 7), mas essas perdas foram significativamente superiores às perdas de N-NH_3 do

sulfato de amônio que, mesmo com a umidade inicial alta, apresentou perdas similares ao tratamento testemunha, sem adição de nitrogênio.

A incorporação dos fertilizantes pela irrigação é uma prática efetiva na redução das perdas de N-NH_3 do sistema solo-planta (Bouwmeester et al., 1985; Black et al., 1987). As perdas de N da uréia por volatilização foram reduzidas para 4,1 % do N aplicado (Figura 11c) quando irrigado após a adubação, quantidade essa muito inferior à encontrada por Lara Cabezas et al. (1997b), que registraram perdas acumuladas próximas a 40 % do N aplicado mesmo após irrigação. Dawar et al. (2011) atribuem essa redução ao movimento do amônio proveniente da uréia, tanto lateral como verticalmente, que a adição de água promove a partir da camada superficial para a camada de subsuperficial do solo, levando a um maior contato com o solo, ficando retido às cargas negativas do mesmo.

Com a baixa perda da uréia, o efeito do inibidor de urease não fica evidente quando comparado com a aplicação de uréia comum e com outras fontes nitrogenadas. O fertilizante de liberação lenta foi a fonte nitrogenada que apresentou a maior perda acumulada entre os tratamentos. Mesmo com a irrigação, a perda acumulada foi de 6,5 % do N aplicado e o sulfato de amônio apresentou a menor perda entre os tratamentos, 0,5 % do N aplicado.

Independente da adoção da irrigação, as perdas acumuladas de N da uréia apresentaram mais de 95 % do total das perdas em apenas quatro dias após a aplicação. Esses resultados são semelhantes aos encontrados por Duarte et al. (2007) que registraram as maiores perdas de N por volatilização entre o segundo e o terceiro dia após a aplicação e que após o quarto dia da aplicação praticamente não houveram perdas. As demais fontes nitrogenadas utilizadas nesse experimento apresentaram o mesmo comportamento que a uréia. Na terceira coleta, as perdas acumuladas desses fertilizantes contabilizavam mais de 90 % do total de N volatilizado perdido nesse período (Figura 11a, b, c).

Tabela 7. Perdas acumuladas de nitrogênio por volatilização no período de 10 dias após aplicação de diferentes fontes nitrogenadas de acordo com o sistema de irrigação aplicado no sistema de PD na região da Depressão Central do RS

Tratamento	Sem Irrigação	Irrigação anterior	Irrigação posterior
	----- Kg N ha ⁻¹ -----		
Testemunha	0,6 Ac	0,6 Ac	0,6 Ab
Uréia	22,5 Aa	26,6 Aa	7,9 Bab
Uréia com inibidor de urease	10,7 Ab	16,3 Ab	8,4 Aab
Fertilizante de liberação lenta	20,5 Aa	26,7 Aa	12,2 Ba
Sulfato de amônio	2,7 Abc	1,9 Ac	1,5 Ab
CV	45,6	29,7	52,7

Tratamentos com médias seguidas por letras iguais, maiúsculas na linha e minúscula na coluna, não diferem pelo teste de Tukey ao nível de 5 %.

A expressiva redução na taxa diária de volatilização após quatro dias da aplicação dos fertilizantes pode indicar que a amônia proveniente dos fertilizantes moveu-se para camadas mais profundas do solo, onde o processo de volatilização é reduzido (Rodrigues & Kiehl, 1986, 1992). A presença de orvalho e a ocorrência de um pequeno volume de chuva (Bouwmeester et al., 1985) no primeiro dia após a aplicação, podem ter contribuído para a solubilização e uma pequena difusão inicial dos fertilizantes no solo e, no terceiro dia após a aplicação, essa difusão dos fertilizantes no solo ter aumentado com a ocorrência de nova precipitação (19 mm), reduzindo as perdas por volatilização.

