

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**PERDAS DE NITROGÊNIO POR VOLATILIZAÇÃO DE AMÔNIA E
EFICIÊNCIA DA ADUBAÇÃO NITROGENADA NA CULTURA DO
ARROZ IRRIGADO**

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Francisco Mendoza Duarte

**Santa Maria, RS, Brasil
2006**

Mendoza Duarte, Francisco, 1975-

M539p

Perdas de nitrogênio por volatilização de amônia e eficiência da adubação nitrogenada na cultura do arroz irrigado / por Francisco Mendoza Duarte; orientador Leandro Souza da Silva. - Santa Maria, 2006.

85 f. : il.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, RS, 2006.

1. Ciência do solo 2. Arroz irrigado 3. Manejo do arroz 4. N-NH₃ 5. *Oryza sativa* I. Silva, Leandro Souza e, orient.. II. Título

CDU: 633.18.03

Ficha catalográfica elaborada por
Luiz Marchiotti Fernandes - CRB 10/1160
Biblioteca Setorial do Centro de Ciências Rurais/UFSM

**PERDAS DE NITROGÊNIO POR VOLATILIZAÇÃO DE AMÔNIA E
EFICIÊNCIA DA ADUBAÇÃO NITROGENADA NA CULTURA DO
ARROZ IRRIGADO**

por

Francisco Mendoza Duarte
Engenheiro Agrônomo

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em
Ciência do Solo, Área de Concentração Processos Químicos e Ciclagem de
Elementos, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito
parcial para obtenção do grau de
Mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Leandro Souza da Silva

Santa Maria, RS, Brasil
2006

Universidade Federal de Santa Maria
Centro de Ciências Rurais
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**PERDAS DE NITROGÊNIO POR VOLATILIZAÇÃO DE AMÔNIA E
EFICIÊNCIA DA ADUBAÇÃO NITROGENADA NA CULTURA DO
ARROZ IRRIGADO**

elaborada por

Francisco Mendoza Duarte

como requisito parcial para obtenção do grau de

Mestre em Ciência do Solo

COMISSÃO EXAMINADORA:

Leandro Souza da Silva, Dr.

(Presidente/Orientador)

Rogério Oliveira de Sousa, Dr. (DS/UFPel)

Sandro José Giacomini, Dr. (UFSM)

Santa Maria, 20 de Março de 2006.

"Há homens que lutam um dia e são bons.
Há outros que lutam um ano e são melhores.
Há os que lutam muitos anos e são muito bons.
Porém, há os que lutam toda a vida.
Esses são os imprescindíveis."

Bertolt Brecht.

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho a todas aquelas pessoas que eu amo.

Minha família e meus amigos.

São todos especiais, é parte de mim.

Peças fundamentais em minha vida,

me ajudam, me apóiam, dão carinho, são,
no verdadeiro sentido da palavra, **Amigos**.

Meu querido pai **Adriano Mendoza Toledo**.

Minha querida mãe **Petrona Duarte de Mendoza**.

Meus três irmãos **Roberto, Jorge e Oscar**.

Meus sobrinhos **Adriano, Edílson, Magali e Belén**.

São incríveis e inseparáveis amigos.

Um grande abraço! Vocês têm espaço reservado no meu coração... sempre!

AGRADECIMENTOS

Ao maior de todos os amigos. Ele que sempre esteve comigo, sempre me amou, até mesmo antes de eu nascer... **Jesus**.

A Virgem mãe de Caacupe, por iluminar e abençoar o meu caminho.

Ao Prof. Leandro Souza da Silva, pela amizade, compreensão e sugestões precisas para a elaboração deste trabalho.

A Universidade Federal de Santa Maria, ao Centro de Ciências Rurais e ao Programa de Pós-graduação em Ciência do Solo, pela possibilidade da realização do curso de mestrado.

A Universidade Nacional de Assunção, Faculdade de Ciências Agrárias, por conceder a possibilidade de realizar o curso.

A Coordenação de Aperfeiçoamento ao Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de estudos e a Fundação de Amparo a Pesquisa no Rio Grande do Sul (FAPERGS) pela concessão de bolsa de iniciação científica.

Ao Comitê de Orientação, Prof. Carlos Alberto Ceretta e Prof. Celso Aita, pelas orientações recebidas para a conclusão do trabalho.

Ao Prof. Enio Marchezan e sua equipe no Departamento de Fitotecnia pelo apoio na realização do experimento de campo.

Ao amigo compatriota e colega Ursino Federico Barreto Riquelme que conheci no momento que necessitava um apoio para a realização do mestrado.

A minha querida Lourdes Patrícia Elias da Costa, pela amizade, amor e compreensão.

Aos amigos e colegas, Darines Britzke, Fábio A. Graupe, Elisandra Pocojeski, e Eliziane Luiza Benedetti, pelo apoio humano para a condução dos experimentos e os trabalhos laboratoriais.

Meus compatriotas paraguaios: Martin Cubilla, Ramiro Samaniego, Atahualpa Ayala, Kátia Ayala, Gerardo Galeano pela amizade e por me fazer lembrar do meu país a cada momento compartilhado.

Aos colegas de moradia Rafael Pompilho da Silva, Edina Romano Fell, pelos momentos agradáveis e conveniência harmoniosa.

A família Bortoluzzi, por acolher-me e proporcionar-me um espaço em suas famílias.

Aos colegas do programa de pós-graduação, Alexandre Berwanger, Benjamin Dias Osório Filho, Rosane Martinazzo, André Pellegrini, Marcos Gabriel Peñalva e Robson Andreazza, pela amizade demonstrada durante todo momento.

No transcorrer do tempo deste curso, recebi muitas orientação e ajudas, mesmo aquelas consideradas pequenas, foram fundamentais para meu conhecimento profissional e para a conclusão do meu estudo, vão meus maiores agradecimentos por fazer possível meu desejo.

Por enquanto, todo meu sentimento de retribuição pode ser resumido a um sincero:

"Muito Obrigado!"... a todos!

RESUMO

Dissertação de Mestrado

Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo

Universidade Federal de Santa Maria

PERDAS DE NITROGÊNIO POR VOLATILIZAÇÃO DE AMÔNIA E EFICIÊNCIA DA ADUBAÇÃO NITROGENADA NA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO

AUTOR: FRANCISCO MENDOZA DUARTE

ORIENTADOR: PROF. LEANDRO SOUZA DA SILVA

Local e data da Defesa: Santa Maria, 20 de março de 2006.

O presente trabalho foi desenvolvido a partir de dois experimentos em casa-de-vegetação e dois a campo, conduzidos no ano agrícola 2004/2005, na Universidade Federal de Santa Maria (RS), com o objetivo de avaliar as perdas de N por volatilização de N-NH₃ em diferentes níveis de umidades do solo e a eficiência da adubação nitrogenada com uréia aplicada em diferentes épocas em relação a entrada de água na lavoura. O primeiro experimento na casa-de-vegetação foi instalado com a aplicação de N-uréia em solo com quatro níveis de umidades do solo (seco, úmido, saturado e saturado com lâmina de água) mais testemunha sem N, em delineamento completamente casualizado com quatro repetições. Os tratamentos foram aplicados em vasos com 5 kg de solo e a volatilização de amônia foi avaliada com o uso de coletores de N-NH₃ de tipo semi-aberto estático. O segundo experimento na casa-de-vegetação foi instalado com cinco épocas de aplicação de N-uréia em relação ao início do alagamento (15, 10, 5 e 1 dia antes do alagamento e 1 dia após o alagamento) mais testemunha sem N, em delineamento completamente casualizado com quatro repetições. A campo foram instalados dois experimentos com cinco épocas de aplicação de N (um com uréia aplicada aos 7, 4 e 1 dia antes do alagamento e 1 e 3 dias após o alagamento e outro com uréia aplicada aos 10, 6 e 3 dias antes do alagamento, no dia do alagamento e 2 dias após o alagamento) mais a testemunha sem aplicação de N, utilizando delineamento em blocos ao acaso com quatro repetições. No segundo experimento de casa-de-

vegetação e nos dois experimentos a campo foram realizadas avaliações de matéria verde e seca e nitrogênio acumulado, sendo que para os experimentos a campo também foi avaliada a produtividade de grãos. A partir dos resultados pode-se concluir que a aplicação de N sobre a lâmina de água não evitou as perdas de N por volatilização e a primeira adubação nitrogenada de cobertura teve maior eficiência quando realizada antes da entrada da água na lavoura, embora a produtividade de grãos não fosse afetada pelas épocas de aplicação de uréia.

Palavras chave: Manejo do arroz, N-NH₃, *Oryza sativa*.