O efeito da irrigação sobre as perdas de nitrogênio da uréia por volatilização não foi somente sobre a cinética das perdas, mas também sobre a magnitude dessas perdas. A aplicação de uréia em superfície sem irrigação apresentou uma perda acumulada de 12 % do N aplicado, enquanto que, quando aplicada em solo úmido essa perda aumentou para 14,5 % do N aplicado. Com a maior umidade do solo e elevada temperatura, as perdas de N por volatilização da amônia são maiores e mais rápidas (Beyrouy et al., 1988), pois nessa condição ocorre a completa dissolução dos grânulos e a temperatura alta favorece a atividade da urease, conseqüentemente a maior

taxa de hidrólise da uréia (Chin & Kroontje, 1963). A maior umidade também facilita a difusão ascendente de amônia que ocorre juntamente com a evaporação da água do solo (Al-Kanani et al., 1991).

Nesse aspecto, o sistema plantio direto pode tanto favorecer quanto diminuir as perdas por volatilização. O maior teor de material orgânico e a presença de palha sobre a superfície do solo aumentam a degradação da uréia, visto que boa parte da atividade de enzima urease é proveniente de resíduos vegetais (Paulson & Kurtz, 1969), aumentando a transformação do N dos fertilizantes. No entanto, a presença de palha na superfície do solo e o maior teor de matéria orgânica do solo mantêm a umidade do solo e reduzem as oscilações de temperatura, e contribui com o aumento da CTC do solo (Ferguson et al., 1984), reduzindo as perdas de $N-NH_3$.

De modo geral, as fontes nitrogenadas foram afetadas pela maior umidade solo, com exceção do sulfato de amônio que pouco variou em função da irrigação. O processo de transformação do N dos fertilizantes para a forma amoniacal é fortemente influenciado pela umidade do solo na hora da aplicação do fertilizante (Kissel et al., 2004), pois a disponibilidade de água está relacionada com o processo inicial da quebra das moléculas dos fertilizantes. Quando a uréia é aplicada em solo úmido, em que a difusão no solo não é favorecida e as condições ambientais são favoráveis à volatilização, tem as perdas de N aumentadas (Bouwmeester et al., 1985). Isso pode ser visualizado na figura 11a, b e c, comparando os tratamentos sem irrigação e quando a irrigação é realizada anteriormente à aplicação da uréia, no qual houve um aumento de 18 % nas perdas de $N-NH_3$.

Esse aumento nas perdas pode ter sido ocasionado, além da umidade do solo, pelas altas temperaturas ocorridas durante o período. Como o solo estava úmido quando foi aplicada a uréia, a dissolução desta foi rápida, porém ela permaneceu na camada superficial do solo, a qual apresenta uma maior quantidade de palha e, conseqüentemente, maior atividade microbiana e enzimática (Barreto & Westerman, 1989). Nessa condição, a utilização de inibidor de urease reduz o processo de transformação microbiana da uréia (Scivittaro et al., 2010). O maior tempo de permanência do N no solo permite maior difusão e retenção deste no solo, bem como ser absorvido pelas

culturas. A utilização de inibidor de urease reduziu em aproximadamente 40 % as perdas de N da uréia quando aplicada em solo úmido.

Além da utilização de inibidor de urease, a adoção de práticas de manejo que visam incorporar os fertilizantes no solo são alternativas para reduzir as perdas de N por volatilização. A incorporação da uréia no solo, pela aplicação de uma lâmina d'água de 10 mm por irrigação, foi suficiente para reduzir a volatilização de amônia em 70 % do N volatilizado, quando comparado com a aplicação em solo úmido, reduzindo as perdas para 4 % do N aplicado.

A melhor alternativa para a redução das perdas por volatilização da adubação em cobertura é a utilização de sulfato de amônio como fonte nitrogenada. Em todos os blocos, independente da utilização de irrigação, as perdas acumuladas não ultrapassaram 3 kg de N ha⁻¹ (Tabela 7). Essas perdas são muito baixas e se assemelham às perdas obtidas nos tratamentos controles, sem adubação nitrogenada. É importante observar que, tecnicamente, o sulfato de amônio é vantajoso na redução das perdas de N por volatilização em relação aos demais fertilizantes, no entanto o menor teor de nutriente na sua formulação o torna mais dispendioso em relação, por exemplo, à uréia.

5.2.5. Conclusões

Nas condições climáticas da Depressão Central do Rio Grande do Sul, em sistema plantio direto, as perdas normais dos fertilizantes nitrogenados de origem amídica são relativamente baixas (<15 % do N aplicado) e quando adicionado inibidor de urease este se mostra efetivo na redução das perdas por volatilização, quando as condições ambientais são favoráveis para as perdas de N.

As menores perdas de N foram registradas quando aplicado sulfato de amônio, independente da irrigação. O fertilizante de liberação lenta não foi uma fonte eficiente na redução das perdas de N por volatilização, apresentando perdas iguais ou superiores às perdas da uréia.

Com a aplicação dos fertilizantes em solo úmido há uma tendência no aumento das perdas de N por volatilização, principalmente no primeiro dia após a aplicação. Entretanto, quando realizada a irrigação após a adubação nitrogenada, essas perdas são minimizadas (< 4,5 % do N aplicado). Assim, a aplicação de uma lâmina d'água após a adubação contribui para aumentar a eficiência da adubação de N em cobertura.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AL-KANANI, T.; MACKENZIE, A. F.; BARTHAKUR, N. N. Soil water and ammonia volatilization relationships with surface-applied nitrogen fertilizer solutions. **Soil Science Society of America Journal**. Madison, v.55, n.6, p.1761-1766, 1991.

ANJOS, J. T. **Perdas de nitrogênio, por volatilização de amônia, proveniente da uréia e do sulfato de amônia aplicados em solos cultivados**. 1973. 88 f. (Mestrado em Ciência do Solo), Departamento de Solos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 1973.

ARGENTA, G.; SANGOI, L.; SILVA, P. R. F.; RAMPAZZO, C.; GRACIETTI, L. C.; STRIEDER, M. L.; FORSTHOFER, E. L.; SUHRE, E. Potencial de rendimento de grãos de milho em dois ambientes e cinco sistemas de produção. **Scientia Agraria**. Curitiba, v.4, n.1-2, p.27-34, 2003.

ARTOLA, E.; CRUCHAGA, S.; ARIZ, I.; MORAN, J.; GARNICA, M.; HOUDUSSE, F.; MINA, J.; IRIGOYEN, I.; LASA, B.; APARICIO-TEJO, P. Effect of N-(n-butyl) thiophosphoric triamide on urea metabolism and the assimilation of ammonium by *Triticum aestivum* L. **Plant Growth Regulation**. Dordrecht, v.63, n.1, p.73-79, 2011.

BARRETO, H. J.; WESTERMAN, R. L. Soil urease activity in winter wheat residue management systems. **Soil Science Society of America Journal**. Madison, v.53, n.5, p.1455-1458, 1989.

BASSO, C. J.; CERETTA, C. A.; PAVINATO, P. S.; SILVEIRA, M. J. Perdas de nitrogênio de dejetos líquidos de suínos por volatilização de amônia. **Ciência Rural**. Santa Maria, v.34, n.6, p.1773-1778, 2004.

BERGAMASCHI, H.; GUADAGNIN, M. R.; CARDOSO, L. S.; SILVA, M. I. G. **Clima da Estação Experimental da UFRGS (e região de abrangência)**. Porto Alegre: UFRGS. 2003. 77 p.

BEYROUTY, C. A.; SOMMERS, L. E.; NELSON, D. W. Ammonia volatilization from surface-applied urea as affected by several phosphoroamide compounds. **Soil Science Society of America Journal**. Madison, v.52, n.4, p.1173-1178, 1988.

BLACK, A. S.; SHERLOCK, R. R.; SMITH, N. P. Effect of timing of simulated rainfall on ammonia volatilization from urea, applied to soil of varying moisture content. **Journal of Soil Science**. Baltimore, v.38, n.4, p.679-687, 1987.

BOARETTO, A. E.; SPOLIDORIO, E. S.; FREITAS, J. G.; TRIVELIN, P. C. O.; MURAOKA, T.; CANTARELLA, H. Fate of ¹⁵N-urea applied to wheat-soybean succession crop. **Bragantia**. Campinas, v.63, n.2, p.265-274, 2004.