ABSTRACT

Master Dissertation in Soil Science
Graduate Program in Soil Science
Federal University of Santa Maria, RS, Brazil

NITROGEN LOSS BY AMMONIA VOLATILIZATION AND NITROGEN FERTILIZATION EFFICIENCY IN FLOODED RICE

AUTHOR: FRANCISCO MENDOZA DUARTE

ADVISER: PROF. LEANDRO SOUZA DA SILVA

Santa Maria, March, 20 of 2006

This work was developed using two greenhouse and two field experiments, during 2004/2005 agricultural season at the Federal University of Santa Maria, Rio Grande do Sul state. The objective was to evaluate nitrogen loss by ammonia volatilization at different soil water content and to evaluate nitrogen fertilization efficiency with different urea application based on flooding time. The first greenhouse experiment was developed with N-urea application at different soil water status (dry, humid, saturated, and ponding water) and a treatment without nitrogen application, in a completely randomized experimental design with four replications. The treatments were applied on 5 kg soil pots with ammonia collectors to quantify nitrogen volatilized. The second greenhouse experiment was developed with N-urea application based on flooding times (15, 10, 5, and 1 day before flooding and 1 day after flooding) and a treatment without nitrogen application, in a completely randomized experimental design with four replications. The two field experiments were developed with five different times of urea application based on flooding times (one with 7, 4, and 1 day before flooding and 1 and 3 days after flooding and another with 10, 6, and 3 days before flooding, at flooding, and 2 days after flooding) and a treatment without nitrogen application, in a randomized block design with four replications. In the second greenhouse experiment and two field experiments, green and dry matter production and nitrogen uptake were evaluated, while grain

production was also evaluated in the two field experiments. The urea application on ponding water did not prevent nitrogen loss by ammonia volatilization and the first nitrogen application had higher efficiency when applied before flooding, even though the grain production was not affected by urea application time.

Key-words: rice management, N-NH₃, and *Oryza sativa*.

LISTA DE TABELAS

	Página
TABELA 1. Características físicas e químicas do solo utilizados nos experimentos de casa-de-vegetação. Santa Maria, RS, 2005.....	33
TABELA 2. Umidade gravimétrica do solo na camada 0 - 10 cm determinada imediatamente após a última avaliação da volatilização de amônia no experimento de casa-de-vegetação.....	35
TABELA 3. Características físicas e químicas do solo da camada de 0 - 10 cm antes da instalação do experimento. Santa Maria, RS, 2005.....	37
TABELA 4. Características físicas e químicas do solo da camada de 0 - 10 cm antes da instalação do experimento. Santa Maria, RS, 2005.....	39
TABELA 5. Perdas acumuladas de N-NH ₃ com aplicação de uréia em diferentes níveis de umidades do solo.....	45
TABELA 6. Quantidades de N-NH ₃ volatilizado proveniente da aplicação da uréia (NVPU) aplicado em diferente estado de umidade em relação ao tratamento sem uréia.....	47
TABELA 7. Teor e quantidade acumulada de nitrogênio na parte área do arroz irrigado, em função de diferentes épocas de aplicação de nitrogênio em relação ao início do alagamento do solo, aos 20 dias após o início do alagamento do solo.....	50
TABELA 8. Efeito das épocas de aplicação de nitrogênio em relação ao início do alagamento sobre a eficiência agronômica e a recuperação aparente do N pela cultura de arroz irrigado.....	51

TABELA 9. Teor e quantidades acumulada de nitrogênio na parte área do arroz irrigado, em função de diferentes épocas de aplicação de nitrogênio em relação ao início do alagamento do solo, aos 20 dias após o início do alagamento do solo.....	53
TABELA 10. Efeito da época de aplicação de nitrogênio em relação ao início do alagamento sobre a eficiência agronômica e a recuperação aparente do N pela cultura de arroz irrigado.....	55
Tabela 11. Teores e quantidades acumulada de nitrogênio na parte área do arroz irrigado, em função de diferentes épocas de aplicação de nitrogênio em relação ao início do alagamento do solo.....	59
Tabela 12. Efeito das épocas de aplicação de nitrogênio em relação ao início do alagamento sobre a eficiência agronômica e a recuperação aparente do N na cultura de arroz irrigado.....	61
Tabela 13. Valores mensais médios de temperatura e precipitação pluvial durante o desenvolvimento do experimento a campo e em casa-de-vegetação.....	77
Tabela 14 Análise da variância para N acumulados na parte área do arroz irrigado em função de diferentes épocas de aplicação de nitrogênio em relação ao início do alagamento do solo.....	83
Tabela 15 Análise da variância para a eficiência de recuperação de N pela cultura de arroz irrigado em função de diferentes épocas de aplicação de nitrogênio em relação ao início do alagamento do solo.....	83
TABELA 16. Análise da variância para N acumulado na parte área do arroz irrigado em função de diferentes épocas de aplicação de nitrogênio em relação ao início do alagamento do solo.....	84
TABELA 17. Análise da variância para a eficiência de recuperação de N pela cultura do arroz irrigado em função de diferentes épocas de aplicação de nitrogênio em relação ao início do alagamento do solo.....	84
TABELA 18. Análise da variância para produtividade de grãos do arroz irrigado em função de diferentes épocas de aplicação de nitrogênio em relação ao início do alagamento do solo.....	84

TABELA 19. Análise da variância para N acumulado na parte área do arroz irrigado em função de diferentes épocas de aplicação de nitrogênio em relação ao início do alagamento do solo.....	85
TABELA 20. Análise da variância para a eficiência de recuperação de N pela cultura de arroz irrigado em função de diferentes épocas de aplicação de nitrogênio em relação ao início do alagamento do solo.....	85
TABELA 21. Análise da variância para produtividade de grãos do arroz irrigado em função de diferentes épocas de aplicação de nitrogênio em relação ao início do alagamento do solo.....	85

LISTA DE FIGURAS

	Página
FIGURA 1. Esquema e foto do coletor semi-aberto utilizado para determinar das perdas de nitrogênio por volatilização de amônia.....	34
FIGURA 2. Fluxo da emissão de N-NH ₃ do solo para a atmosfera com aplicação de uréia em diferentes níveis de umidade do solo.....	43
FIGURA 3. Produção relativa de matéria verde e seca da parte aérea do arroz irrigado, com a adubação nitrogenada de cobertura aplicada em diferentes épocas em relação ao alagamento do solo.....	49
FIGURA 4. Produção relativa de matéria verde e seca da parte aérea do arroz irrigado, com a adubação nitrogenada de cobertura aplicada em diferentes épocas em relação ao alagamento do solo.....	54
FIGURA 5. Produtividade de grãos de arroz irrigado com a aplicação da adubação nitrogenada de cobertura em diferentes épocas em relação ao alagamento do solo.....	57
FIGURA 6. Produção relativa de matéria verde e seca da parte aérea do arroz irrigado, com a adubação nitrogenada de cobertura aplicada em diferentes épocas em relação ao alagamento do solo.....	60
FIGURA 7. Produtividade de grãos de arroz irrigado com a aplicação da adubação nitrogenada de cobertura em diferentes épocas em relação ao alagamento do solo.....	62

LISTA DE ANEXOS

	Página
ANEXO 1. Valores mensais médios de temperatura e precipitação pluvial.....	77
ANEXO 2. Fotos dos vasos com coletores de amônia em casa-de-vegetação..	78
ANEXO 3. Fotos dos vasos com os tratamentos (USSE) e (USUM).....	79
ANEXO 4. Fotos dos vasos com os tratamentos (USSA) e (USLE).....	80
ANEXO 5. Fotos dos vasos após o transplante das plântulas em casa-de-vegetação para avaliação do N acumulado.....	81
ANEXO 6. Fotos dos experimentos de campo 1 e 2.....	82
ANEXO 7. Análise de variâncias para os parâmetros estudados no experimento em casa-de-vegetação.....	83
ANEXO 8. Análises de variâncias para os parâmetros estudados no experimento 1.....	84
ANEXO 9. Análises de variâncias para os parâmetros estudados no experimento 2.....	85

SUMÁRIO

Página

RESUMO	
ABSTRACTS	
LISTA DE TABELAS	
LISTA DE FIGURAS	
LISTA DE ANEXOS	
SUMÁRIO	
1. INTRODUÇÃO	18
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	20
2.1 Arroz irrigado por inundação e a adubação nitrogenada.....	20
2.2 Alterações provocadas pelo alagamento do solo e a dinâmica do nitrogênio.....	23
2.2.1 Transformações do N em condições aeróbicas e anaeróbicas.....	24
2.3 Disponibilidade de N no solo alagado.....	25
2.3.1 Perdas de N por volatilização de amônia.....	26
2.3.2 Perdas de N por denitrificação.....	27
2.3.3 Perdas de N por lixiviação.....	29
2.4 Manejo da adubação nitrogenada para o arroz irrigado e a eficiência do N aplicado.....	29
2.5 Hipóteses.....	31
2.6 Objetivos.....	31
3. MATERIAL E MÉTODOS	32
3.1 Experimentos em casa-de-vegetação.....	32
3.1.1 Avaliação de perdas de N por volatilização de NH ₃	32

3.1.1.1 Solo e tratamentos.....	32
3.1.1.2 Determinação de N volatilizado através do coletor semi-aberto.....	33
3.1.2 Determinação do N absorvido em função da época de aplicação de uréia em relação ao início do alagamento.....	35
3.1.2.1 Solo e tratamentos.....	35
3.1.2.2 Cultivo do arroz irrigado.....	36
3.1.3 Análise estatística.....	36
3.2 Experimentos a campo.....	36
3.2.1 Experimento 1 – Épocas de aplicação de N.....	37
3.2.1.1 Solo e tratamentos.....	37
3.2.1.2 Cultivo do arroz irrigado.....	37
3.2.1.3 Avaliações realizadas.....	38
3.2.2 Experimento 2 – Épocas de aplicação de N.....	38
3.2.2.1 Solo e tratamentos.....	38
3.2.2.2 Cultivo do arroz irrigado.....	39
3.2.2.3 Avaliações realizadas.....	40
3.2.3 Eficiência agrônômica e de recuperação do N aplicado.....	40
3.2.4 Análise estatística.....	41
4. RESULTADOS E DISSCUSÃO.....	42
4.1. Perdas de nitrogênio por volatilização de amônia em diferentes níveis de umidades do solo.....	42
4.2. Época de aplicação de nitrogênio em função da época de início do alagamento da lavoura de arroz irrigado– experimento em casa-de-vegetação.....	48
4.3. Época de aplicação de nitrogênio em função da época de início do alagamento – experimentos a campo.....	52
4.3.1 Experimento 1.....	52
4.3.2 Experimento 2.....	58
5. CONCLUSÃO.....	63
6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	64
7. ANEXOS.....	76

1. INTRODUÇÃO

O arroz é um alimento consumido mundialmente, sendo componente básico na alimentação da maioria dos povos. Constitui uns dos alimentos tradicionais da dieta da população brasileira, sendo uma das principais fontes de energia alimentar. Dentre as culturas anuais no Brasil, o arroz ocupa posição de destaque tanto sob o ponto de vista econômico como social. É cultivado em cerca de três milhões de hectares com uma produção ao redor de 10 milhões de toneladas. O Estado do Rio Grande do Sul é responsável por cerca da metade da produção nacional de arroz, no qual predomina o sistema de cultivo irrigado por alagamento em áreas de várzea, o que assegura produtividades relativamente altas e estáveis (Azambuja et al., 2004).

Dentre os fatores que afetam a produtividade da cultura, o manejo da adubação e da irrigação desempenham papel fundamental na disponibilidade de nutrientes às plantas, tendo em vista que a dinâmica dos elementos no solo é bastante diferenciada e variável em condições aeróbias e anaeróbias. Um dos elementos mais influenciados pelas condições ambientais e de manejo na produção de arroz irrigado é o nitrogênio (N), o qual possui uma dinâmica extremamente complexa devido à diversidade das formas químicas, reações e processos aos quais está envolvido. Essa dinâmica reflete diretamente sobre a eficiência do N aplicado via fertilizantes minerais. A eficiência deste N oriundo de fertilizantes minerais é bastante variável; entretanto, raramente excede 50% da quantidade aplicada (Fillery et al., 1984), o que reforça a necessidade de entendimento dos fatores e processos que determinam tal eficiência.

No sistema tradicional de condução da lavoura de arroz irrigado no Rio Grande do Sul, há duas etapas bem diferenciadas quanto ao regime hídrico do solo (aeróbio e anaeróbio), as quais afetam a disponibilidade de N às plantas. Já quanto a adubação nitrogenada, o N normalmente é aplicado em cobertura em duas épocas: uma no perfilhamento e outra na iniciação do primórdio floral. Com isto, a primeira adubação nitrogenada de cobertura é feita no solo em condições aeróbicas ou anaeróbicas, dependendo do início da irrigação, enquanto a segunda é feita quase sempre em condições anaeróbicas. Nestas condições diferenciadas, a uréia, que é a fonte de N mais utilizada no arroz irrigado, apresenta diferentes intensidades de perdas de N.

A nova recomendação de adubação nitrogenada para o arroz irrigado para o sistema de semeadura em solo seco (CQFS-NRS/SBCS, 2004, SOSBAI, 2005) prevê que a aplicação de fertilizante nitrogenado (uréia) no início do perfilhamento, preferencialmente, seja feita antecedendo a entrada de água na lavoura, de forma que a água de irrigação proceda à sua incorporação ao solo, minimizando as perdas de N por volatilização de amônia. Entretanto, para evitar que o N da uréia possa ser transformado em nitrato durante as condições anaeróbicas e posteriormente seja desnitrificado em condições de anaeróbicas, condiciona-se como intervalo entre a aplicação do N e a entrada de água o tempo máximo de três dias. Esse intervalo de tempo considerado adequado nem sempre pode ser obtido em função dos diferentes fatores de operacionalidade que cada lavoura condiciona. Além disto, a dinâmica do N também depende de outros fatores, especialmente relacionado às condições climáticas. Esses fatores atuando conjuntamente podem representar diferentes possibilidades de perda de N, que podem se refletir na eficiência do fertilizante aplicado e, conseqüentemente, na produtividade da cultura.

A eficiência da aplicação de N em solo seco com posterior alagamento do solo ainda é pouco conhecida nas regiões produtoras do Rio Grande do Sul. Dessa forma, é necessária uma avaliação mais aprofundada dos processos de perda e aproveitamento do N pela cultura de arroz em função do tempo em que a uréia fica depositada em superfície antes da irrigação.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O arroz (*Oryza sativa* L.) é um dos cereais de maior importância social e econômica para o mundo, servindo de alimento para dois terços da população do planeta, fornecendo aproximadamente 20% da energia e 15% da proteína per capita necessárias ao homem. A Ásia ocupa a primeira posição mundial em consumo e produção mundiais enquanto a América do Sul fica em segunda posição na produção e terceira posição em consumo.

O Brasil é o nono produtor em nível mundial e o maior na América Latina, responsável por 88% da produção do Mercosul. Essa produção é originária, principalmente, das lavouras irrigadas por alagamento em áreas de várzeas do Sul do País, onde o Estado do Rio Grande do Sul é responsável por aproximadamente metade da produção total e representa mais de dois terços do arroz irrigado colhido. (Azambuja et al., 2004). Embora a produtividade média obtida no Estado do Rio Grande do Sul esteja entre as mais altas do Brasil, ainda está muito aquém daquelas obtidas em áreas experimentais e mesmo em lavouras mais tecnificadas. Essas diferenças podem ser atribuídas, além de fatores como solo e clima, as práticas de manejo da lavoura onde se destacam o manejo da semeadura, da irrigação, do controle de plantas daninhas, pragas e doenças e da fertilidade do solo.

2.1 Arroz irrigado por alagamento e a adubação nitrogenada

Dentre o manejo da fertilidade, um dos elementos mais influenciados nos sistemas de produção de arroz irrigado é o nitrogênio (N), o qual possui uma dinâmica extremamente complexa devido à diversidade das formas químicas, reações e processos aos quais está envolvido, refletindo diretamente sobre a eficiência do aproveitamento pela cultura do nutriente oriundo de fertilizantes (Fillery et al., 1984). De acordo com (Raij, 1991), o N é o nutriente mineral exigido em maior quantidade pelas culturas e, normalmente, proporciona maior resposta em produtividade; porém, a complexidade dos fatores que afetam o seu aproveitamento pelas plantas faz com que o mesmo seja objeto de um grande número de estudos, a maioria realizados com o objeto de avaliar seu comportamento no solo e a sua relação com a eficiência da adubação.

A resposta do arroz irrigado à adubação nitrogenada depende da interação de vários fatores, quais sejam os principais: suprimento de nitrogênio e de outros nutrientes pelo solo; tipo de planta; época e densidade de semeadura; controle de plantas daninhas; estado fitossanitário; seqüência de culturas; fonte de N; dose e época de aplicação do fertilizante nitrogenado; e condições climáticas, particularmente temperatura e radiação solar.

No sistema solo-planta-atmosfera, a quantidade mais significativa do N se encontra na atmosfera em forma combinada de N_2 (Melgar et al., 1999). O processo de transferência do nitrogênio atmosférico para o solo se dá por: (1) descargas elétricas na atmosfera quando o nitrogênio elementar é reduzido a óxidos, passando de N_2 para N_2O , NO, NO_2 e NO_3^- ; (2) fixação biológica do nitrogênio por bactérias asimbióticas de vida livre ou em associações simbióticas com leguminosas; e (3) fixação industrial do N onde, através do processo de síntese de amônia (NH_3) e ácido nítrico (HNO_3) são produzidos os vários tipos de fertilizantes nitrogenados.

No solo, o N está presente em formas orgânicas (ao redor de 98% do total) fazendo parte dos restos culturais e da matéria orgânica, e em formas minerais, especialmente como NO_3^- (nitrato) e NH_4^+ (amônio) na solução do solo e adsorvido aos colóides, e em formas gasosas combinadas, tais como NH_3 , N_2O e NO. Da quantidade total de N presente no solo, apenas cerca de 2% encontra-se disponível às plantas. Em solo não fertilizado, o N disponível do solo é praticamente todo proveniente da mineralização do N orgânico presente na matéria orgânica, a qual é realizada por microorganismos que transformam o N orgânico nas formas amoniacal (NH_4^+) e nítrica (NO_3^-), que são as duas formas minerais passíveis de serem absorvidas pelas plantas. Considera-se, como uma estimativa média, que são liberados, anualmente, cerca de 20 a 30 kg ha⁻¹ de N para cada ponto percentual de matéria orgânica contida no solo (Stevenson, 1986).