BOUWMEESTER, R. J. B.; VLEK, P. L. G.; STUMPE, J. M. Effect of environmental factors on ammonia volatilization from a urea-fertilized soil. **Soil Science Society of America Journal**. Madison, v.49, n.2, p.376-381, 1985.

BRAGAGNOLO, N.; MIELNICZUK, J. Cobertura do solo por resíduos de oito seqüências de culturas e seu relacionamento com a temperatura e umidade do solo, germinação e crescimento inicial do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v.14, n.1, p.91-98, 1990.

CAMPOS, A. X. **Eficiência da uréia e do sulfato de amônio na cultura do milho (zea mays l.)**. 1976. 65 f. (Mestrado em Ciência do Solo), Departamento de Solos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 1976.

CANTARELLA, H.; ROSSETO, R.; BARBOSA, W.; PENNA, M. J.; RESENDE, L. C. L. Perdas de N por volatilização da amônia e resposta da cana-de-açúcar à adubação nitrogenada em sistema de colheita de cana sem queima prévia. In: CONGRESSO NACIONAL DA STAB. 7. 1999. **Anais...** Londrina. 1999.

CANTARELLA, H.; TRIVELIN, P. C. O.; CONTIN, T. L. M.; DIAS, F. L. F.; ROSSETTO, R.; MARCELINO, R.; COIMBRA, R. B.; QUAGGIO, J. A. Ammonia volatilisation from urease inhibitor-treated urea applied to sugarcane trash blankets. **Scientia Agricola**. Piracicaba, v.65, n.4, p.397-401, 2008.

CHIN, W.-T.; KROONTJE, W. Urea hydrolysis and subsequent loss of ammonia. **Soil Science Society of America Journal**. Madison, v.27, n.3, p.316-318, 1963.

CLAY, D. E.; MALZER, G. L.; ANDERSON, J. L. Ammonia volatilization from urea as influenced by soil temperature, soil water content, and nitrification and hydrolysis inhibitors. **Soil Science Society of America Journal**. Madison, v.54, n.1, p.263-266, 1990.

CONAB. 2011. **Acompanhamento de safra brasileira: grãos, Quarto levantamento**. Disponível em: <<http://www.conab.gov.br/conabweb/index.php?PAG=131>>. Acesso em: 26 jan. 2011.

CORSTANJE, R.; KIRK, G. J. D.; PAWLETT, M.; READ, R.; LARK, R. M. Spatial variation of ammonia volatilization from soil and its scale-dependent correlation with soil properties. **European Journal of Soil Science**. Oxford, v.59, n.6, p.1260-1270, 2008.

COSTA, M. C. G.; VITTI, G. C.; CANTARELLA, H. Volatilização de N-NH₃ de fontes nitrogenadas em cana-de-açúcar colhida sem despalha a fogo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v.27, n.4, p.631-637, 2003.

DA ROS, C. O.; AITA, C.; GIACOMINI, S. J. Volatilização de amônia com aplicação de uréia na superfície do solo, no sistema plantio direto. **Ciência Rural**. Santa Maria, v.35, n.4, p.799-805, 2005.

DAWAR, K.; ZAMAN, M.; ROWARTH, J.; BLENNERHASSETT, J.; TURNBULL, M. Urea hydrolysis and lateral and vertical movement in the soil: effects of urease inhibitor and irrigation. **Biology and Fertility of Soils**. New York, v.47, n.2, p.139-146, 2011.

DENMEAD, O. T.; NULSEN, R.; THURTELL, G. W. Ammonia exchange over a corn crop. **Soil Science Society of America Journal**. Madison, v.42, n.5, p.840-842, 1978.

DUARTE, F. M.; POCOJESKI, E.; SILVA, L. S.; GRAUPE, F. A.; BRITZKE, D. Perdas de nitrogênio por volatilização de amônia com aplicação de uréia em solo de várzea com diferentes níveis de umidade. **Ciência Rural**. Santa Maria, v.37, n.3, p.705-711, 2007.

EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos: 2 ed. 2006. 306 p.

ERNST, J. W.; MASSEY, H. F. The effects of several factors on volatilization of ammonia formed from urea in the soil. **Soil Science Society of America Journal**. Madison, v.24, n.2, p.87-90, 1960.

FENN, L. B.; KISSEL, D. E. Ammonia volatilization from surface applications of ammonium compounds on calcareous soils: I. General theory. **Soil Science Society of America Journal**. Madison, v.37, n.6, p.855-859, 1973.

FERGUSON, R. B.; KISSEL, D. E.; KOELIKER, J. K.; BASEL, W. Ammonia volatilization from surface-applied urea: Effect of hydrogen ion buffering capacity. **Soil Science Society of America Journal**. Madison, v.48, n.3, p.578-582, 1984.

FONTOURA, S. M. V.; BAYER, C. **Adubação nitrogenada para alto rendimento de milho em plantio direto na região Centro-Sul do Paraná**. Guarapuava: Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária. 2008. 32 p.

FONTOURA, S. M. V.; BAYER, C. Ammonia volatilization in no-till system in the south-central region of the State of Paraná, Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v.34, n.5, p.1677-1684, 2010.

HUIJSMANS, J. F. M.; HOL, J. M. G.; VERMEULEN, G. D. Effect of application method, manure characteristics, weather and field conditions on ammonia volatilization from manure applied to arable land. **Atmospheric Environment**. Oxford, v.37, n.26, p.3669-3680, 2003.

INDA JUNIOR, A. V.; BAYER, C.; CONCEIÇÃO, P. C.; BOENI, M.; SALTON, J. C.; TONIN, A. T. Variáveis relacionadas à estabilidade de complexos organo-minerais em solos tropicais e subtropicais brasileiros. **Ciência Rural**. Santa Maria, v.37, n.5, p.1301-1307, 2007.

KELLER, G. D.; MENGEL, D. B. Ammonia volatilization from nitrogen fertilizers surface applied to no-till corn. **Soil Science Society of America Journal**. Madison, v.50, n.4, p.1060-1063, 1986.

KISSEL, D. E.; CABRERA, M. L.; VAIIO, N.; CRAIG, J. R.; REMA, J. A.; MORRIS, L. A. Rainfall timing and ammonia loss from urea in a loblolly pine plantation. **Soil Science Society of America Journal**. Madison, v.68, n.5, p.1744-1750, 2004.

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**. Viçosa, v.14, n.3, p.345-352, 1990.

LARA CABEZAS, W. A. R.; SOUZA, M. A. Volatilização de amônia, lixiviação de nitrogênio e produtividade de milho em resposta à aplicação de misturas de uréia com sulfato de amônio ou com gesso agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v.32, n.6, p.2331-2342, 2008.

LARA CABEZAS, W. A. R.; KORNDÖRFER, G. H.; MOTTA, S. A. Volatilização de N-NH₃ na cultura de milho: II. Avaliação de fontes sólidas e fluídas em sistema de plantio direto e convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Campinas, v.21, n.3, p.489-496, 1997a.

LARA CABEZAS, W. A. R.; KORNDÖRFER, G. H.; MOTTA, S. A. Volatilização de N-NH₃ na cultura de milho: I. Efeito da irrigação e substituição parcial da uréia por sulfato de amônio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Campinas, v.21, n.3, p.481-487, 1997b.

LARA CABEZAS, W. A. R.; TRIVELIN, P. C. O.; KORNDORFER, G. H.; PEREIRA, S. Balanço da adubação nitrogenada sólida e fluida de cobertura na cultura de milho, em sistema de plantio direto no Triângulo Mineiro (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v.24, n.2, p.363-376, 2000.

LEGUIZAMON ROJAS, C. A. **Dinâmica do nitrogênio no sistema latossolo-milho sob plantio direto e preparo convencional, plantas de cobertura de inverno e adubação nitrogenada**. 2009. 199 f. (Doutorado em Ciência do Solo), Departamento de Solos, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2009.