Diante disso, uma avaliação simplista do grau de disponibilidade de N no solo é baseada na análise do teor de matéria orgânica, através da determinação da concentração de carbono orgânico do solo. Com o objetivo de estabelecer a relação entre o teor de matéria orgânica do solo e a resposta do arroz à adubação nitrogenada, Machado (1993) comenta que foram realizados vários experimentos nos principais solos arroseiros do Rio Grande do Sul (relação entre o rendimento observado na ausência de adubo nitrogenado e o rendimento máximo com adição de adubo correlacionado com o respectivo teor de matéria orgânica do solo). Não

houve bom ajustamento na relação das variáveis estudadas, do que se deduz que essa metodologia não deve ser utilizada como critério único de avaliação da disponibilidade de N e indicativo da necessidade da adubação nitrogenada para o arroz irrigado nas condições de cultivo do Rio Grande do Sul. Mesmo quando se selecionaram os solos com teores entre 1% e 2,5% de matéria orgânica, o ajustamento foi melhor, mais ainda com alta variabilidade. Resultados parecidos foram relatados por Kussow et al. (1976), ao avaliarem dados de vários experimentos com arroz de sequeiro realizados no Estado de Goiás.

Com base nos resultados experimentais, pode-se deduzir que a resposta do arroz ao N está mais relacionada aos fatores climáticos (temperatura e radiação solar) e ao tipo de plantas (tradicional, americano e moderno) do que ao teor de matéria orgânica do solo. Em anos de radiação solar e temperatura mais elevadas, favoráveis ao rendimento de grãos, as respostas ao N são melhores, para qualquer tipo de planta, conforme constataram vários autores (Vahl 1979; Machado 1985; Bacha et al., 1991; Lopes et al., 1995c.; Lopes et al., 1997; Machado et al., 1997b; Machado et al., 1999a). Os efeitos desses fatores sobre a produtividade de grãos e a resposta ao N são mais acentuadas nos estádios de reprodução e de maturidade (Steinmetz & Motta 1974; Gomes et al. 1979), mas também são importantes na fase vegetativa (Machado & Dias, 1985). Steinmetz & Motta (1974) e Gomes et al. (1979) observaram que, nos anos em que radiação solar é alta, no período compreendido entre 15 dias após o florescimento da cultura, devem ser esperado rendimentos elevados em resposta à aplicação de N; quando a radiação solar diminui naquele período, os rendimentos e as respostas da cultura à adubação nitrogenada tendem a decrescer.

Quanto à resposta ao N, as cultivares de arroz usadas na lavoura riograndense são classificadas em três tipos: tradicional, intermediário (americana) e moderno. Segundo resultados de diversos autores e citados por Vahl (1979); (Machado & Dias, 1985); Machado (1987); Lopes (1993a); Lopes et al. (1995a) e Lopes et al. (1999b) os níveis ótimos de N variam de acordo com o tipo (porte) de plantas e com ano de cultivo, sendo maiores nos anos em que os requerimentos foram mais elevados e nas culturas de porte médio e moderno. Em síntese, com base em uma revisão global dos resultados da maioria dos experimentos realizados com N no Rio Grande do Sul nas décadas de 70 e 80, e tendo em vista o retorno econômico decorrente da sua aplicação, verifica-se que raramente as cultivares

tradicionais respondem a mais de 30 kg de N ha⁻¹, as americanas a mais de 40 kg de N ha⁻¹ e as modernas a mais do que 60 kg de N ha⁻¹. Atualmente, praticamente toda a produção de arroz é realizada com cultivares do tipo moderno, cujo potencial de resposta à adubação nitrogenada é maior. Além disso, a melhoria de vários aspectos de manejo da cultura tem proporcionado respostas à aplicação de mais de 100 kg de N ha⁻¹ tanto em condições de experimentos como de lavouras.

2.2 Alterações provocadas pelo alagamento do solo e a dinâmica do nitrogênio

O nitrogênio é um nutriente que apresenta peculiaridades que dificultam o seu manejo, originadas das múltiplas e complexas reações bioquímicas que influenciam a sua dinâmica, disponibilidade e eficiência no aproveitamento pelas plantas. Alguns conceitos fundamentais sobre as transformações no solo e a relação com a matéria orgânica devem ser conhecidos para o entendimento e implementação de um manejo adequado em função dos diferentes sistemas de produção agrícola.

No sistema convencional de semeadura, o ciclo da cultura do arroz irrigado ocorre em duas condições em relação a umidade do solo. Uma em solo não saturado que perdura até aproximadamente 20-25 dias após a emergência (início da irrigação) e outra onde a planta desenvolve-se em condições de solo alagado, onde é mantido uma lâmina de água sobre a sua superfície. No primeiro momento o solo permanece em condições aeróbicas, entretanto estas condições mudam com o alagamento alterando o seu equilíbrio natural, desencadeando uma série de transformações nas características físicas, químicas, biológicas e eletroquímicas desse meio e, eventualmente, atinge um novo estado de equilíbrio com características distintas do solo antes do alagamento.

Quando o solo é alagado, praticamente todos os seus poros são ocupados pela água. Os níveis de oxigênio diminuem rapidamente nas 6 a 8 horas seguintes, sendo expulso pela água e consumidos pelos microorganismos. Uma vez estabelecido o alagamento, o oxigênio se difunde a uma taxa muito lenta dentro da água. Como consequência de uma maior necessidade de oxigênio pelo solo e da lenta difusão de oxigênio criam-se duas zonas: uma oxidada, correspondente à água de alagamento e uma fina camada de solo de poucos milímetros a centímetros de espessura e outra reduzida sem oxigênio (Mikkelsen, 1987).

Os microorganismos em solos alagados são constituídos de tipo aeróbios na zona oxidada, que crescem somente na presença de oxigênio molecular (aeróbios obrigatórios), e de tipo anaeróbios na zona reduzida (Patrick, 1982). Os tipos aeróbicos obtêm energia a partir da oxidação da matéria orgânica e utilizam o oxigênio como receptor final de elétrons a cadeia respiratória reduzido à água. Quando ocorre o alagamento do solo, existem microorganismos anaeróbios obrigatórios, os quais não crescem na presença de oxigênio molecular livre, e anaeróbios facultativos (Sousa et al., 2004). Este grupo de microorganismos anaeróbios facultativos obtêm elétrons e esqueletos de carbono a partir da oxidação da matéria orgânica e utilizam como receptor final da cadeia de elétrons compostos oxidados do solo, tais como o nitrato, óxido de manganês, óxidos de ferro, sulfatos entre outros, que são reduzidos a nitrogênio molecular livre, óxidos mangânicos, óxidos ferrosos e H_2S , respectivamente (Bartlett & James, 1993). Já os microorganismos anaeróbios obrigatórios utilizam como receptor final da cadeia de elétrons compostos orgânicos, caracterizando o processo de fermentação, o qual transforma compostos orgânicos complexos em compostos mais simples, tais como ácidos orgânicos e mercaptanos, sendo responsável pela produção de metano e gás sulfídrico (Sousa et al., 2004). Nestas condições, a decomposição da matéria orgânica é lenta, provocando seu acúmulo no solo.

2.2.1 Transformações do N em condições aeróbicas e anaeróbicas

A conversão de N atmosférico para formas combinadas ocorre através da fixação biológica de N_2 . Por sua vez, as formas orgânicas são convertidas em NH_4^+ e em NO_3^- pelo processo denominado mineralização. A conversão para NH_4^+ é denominada amonificação; a oxidação deste composto para NO_3^- é designado por nitrificação. A utilização de NH_4^+ e de NO_3^- pelas plantas e por microorganismos do solo constitui de assimilação e imobilização, respectivamente. O N combinado é novamente devolvido à atmosfera como óxido nitroso (N_2O) e N_2 molecular através da denitrificação biológica, completando, assim, a dinâmica de N na natureza (Stevenson, 1986; Barber, 1984).

A exclusão do oxigênio do sistema solo origina o processo biológico de oxidação-redução, que altera a disponibilidade do N. Como resultados do alagamento do solo há uma acumulação de N na forma amoniacal (NH_4^+),

instabilidade do nitrogênio como nitrato (N-NO₃⁻) e menores necessidades de N para a decomposição da matéria orgânica (Patrick et al, 1985). O acúmulo de N amoniacal é resultado da decomposição da matéria orgânica do solo para a solução (Moraes & Freire, 1974). Em estudo conduzido por Moraes et al. (1975), a concentração de N-NH₄⁺ foi alta ao início do alagamento diminuindo durante as duas semanas seguintes e incrementando posteriormente. De acordo com os autores, a diminuição foi devida à oxidação de NH₄⁺ a NO₃⁻ sendo este perdido em forma gasosa enquanto que o aumento posterior foi devida à decomposição da matéria orgânica e ao deslocamento de NH₄⁺ do complexo de troca pelos íons Fe⁺² e Mn⁺².