LOVATO, T.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; VEZZANI, F. Adição de carbono e nitrogênio e sua relação com os estoques no solo e com o rendimento do milho em sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v.28, n.1, p.175-187, 2004.

NÖMMIK, H. The effect of pellet size on the ammonia loss from urea applied to forest soil. **Plant and Soil**. The Hague, v.39, n.2, p.309 - 318, 1973.

OVERREIN, L. N.; MOE, P. G. Factors affecting urea hydrolysis and ammonia volatilization in soil. **Soil Science Society of America Journal**. Madison, v.31, n.1, p.57-61, 1967.

PAULSON, K. N.; KURTZ, L. T. Locus of urease activity in soil. **Soil Science Society of America Journal**. Madison, v.33, n.6, p.897-901, 1969.

PEREIRA, H. S.; LEÃO, A. F.; VERGINASSI, A.; CARNEIRO, M. A. C. Ammonia volatilization of urea in the out-of-season corn. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v.33, n.6, p.1685-1694, 2009.

PIRES, J. L. F.; LIMA, M. I. P. M.; VOSS, M.; SCHEEREN, P. L.; WIETHÖLTER, S.; CUNHA, G. R.; IGNACZAK, J. C.; CAIERÃO, E. 2005. **Avaliação de cultivares de trigo em sistema de manejo tradicional e otimizado, Passo Fundo, 2004**. Disponível em: <http://www.cnpt.embrapa.br/biblio/do/p_do54.htm>. Acesso em: 09 fev. 2011.

PRAKASA RAO, E.; PUTTANNA, K. Nitrification and ammonia volatilisation losses from urea and dicyandiamide-treated urea in a sandy loam soil. **Plant and Soil**. Dordrecht, v.97, n.2, p.201-206, 1987.

RAWLUK, C. D. L.; GRANT, C. A.; RACZ, G. J. Ammonia volatilization from soils fertilized with urea and varying rates of urease inhibitor NBPT. **Canadian Journal of Soil Science**. Ottawa, v.81, n.2, p.239-246, 2001.

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, n.1, 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**. Viçosa, v.16, n.3, p.403-408, 1992.

ROZAS, H. N. S.; ECHEVERRÍA, H. N. E.; STUDDERT, G. A.; ANDRADE, F. H. No-till maize nitrogen uptake and yield: Effect of urease inhibitor and application time. **Agronomy Journal**. Madison, v.91, n.6, p.950-955, 1999.

SANGOI, L.; ERNANI, P. R.; LECH, V. A.; RAMPAZZO, C. Volatilização de N-NH₃ em decorrência da forma de aplicação de uréia, manejo de resíduos e tipo de solo, em laboratório. **Ciência Rural**. Santa Maria, v.33, n.4, p.687-692, 2003.

SCIVITTARO, W. B.; GONÇALVES, D. R. N.; VALE, M. L. C.; RICORDI, V. G. Perdas de nitrogênio por volatilização de amônia e resposta do arroz irrigado à aplicação de ureia tratada com o inibidor de urease NBPT. **Ciência Rural**. Santa Maria, v.40, n.6, p.1283-1289, 2010.

SILVA, A. J.; LIMA JÚNIOR, M. A.; FERREIRA, N. C. M.; FRAGA, V. S. Perdas de amônia por volatilização proveniente da uréia aplicada a solos dos trópicos úmidos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Campinas, v.19, n.1, p.141-144, 1995.

SOUZA, Z. M.; ALVES, M. C. Propriedades químicas de um Latossolo Vermelho distrófico de cerrado sob diferentes usos e manejos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v.27, n.1, p.133-139, 2003.

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

VIEIRA, F. C., B.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; ZANATTA, J.; BISSANI, C., A. Long-term acidification of a Brazilian Acrisol as affected by no till cropping systems and nitrogen fertiliser. **Australian Journal of Soil Research**. Melbourne, v.46, n.1, p.17 - 26, 2008.

VITTI, G. C.; TAVARES, J. E.; LUZ, P. H. C.; FAVARIN, J. L.; COSTA, M. C. G. Influência da mistura de sulfato de amônio com uréia sobre a volatilização de nitrogênio amoniacal. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**. Viçosa, v.26, n.3, p.663-671, 2002.

VOLK, G. M. Volatile loss of ammonia following surface application of urea to turf or bare soils. **Agronomy Journal**. Madison, v.51, n.12, p.746-749, 1959.

VOLK, G. M. Ammonia losses from soils, gaseous loss of ammonia from surface-applied nitrogenous fertilizers. **Journal of Agricultural and Food Chemistry**. Easton, v.9, n.4, p.280-283, 1961.

7. APÊNDICES

Apêndice 1. Dados meteorológicos dos períodos de realização dos experimentos no município de Guarapuava – PR.

DAA	Inverno 2009				Inverno 2010				Verão 2009/10				Verão 2010/11			
	precip	Tmax	Tmed	Tmin	precip	Tmax	Tmed	Tmin	precip	Tmax	Tmed	Tmin	precip	Tmax	Tmed	Tmin
-5	0,2	22,6	16,5	7,6	13,2	17,2	9,1	3,8	8,4	25,8	18,2	13,4	21,4	21,9	17,2	14,8
-4	0,8	12,0	7,0	3,8	0,0	13,6	6,2	1,9	0,2	24,4	17,8	12,5	45,2	17,6	16,1	14,8
-3	0,0	14,4	7,4	2,4	0,0	13,1	5,4	-0,3	4,0	24,4	19,3	15,7	38,2	22,7	17,2	14,5
-2	0,0	18,9	10,5	5,2	0,0	13,1	6,8	0,0	4,4	29,8	21,3	16,7	0,0	24,7	18,7	14,5
-1	0,0	23,4	14,3	6,2	0,0	15,7	8,5	3,2	0,0	30,0	21,8	16,5	7,0	24,5	19,7	16,5
0	0,0	25,0	16,2	9,4	0,0	19,0	10,2	4,9	25,6	27,5	20,2	15,7	0,2	28,6	20,7	12,0
1	0,0	23,3	15,3	9,5	0,0	22,2	12,8	4,9	0,0	25,1	19,3	14,7	0,0	25,1	19,0	15,3
2	0,0	23,6	16,9	10,7	0,0	21,9	14,2	7,1	0,0	26,6	19,1	13,7	12,0	20,4	17,4	15,0
3	4,6	17,0	14,2	12,0	0,0	24,4	15,1	7,4	0,0	28,4	21,6	14,9	20,0	26,0	18,7	0,0
4	51,8	14,5	12,0	10,4	0,0	23,6	15,4	8,5	0,0	29,8	23,7	17,6	5,8	18,2	13,5	9,3
5	17,6	17,7	14,1	12,3	0,0	24,7	16,7	9,6	30,4	28,9	19,1	15,9	49,0	14,8	11,7	8,1
6	4,0	14,6	11,3	5,4	0,0	25,7	19,0	12,4	6,2	21,9	18,1	15,3	0,8	18,4	12,9	7,7
7	0,0	15,5	7,6	0,7	0,0	26,4	19,5	13,6	18,6	24,0	17,1	13,1	0,2	16,4	13,9	11,0
8	0,0	14,8	8,4	3,3	0,0	25,9	19,3	14,5	0,0	27,8	20,2	12,0	10,4	25,5	19,0	14,9
9	1,2	12,0	9,0	5,8	0,0	26,2	18,8	13,1	0,0	28,4	21,4	16,5	0,2	27,5	21,0	16,4
10	1,0	12,3	10,1	7,0	0,0	25,6	17,7	12,2	28,8	28,4	19,4	16,1	0,0	28,3	21,2	16,4
11	0,0	16,8	12,3	7,7	0,0	27,7	18,7	11,9	6,8	24,5	19,8	16,6	0,0	27,3	19,4	15,7
12	0,0	19,0	12,6	8,6	0,0	22,8	16,9	11,6	0,4	24,7	19,8	16,5	11,8	26,7	20,2	15,2
13	0,0	21,4	13,8	8,3	0,0	23,3	15,0	9,1	6,8	24,3	19,9	16,7	1,0	26,1	19,2	15,4
14	0,0	22,8	15,0	7,7	0,0	24,5	18,3	13,5	0,2	26,8	20,6	15,7	0,6	26,1	18,8	15,7
15	0,0	24,8	15,3	7,6	0,0	26,4	20,1	14,7	2,6	24,7	19,9	15,5	0,4	24,9	19,7	16,6
16	0,0	25,6	16,4	10,1	0,0	26,6	19,4	12,7	0,0	29,5	21,5	14,3	0,0	26,1	20,2	16,7
17	0,0	24,4	17,0	10,3	0,0	20,8	13,4	5,3	15,2	28,6	20,7	16,5	10,4	27,4	20,8	15,3
18	0,0	25,4	18,5	12,6	0,0	20,4	11,0	0,0	0,0	25,1	20,0	14,2	10,6	26,5	19,3	13,8
19	2,4	25,8	19,3	14,8	0,0	13,9	10,0	6,5	0,0	24,5	18,7	14,3	1,0	25,5	18,8	14,5
20	50,2	17,6	15,2	13,0	0,0	20,9	13,2	7,4	0,0	22,6	16,7	12,2	4,4	26,6	19,5	15,1
21	18,4	20,3	15,1	11,5	0,0	18,5	12,6	8,2	0,0	26,5	19,3	13,0	0,0	25,3	18,3	12,7