A quantidade de N amoniacal que é a fonte de N mais importante para as plantas de arroz após o alagamento, depende do resultado líquido do balanço entre os processos microbianos de mineralização e de imobilização do N. Segundo a Mengel et al. (1986), o N amoniacal pode existir sob três frações: amônio na solução do solo, nos sítios de troca (complexo de esfera-externa) e não trocável (complexo de esfera-interna). Os dois primeiros são facilmente disponíveis para as plantas enquanto que as informações referentes à disponibilidade do amônio não trocável são conflitantes. Keerthisinghe et al. (1984) verificaram que o amônio não trocável contribui para o N absorvido pelas plantas e que pode ser uma fração importante em alguns solos das Filipinas.

Em relação ao nitrato em solos alagados, a quantidade de N presente nesta forma é muito baixa ($\leq 3 \text{ mg kg}^{-1}$ solo), sendo insignificante como nutriente (Patrick et al., 1985), pois a maior quantidade do mesmo pode ser perdida rapidamente com o alagamento da área, diminuindo sua concentração a zero nas três semanas seguintes ao alagamento do solo (Moraes et al., 1975). Apesar da maior disponibilidade de amônio no solo alagado, a planta de arroz pode utilizar tanto o nitrato como o amônio como fonte de N. Tem-se comprovado que as enzimas responsáveis pela assimilação do nitrato estão presentes na planta de arroz (Barlaan et al., 1998) e que o nitrato pode ser consumido em aplicações feitas até o alongamento de entrenós (Wilson et al., 1994).

2.3 Disponibilidade de N no solo alagado

Ganhos de N no solo alagado ocorrem através da fixação de N₂ molecular pelos microorganismos livres (*Azotobacter*, *Clostridium*) e simbióticos (*Rhizobium*),

pelo retorno de nitrato (NO_3^-) na água da chuva ou irrigação e pela adição através da adubação. As perdas são devidas principalmente à volatilização de amônia, denitrificação, lixiviação, escoamento superficial e pela remoção das culturas (De Datta, 1981).

Nem sempre o N presente no solo será totalmente absorvido pelas plantas. Parte poderá ser imobilizada por microorganismos (Byrnes, 2000). A imobilização por microorganismos, a fixação de amônio no complexo de troca e o balanço entre ganhos e perdas pelos diferentes mecanismo citados resultam em uma diminuição ou aumento da disponibilidade de N no sistema água-solo-planta.

2.3.1 Perdas de N por volatilização de amônia

O processo de perda por volatilização de amônia consiste na passagem da amônia presente no solo à atmosfera (Diest, 1988), conforme a seguinte relação: $\text{NH}_4^+ + \text{OH}^-$ (aquoso) \rightarrow $\text{H}_2\text{O} + \text{NH}_3$ (gás).

O NH_3 perdido por volatilização será proveniente da mineralização da matéria orgânica ou do fertilizante aplicado, sendo esse o fenômeno mais intenso mediante aumento no pH do solo (Melo, 1978). A volatilização de amônia é um processo rápido que ocorre na semana seguinte da aplicação de N (Diest, 1988). A uréia aplicada é rapidamente hidrolisada em dois ou três dias (Byrnes, 2000). Assim, quando a uréia é aplicada ao solo, o processo de perda N- NH_3 por volatilização envolve inicialmente a hidrólise por meio da urease, que é uma enzima extracelular produzida por bactérias, actinomicetos e fungos do solo ou, ainda, originada de restos vegetais. Em função das características da urease, fatores que influenciam a atividades do microorganismo também influenciam a hidrólise da uréia, promovendo grandes variações na taxa de hidrólise para diferentes solos (Reynold & Wolf, 1987). Como resultado da hidrólise, tem-se a formação de carbonato de amônio que não é estável e que se desdobra em NH_3 , CO_2 e água (Volk, 1959). Parte do NH_3 formado reage com íons H^+ da solução do solo e com íons H^+ dissociáveis do complexo coloidal, resultando no cátion NH_4^+ .

Segundo (Volk, 1959), a hidrólise da uréia ocorre em solos com vários teores de umidade; porém, quando mais rápida a hidrólise, maior o potencial de perda de NH_3 . A adição de água tem influencia direta sobre a hidrólise, promovendo aumento da difusão da uréia e, conseqüentemente, maior contato com a urease no solo

(Savant et al, 1987). Outro fator a ser considerado é o pH do solo. Devido a neutralização da acidez pelo carbonato há elevação do pH, que pode atingir valores acima de sete na região próxima aos grânulos do fertilizante aplicado (Rodriguez & Kiehl, 1992) favorecendo a formação de amônia. Portanto, todos aqueles fatores que tem influência sobre o pH do sistema solo-água vão influenciar a taxa de perdas. Deste modo, valores elevados de pH conduzem à maior volatilização de N-NH₃ da uréia aplicada em superfície (Freney et al., 1985; Hargrove, 1988; Byrnes, 2000), a qual pode representar entre 50 a 80% do total de nitrogênio aplicado (Volk, 1959), dependendo das condições climáticas e de solo.

Outros fatores também afetam sobremaneira a volatilização de N-NH₃ como a temperatura, a umidade, as trocas gasosas, a taxa de evaporação de água, o conteúdo de água no solo, o pH, o poder tampão, a capacidade de troca catiônica, a classe textural e a atividade da urease (Freney et al., 1985; Hargrove, 1988; Byrnes, 2000). Outros autores ainda consideram também a concentração de N amoniacal na água de alagamento, o pH da água, a velocidade do vento, a quantidades de N aplicado, o momento vegetativo da plantas quando da aplicação e o método da aplicação de N (Mikkelsen et al., 1978; Vlek & Stumpe, 1978; Vlek & Craswell, 1981; Mikkelsen, 1987 e Jayaweera & Mikkelsen, 1991).

De acordo com Mikkelsen (1987), existe na literatura uma grande variabilidade na magnitude de perda de N por volatilização de amônia, ligada a sistemas imperfeitos de medida e a um complexo intervalo de práticas culturais, manejo da água, variáveis de solo e a atmosfera, que fazem as quantidades perdidas sejam muito específicas do local onde foi feita a avaliação. Na Ásia, onde se realizou a maioria das avaliações de perdas, o solo onde é semeado o arroz encontra-se com umidade próxima a saturação ou saturados a distintas profundidades (De Datta, 1995). Isto predispõe as maiores perdas por volatilização de amônia (Bouwmeester et al., 1985; Reynolds & Wolf, 1987; Burch & Fox, 1989) em relação a outros sistemas de cultivos em solo bem drenado.

2.3.2 Perdas de N por denitrificação

A nitrificação na camada de solo oxidada e a denitrificação na camada reduzida são processos que muitos autores denominam de seqüência nitrificação-denitrificação devido a proximidade das camadas em que ocorrem. A nitrificação é

um processo aeróbico que gera os íons nitrato utilizados no processo de denitrificação. Dessa forma, quando o oxigênio é excluído, a nitrificação é interrompida e, portanto, caso o nitrato presente seja utilizado e não haja mais entrada de nitrato por outras formas, não há subsequente evolução de N_2 e/ou N_2O . O caminho seqüencial e os produtos do processo de denitrificação é o seguinte (Aulakh et al., 1992): NO_3 (nitrato) \rightarrow NO_2 (nitrito) \rightarrow NO (óxido nítrico) \rightarrow N_2O (óxido nitroso) \rightarrow N_2 . O substrato da nitrificação, que antecede a denitrificação, é o fornecido pela amonificação e pela aplicação de adubos nitrogenados (uréia e sulfato de amônio).

Conforme abordado anteriormente, em solos alagados existem duas camadas distintas: uma camada superficial oxidada de pouca espessura e uma camada reduzida ou anaeróbica. A espessura da camada de oxigênio depende da taxa de movimento do oxigênio através da camada de água e solo e da taxa de consumo deste oxigênio pelos micrororganismos (Reddy et al., 1976). O fornecimento de oxigênio ao solo alagado é realizado por dois caminhos: 1) transporte de oxigênio através da água e consumo na interface solo-água e 2) transporte de oxigênio através da parte aérea da planta até a rizosfera (Mikkelsen, 1987). Assim, a nitrificação é um processo que no solo alagado pode ocorrer na água de alagamento, na camada superficial do solo oxidada (Liwang et al., 1999) e também na rizosfera, sendo este o local de maior nitrificação-denitrificação (Arth et al., 1998). A presença de algas fotossintetizantes na água de alagamento é outra fonte de oxigênio para o solo inundado podendo afetar a nitrificação (Katyal et al., 1988). A bainha da planta de arroz é outro sitio importante para que ocorra a nitrificação e denitrificação subsequente (Adhya et al., 1996).

A difusão de NH_4^+ da camada anaeróbica até a camada aeróbica também pode ser um importante mecanismo de perda de N nos solos alagados. O $N-NH_4^+$ difunde para a superfície do solo onde é nitrificado e o $N-NO_3^-$ formado difunde retornando à camada anaeróbica, onde está passível de denitrificação (Reddy et al., 1976). A oxidação biológica do NH_4^+ a NO_3^- , que ocorre na camada oxidada do solo, gera um gradiente de concentração de NH_4^+ facilitando a sua difusão da camada anaeróbica até a aeróbica, e o NO_3^- resultante se difunde em sentido contrário até a camada anaeróbica onde é desnitrificado (De Datta, 1981). O principal processo que controla a perda de N é a taxa de difusão do amônio até a camada aeróbica, tendo em vista que os processos de difusão de nitrato à camada anaeróbica e de redução do NO_3^- a N_2 são relativamente rápidos (Reddy et al., 1976).

2.3.3 Perdas de N por lixiviação

A perda de N por lixiviação ocorre como consequência dos processos de transferência do N em profundidade com a água de percolação, estando muito relacionada com a permeabilidade dos solos. Atualmente existe pouca informação referente à importância deste processo de perdas em solos inundados cultivados com arroz irrigado. A percolação do N em profundidade não é considerada tão importante em solos destinados à lavoura de arroz irrigado tendo em vista este ser geralmente de baixa permeabilidade (Patrick et al., 1985). Entretanto, de acordo com Patrick & Mahapatra (1968), as perdas de NH_4^+ por lixiviação são importantes em solos alagados se comparada com solos bem drenados, devido ao maior acúmulo de NH_4^+ e a carga permanente da lâmina de água no solo alagado provocando maior percolação. As perdas por este mecanismo nos solos alagados devem ser mais importantes em solos de textura grosseira ou em solos com altas quantidades de hidróxidos de ferro ou alumínio (Savant & De Datta, 1982), tendo em vista que nestes solos deve permanecer maior quantidade de NH_4^+ na solução do solo e, portanto, mais facilmente lixiviado.

Em estudo realizado com ^{15}N por Patrick & Reddy (1976), os autores demonstraram ser reduzida as perdas de N por lixiviação, já que ao final do ciclo da lavoura o ^{15}N aplicado foi detectado somente até 25 cm de profundidades. De modo semelhante, Beltrame et al. (1992) no Rio Grande do Sul determinaram que as perdas de NO_3^- corresponderam a 3,6% do N aplicado. Estas perdas não foram muito altas para modificar a forma de aplicar o N na cultura de arroz irrigado, mas podem contribuir à poluição de águas subterrâneas.

2.4 Manejo da adubação nitrogenada para o arroz irrigado e a eficiência do N aplicado

O manejo adequado do N na cultura de arroz irrigado é fundamental para que não haja prejuízo na relação custo/benefício para o meio ambiente e para a nutrição das plantas. Considerando que o N é o elemento mais utilizado, extraído e exportado pelas culturas, sendo o mais empregado na adubação e, considerando, ainda, que sua dinâmica no solo alagado é intensa, envolvendo processo de adição

por adubação e perdas, reforça-se a necessidade de estudos que viabilizem o manejo adequado da adubação nitrogenada na cultura de arroz irrigado.

A recuperação pelas plantas do nitrogênio fornecido através da adubação mineral é normalmente inferior a 50% (Rao et al., 1992). Porém, a eficiência da adubação mineral nitrogenada pode ser potencializada através do manejo de aplicação (forma e época) e fonte mineral utilizada. Segundo (Vlek & Byrnes, 1986) a recuperação de N pelas plantas tem variado entre 20 e 40% do nitrogênio aplicado. Também De Datta (1981) estabelece que a recuperação pode ser tão baixa como 10% e raramente excede a 30 – 40% do nitrogênio aplicado.

De modo geral, diferentes fontes são equivalentes quando aplicados adequadamente, não apresentando diferenças significativas quanto às perdas de NH_3 por volatilização (Byrnes, 2000). Entretanto, fontes nitrogenadas amídicas (uréia), em determinadas condições, tem maior disposição para a perda por volatilização. A uréia é uma das fontes de N mais utilizadas na agricultura brasileira, por apresentar elevada concentração de N e por baixo custo por unidade de nitrogênio. Entretanto, a perda de amônia (NH_3) por volatilização tem sido considerada um dos principais motivos pelo qual a eficiência desse fertilizante em fornecer N às culturas esta abaixo da esperada (Kiehl, 1989).

No manejo da adubação nitrogenada, as perdas de N por volatilização podem ser significativamente reduzidas ou favorecidas, de acordo com as condições da aplicação. Por exemplo, aplicação de uréia em solos de baixa CTC, pH básico, cobertos com palhada, baixa umidade e sob alta temperatura, há favorecimento das perdas por volatilização. A redução deste tipo de perda pode ser alcançada através de práticas de aplicação incorporada, sob temperaturas amenas, em boas condições de umidade. Entretanto, para o arroz irrigado, o manejo da água de alagamento também tem grande importância na dinâmica do N no solo, conforme abordado anteriormente.

Mielniczuk (1970), estudando o efeito de sistema de irrigação (alagamento) com diferentes épocas de drenagem durante o ciclo do arroz, observou que grande parte do N foi perdida do solo através dos ciclos de alagamento e drenagem, afetando sensivelmente o rendimento da cultura. Em outro trabalho realizado por Gomes et al., (1979) com varias cultivares de arroz e níveis de N, durante três anos, mostraram sensíveis aumentos de rendimentos quando o N foi aplicado aos cinco dias após o alagamento, em comparação com aplicação juntamente com esta. Em

contrapartida, Larroza (2000), avaliando a eficiência de três modalidades de aplicação e três doses de N na cultura de arroz, encontrou que a uréia + banho e uréia + alagamento são superiores em relação à uréia aplicada na água, e que o N aplicado no início do alongamento de entrenós nivelou estas diferenças. Conseqüentemente, a produção de grãos não foi afetada pela modalidade de aplicação de uréia, e sim, pelas doses de N aplicadas.

2.5 Hipótese

A perda de N por volatilização de amônia será maior com uréia aplicada em solo seco que em solo alagado devido a maior dificuldade de difusão do nitrogênio liberado pela hidrólise da uréia. Entretanto, a entrada da água de alagamento o mais rápido possível após a aplicação da uréia em solo seco facilitará a incorporação do nitrogênio e o afastará de regiões favoráveis às reações de oxidação e redução, contribuindo para diminuir as perdas por volatilização e denitrificação, respectivamente, apresentando-se como a melhor estratégia de manejo da primeira adubação nitrogenada em cobertura no arroz irrigado por alagamento.

2.6 Objetivos:

1. Avaliar a perda de N por volatilização de amônia em solo com diferentes níveis de umidade do solo.
2. Avaliar o acúmulo de N e rendimento de grãos a partir da uréia aplicada em diferentes épocas em relação ao início do alagamento para o arroz irrigado.

3. MATERIAL E MÉTODOS

O estudo foi conduzido através de dois experimentos instalados em casa-de-vegetação para determinação de perdas de N por volatilização de NH_3 em função da umidade do solo e o acúmulo de N em função de época da aplicação de N, e de outros dois instalados a campo para determinação do acúmulo de N e da produtividade de grãos de arroz em função de época de aplicação de N.

3.1 Experimentos em casa-de-vegetação

Os experimentos foram conduzidos na casa-de-vegetação do Departamento de Solos (DS) da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), no município de Santa Maria, localizada na região fisiográfica da depressão Central do Estado do Rio Grande do Sul, latitude $29^\circ 41'$ sul, longitude de $53^\circ 48'$ oeste e altitude de 95 metros. O clima da região enquadra-se na classificação "Cfa" de koppen, ou seja, clima subtropical úmido sem estiagem, com temperatura média do mês mais quente superior a 22°C e a temperatura do mês mais frio entre -3°C e 18°C (Moreno, 1961). O solo utilizado nos experimento foi na camada de 0 - 20 cm da área experimental de várzea destinado para cultura de arroz irrigado do DS, caracterizado como um Planossolo Hidromórfico eutrófico arênico (Embrapa, 1999). O período experimental foi estendido de setembro a dezembro de 2005, cujas temperaturas e precipitações médias são observadas no Anexo 1.

3.1.1 Avaliação das perdas de N por volatilização de NH_3

3.1.1.1 Solo e tratamentos

Para referenciar as perdas de N por volatilização de amônia foi utilizado um solo de várzea peneirado em malha de 2 mm e seco ao ar, onde uma porção de 5 kg foi transferida para vasos plásticos de 8 L acondicionados na casa-de-vegetação (Anexo 1). Antes de instalar os tratamentos, foi retirada uma amostra de solo para à caracterização física e química. Os resultados das análises estão na Tabela 1.

Tabela 1. Características físicas e químicas do solo utilizados nos experimentos de casa-de-vegetação. Santa Maria, RS, 2005.