DAA: Dias após aplicação; Precip: precipitação (mm); Tmax: temperatura máxima diária (°C); Tmed: temperatura média diária (°C); Tmin: temperatura mínima diária (°C)

Apêndice 2. Dados meteorológicos da Estação Experimental Agronômica do mês de dezembro 2010, Eldorado do Sul – RS.

Dezembro 2010							
DIA	TEMPERATURA DO AR			CHUVA mm	UR %	VENTO m/s	ET _o mm
	MÉDIA	MAX	MIN				
1	20,7	29,4	10,7	0	73	2,3	6,5
2	22,6	28,8	16,2	1	90	1,2	0,0
3	23,0	31,3	17,2	2	90	1,7	3,8
4	21,0	25,1	17,0	0	87	2,4	2,6
5	21,7	26,9	16,7	0	87	2,3	4,3
6	21,5	27,0	17,0	0	86	2,9	5,7
7	24,5	31,5	17,7	0	87	0,8	5,3
8	23,7	32,9	18,2	2	89	2,2	5,4
9	20,1	25,9	12,1	0	80	1,9	6,3
10	23,6	32,4	14,3	19	81	2,0	6,4
11	23,5	27,4	20,3	0	96	1,0	2,1
12	20,7	25,8	16,1	6	98	1,6	1,3
13	15,7	22,0	9,7	0	82	1,8	4,0
14	17,7	27,4	7,1	0	77	1,3	5,8
15	20,0	27,1	9,9	0	80	3,4	6,6
16	21,8	28,1	14,3	0	87	3,4	5,3
17	24,4	30,1	19,5	0	91	1,3	4,6
18	24,6	33,5	17,3	7	89	1,6	5,7
19	24,2	29,2	20,6	7	94	3,1	4,8
20	24,2	29,5	21,6	1	96	1,2	2,9
21	23,7	28,1	20,9	0	92	2,3	4,9
22	23,5	28,5	19,8	0	92	3,4	4,4
23	25,0	30,5	20,6	0	90	3,1	6,1
24	26,8	33,8	19,7	43	84	1,2	5,6
25	-	30,6	-	10	97	1,0	5,1
26	22,9	30,5	15,0	0	83	1,2	6,4
27	22,6	28,4	16,9	0	87	2,2	5,9
28	22,0	27,7	14,4	0	85	1,9	6,4
29	22,9	27,6	18,2	0	89	3,0	6,4
30	22,6	27,5	16,3	0	89	3,6	5,4
31	23,5	27,9	19,7	0	89	4,1	5,8
MED/TOT	22,5	28,8	16,5	99	88	2,1	153

Temperatura do ar (°C): máxima, média e mínima; UR:umidade relativa do ar; ET_o: evapotranspiração diária.