Textura	Argila g Kg ⁻¹	pH-H ₂ O 1:1	Índice SMP	P.....mg L ⁻¹	K.....mg L ⁻¹	M.O. g kg ⁻¹	Al.....cmol _c L ⁻¹	Ca.....cmol _c L ⁻¹	Mg.....cmol _c L ⁻¹
3	280	5,2	6,0	6,3	48,0	17	0,9	7,0	2,8
H+AL	CTC		Saturação						
	Efetiva	pH 7	Al		Bases				
	.....cmol _c L ⁻¹.....	.....cmol _c L ⁻¹.....	.....cmol _c L ⁻¹%				
3,6	10,8	13,5	8		74				

A aplicação de nitrogênio foi equivalente a 100 kg de N ha⁻¹, utilizando-se uréia em grânulos como fonte de N, aplicada na superfície do solo. O delineamento experimental utilizado foi completamente casualizado com quatro repetições. Os tratamentos avaliados foram:

- NO** - Testemunha (solo na umidade de 70% da capacidade de campo e sem aplicação de uréia);
- USSE** - Aplicação de uréia em solo seco;
- USUM** - Aplicação de uréia em solo úmido com 70% capacidade de campo;
- USSA** - Aplicação em solo saturado; e
- USLA** - Aplicação de uréia em solos com lamina de água.

Para ajustar o nível de umidade do solo foi utilizado a teoria da capacidade de campo estimada com uma saturação e posterior esvaziamento dos poros durante 48 horas. A partir disso, a umidade das amostras foi controlada através do peso total, enquanto que para o nível saturado foi mantido água até a superfície e para lâmina de água foi mantida uma altura de 10 cm de água sobre a superfície do solo.

3.1.1.2 Determinação de N volatilizado através do coletor semi-aberto

As avaliações das perdas de N por volatilização por cada tratamento foram realizadas conforme Nõmmik (1973) com algumas adaptações. Foram utilizadas câmaras coletoras de amônia de tipo semi-aberto, construídas a partir de tubo de PVC (cloro-polivinil) de 200 mm de diâmetro e 400 mm de altura, assentado a um suporte de PVC com 185 mm de diâmetro e 70 mm de altura, as quais foram

introduzidas no solo dos vasos em cada tratamento até uma profundidade de 30 mm. Sobre os tubos foram colocados suportes de metal aos quais foi acoplada uma tampa protetora (pratos de plásticos), para impedir a incidência de raios solares no interior da câmara, os quais podem afetar a temperatura interna do sistema.

Em cada câmara coletora foram colocados dois discos de espuma de tipo comercial de 2 mm de espessura e com densidade 28; a primeira foi colocada a uma altura de 15 cm do solo, para a captura da amônia volatilizada a partir do solo, e a segunda a 30 cm de altura, para captar a amônia proveniente da atmosfera, impedindo a contaminação da esponja inferior. Os discos de espuma eram mantidos sobre uma estrutura metálica adaptada internamente nas câmaras coletoras. Na figura 1 é apresentado o coletor semi-aberto estático utilizado para a quantificação do N perdido por volatilização.

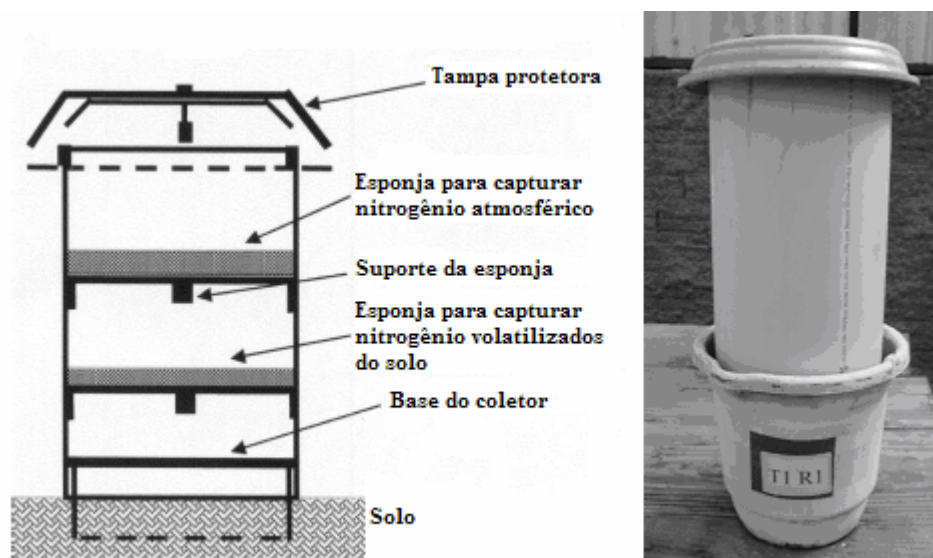


Figura 1. Esquema e foto do coletor semi-aberto utilizados para determinar as perdas de nitrogênio por volatilização de amônia.

Os discos de espuma foram preparados no momento de serem instalados nos coletores de amônia, sendo cada um acondicionado em saco de plástico (5 kg) juntamente com 100 ml de uma solução preparada com 50 ml de H_3PO_4 e 40 ml de glicerina por litro. Por ocasião da instalação, os discos de espuma foram comprimidos para retirar o excesso da solução de modo que retivessem aproximadamente 70 ml da solução, evitando o gotejamento no interior dos cilindros.

Os discos inferiores foram trocados a cada avaliação, Já os discos superiores nunca foram trocados. As avaliações das perdas de amônia foram realizadas as 10, 24, 34, 48, 72, 96, 144, 192 e 264 horas apos a aplicação da uréia no solo.

Após cada coleta, o fosfato de amônio formado foi extraído imediatamente dos discos de espuma por meio de oito a dez lavagens sucessivas com solução de KCl 1 mol L⁻¹. O produto dessa lavagem foi coletado em balões volumétricos e o volume ajustado para 500 ml com a solução de KCl. De cada balão foi retirada uma alíquota de 20 ml para determinação do teor de N-NH₃⁺ em destilador de arraste de vapor semi-micro Kjeldahl utilizando metodologia descrita por Tedesco et al. (1995).

Ao final do experimento foi coletada uma amostra de solo da camada de 0-10 cm para determinação da umidade gravimétrica em cada tratamento (Tabela 2).

Tabela 2. Umidade gravimétrica do solo na camada 0-10 cm determinada imediatamente após a última avaliação da volatilização de amônia no experimento de casa de vegetação.

UMIDADE GRAVIMÉTRICA	TRATAMENTOS			
	N0	USSE	USUM	USSA
	%.....			
	40,8	5,7	41,0	54,3

3.1.2 Determinação do N absorvido em função da época de aplicação de uréia em relação ao início do alagamento

3.1.2.1 Solo e tratamentos

O solo utilizados neste experimento foi coletado no mesmo local de onde uma porção de 5 kg do solo utilizado no experimento para avaliar as perdas de N por volatilização de amônia foi transferida para vasos de 8L e acondicionados em casa de vegetação onde foi implantado a cultura do arroz. A aplicação de nitrogênio foi equivalente a 100 kg de N ha⁻¹, utilizando-se uréia em grânulos como fonte de N, aplicada na superfície do solo. O delineamento experimental utilizado foi completamente casualizado com quatro repetições, Os tratamentos avaliados foram os seguintes:

- a) **N0** - Testemunha (sem aplicação de N);
- b) **N15AA** - Aplicação de uréia 15 dias antes do alagamento dos solos;

- c) **N10AA** - Aplicação de uréia 10 dias antes do alagamento dos solos;
- d) **N5AA** - Aplicação de uréia 5 dias antes do alagamento dos solos;
- e) **N1AA** - Aplicação de uréia 1 dia antes do alagamento dos solos; e
- f) **N1DA** - Aplicação de uréia 1 dia após o alagamento dos solos.

3.1.2.2 Cultivo do arroz irrigado

Utilizaram-se 8 plântulas por vaso da cultivar IRGA 422 CL, cujas sementes foram previamente colocadas para germinar em papel filtro e transplantadas quando as radículas estavam com aproximadamente 1 cm, das quais se deixou 6 unidades por vaso após 8 dias do transplante (Anexo 4).

Após 21 dias do transplante iniciou-se a aplicação de uréia de acordo com os tratamentos, sendo que o alagamento dos vasos ocorreu aos 36 dias de cultivo. Após 20 dias do início do alagamento dos vasos (56 dias de cultivo do arroz), foi coletada a parte aérea das plantas, as quais foram imediatamente pesadas para a determinação de matéria verde e colocadas em estufa para secagem a 65°C até massa constante para determinação de matéria seca. Para avaliar o acúmulo de N, foram considerados a matéria seca da parte aérea das plantas e o teor de N no tecido, determinado após a moagem do tecido das plantas e conforme metodologia descrita por Tedesco et al. (1995).

3.1.3 Análise estatística

Os resultados, obtidos nos dois experimentos, foram analisados através da análise de variância e as médias dos tratamentos comparadas através do teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade de erro.

3.2 Experimentos a campo

O estudo a campo para avaliação da época de aplicação de N para a cultura do arroz irrigado em relação ao início do alagamento foi conduzido em dois locais diferentes e no mesmo ano agrícola (2004/05), para as quais foram caracterizados de forma individual como Experimentos 1 e 2. O período experimental foi estendido de novembro de 2004 a março de 2005, cujas temperaturas e precipitações médias

são observadas no Anexo 1.

3.2.1 Experimento 1 – Épocas de aplicação de N

3.2.1.1 Solo e tratamentos

O experimento 1 foi conduzido na área experimental do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria. Os tratamentos avaliados constituíram-se na aplicação de 45 kg ha⁻¹ de N na forma de uréia para a primeira cobertura nitrogenada aplicada em diferentes épocas de acordo com os seguintes tratamentos:

- a) **N0** - Testemunha sem N;
- b) **N7AA** - Aplicação de uréia 7 dias antes do alagamento do solo;
- c) **N4AA** - Aplicação de uréia 4 dias antes do alagamento do solo;
- d) **N1AA** - Aplicação de uréia 1 dia antes do alagamento do solo,
- e) **N1DA** - Aplicação de uréia 1 dia depois do alagamento do solo; e
- f) **N2DA** - Aplicação de uréia 2 dias depois do alagamento do solo.

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso com quatro repetições, com parcelas cujas dimensões foram de 4m x 5m (20m²) de superfície. As características físicas e químicas do solo da camada de 0 – 10 cm da área experimental são apresentados na Tabela 3.

Tabela 3. Características físicas e químicas do solo da camada de 0 – 10 cm antes da instalação do experimento. Santa Maria, RS, 2005.

Textura	Argila g Kg ⁻¹	pH-H ₂ O 1:1	Índice SMP	P.....mg L ⁻¹	K	M.O. g kg ⁻¹	Al.....cmol _c L ⁻¹	Ca	Mg
3	280	5,3	6,1	7,2	38,0	20	0,6	7,4	3,0
H+AL	CTC		Saturação						
	Efetiva	pH 7	Al		Bases				
.....	.....cmol _c L ⁻¹.....	.....	.....		.....%
3,3	11,1	13,8	5		76				

3.2.1.2 Cultivo do arroz irrigado

Na área experimental foi utilizado a cultivar IRGA 420, com espaçamento entre linhas de 0,17m e densidade de semeadura de 120 kg ha⁻¹, com uma população de aproximadamente 300 plantas m⁻². A adubação na semeadura consistiu da

aplicação de 250 kg ha⁻¹ da fórmula (8-18-28). A adubação nitrogenada em cobertura foi dividida em duas aplicações, a primeira adubação de cobertura foi realizada na fase de perfilhamento conforme os tratamentos (18 dias após a semeadura) e a segunda no início da diferenciação da panícula (52 dias após a semeadura), sendo que nesta aplicação todos os tratamentos receberam 45 kg ha⁻¹ de N na forma de uréia ao mesmo tempo, exceto na testemunha que não recebeu N em todo o ciclo da cultura.

A irrigação teve início aos 25 dias após a emergência através da manutenção de uma lâmina de água de 10 cm nos quadros. Para o controle das plantas daninha foi utilizados os herbicidas propanil (1,08 kg i.a. ha⁻¹) e quinclorac (0,375 kg i.a. ha⁻¹).

3.2.1.3 Avaliações realizadas

Após 25 dias da última época da primeira aplicação de N em cobertura (fase de perfilhamento pleno), foram realizadas avaliações de massa verde (MV) e seca (MS) e acúmulo de nitrogênio pelas plantas (ANP), através da coleta de plantas em quadros de 25x25cm nas parcelas, as quais foram imediatamente pesadas para a determinação de MV, e a seguir colocadas em estufa para secagem a 65°C até massa constante para determinação de MS. Para avaliar o acúmulo de nitrogênio foram considerados a produção de MS e o teor em N total do tecido, determinado após moagem do tecido e conforme metodologia descrita por Tedesco et al. (1995).

A produtividade de grãos foi determinada pela massa de grãos colhidos em uma área de 1m x 4m (4m²) nas parcelas. As amostras foram colhidas manualmente e trilhadas com auxílio de uma trilhadora. Nesta amostras foi determinada a umidade dos grãos, sendo corrigida a produtividade para 13% de umidade.

3.2.2 Experimento 2 – Épocas de aplicação de N

3.2.2.1 Solo e tratamentos

O experimento 2 foi conduzido na área experimental do Departamento de Fitotecnia da Universidade Federal de Santa Maria. Os tratamentos avaliados constituíram-se na aplicação de 45 kg ha⁻¹ de N na forma de uréia para a primeira cobertura nitrogenada aplicada em diferentes épocas de acordo com os seguintes

tratamentos:

- a) **N0** - Testemunha sem N;
- b) **N10AA** - Aplicação de uréia 10 dias antes do alagamento do solo;
- c) **N6AA** - Aplicação de uréia 6 dias antes do alagamento do solo;
- d) **N3AA** - Aplicação de uréia 3 dias antes do alagamento do solo;
- e) **N0A** - Aplicação de uréia no dia do alagamento com solo saturado; e
- f) **N3DA** - Aplicação de uréia 3 dias depois do alagamento do solo.

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos ao acaso com quatro repetições, com parcelas cujas dimensões foram de 2,5m x 5m (12,5m²) de superfície. As características físicas e químicas do solo da camada 0 – 10 cm da área experimental são apresentados na Tabela 4.

Tabela 4. Características físicas e químicas do solo da camada de 0 – 10 cm antes da instalação do experimento. Santa Maria, RS, 2005.

Textura	Argila g Kg ⁻¹	pH_{H2O} 1:1	Índice SMP	P.....mg L ⁻¹	K.....g kg ⁻¹	M.O. g kg ⁻¹	Al.....cmol _c L ⁻¹	Ca	Mg
4	250	5,3	6,2	7,2	34,0	22	0,6	6,1	2,4
H+AL	CTC		Saturação						
	Efetiva	pH 7		Al		Bases			
	.....cmol _c L ⁻¹.....	.....		.....%		.....
3,0	9,2	11,6		7		74			

3.2.2.2 Cultivo do arroz irrigado

O cultivar de arroz utilizado foi o Qualitá, com espaçamento entre linhas de 0,17m e densidade de semeadura de 120 kg ha⁻¹. A adubação na semeadura foi realizada com aplicação de 300 kg ha⁻¹ da fórmula (2-20-30). A adubação nitrogenada em cobertura foi dividida em duas aplicações, sendo a primeira adubação de cobertura realizada na fase de perfilhamento conforme os tratamentos (13 dias após a semeadura) e a segunda no início da diferenciação da panícula (49 dias após a semeadura). Nesta aplicação todos os tratamentos receberam 45 kg ha⁻¹ de N na forma de uréia ao mesmo tempo, exceto na testemunha que não recebeu N em todo o ciclo da cultura.

A irrigação teve início aos 23 dias após a emergência através da manutenção de uma lâmina de água de 10 cm nos quadros. Para o controle das plantas daninha foi utilizado o herbicida propanil (1,4 kg i.a. ha⁻¹) e quinclorac (0,6 kg i.a. ha⁻¹).

3.2.2.3 Avaliações realizadas

Após 23 dias da última época da aplicação de N nos tratamentos (fase de perfilhamento pleno), foram realizadas avaliações de MV, MS e ANP, conforme descrito no experimento 1

A produtividade de grãos foi determinada também conforme descrito no experimento 1.

3.2.3 Eficiência agronômica e de recuperação do N aplicado

Estes parâmetros foram estimados, para os experimentos 1 e 2, na 1ª adubação de cobertura fase de perfilhamento, conforme proposto por Fageria et al. (1999);

1) **Eficiência agronômica:** $\frac{MS_{cf} - MS_{sf}}{QNa}$, em kg kg⁻¹,

MS_{cf}: Matéria seca produzida com fertilizantes,

MS_{sf}: Matéria seca produzida sem fertilizantes,

QNa: Quantidade de N aplicado.

2) **Recuperação aparente de N :** $\left(\frac{NAB_{cf} - NAB_{sf}}{QNa} \right) \times 100$

NAB_{cf}: N absorvido nas parcelas com fertilizantes,

NAB_{sf}: N absorvido nas parcelas sem fertilizantes.

3.2.4 Análise estatística

Os resultados, no experimento 1 e 2, foram analisados através da análise de variância e as médias dos tratamentos comparadas através do teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade de erro.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Perdas de nitrogênio por volatilização de amônia em diferentes níveis de umidade do solo

Os maiores picos de emissão de N-NH₃ para a atmosfera ocorreram nas primeiras 36 a 48 horas após a aplicação da uréia no solo, nos tratamentos com solo úmido (USUM) e saturado (USSA), embora este último tenha retardado o pico em algumas horas em relação ao primeiro (Figura 2). Outros estudos já 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; Sengik & Kiehl, 1995a, Lara Cabeza et al., 1997b). Entretanto, para o tratamento com lâmina de água (USLA), o pico de emissão de N-NH₃ ocorreu mais tarde, aproximadamente 72 horas após a aplicação. Uma possível explicação para esse comportamento está relacionado com a presença da lâmina de água e a menor difusão de gás nessas condições. Desse modo, a aplicação da uréia sobre a lâmina de água é uma estratégia que não impede a ocorrência da volatilização e sim retarda seu fluxo para atmosfera.

Já o tratamento com aplicação em solo seco (USSE) registrou um fluxo semelhante ao tratamento sem aplicação de uréia (NO) o que indica ausência de volatilização de N durante o período de avaliação com o solo nessas condições. Neste caso, as condições de umidade do solo nesse tratamento não devem ter sido suficientes para que a uréia seja hidrolisada pela ação da urease, interrompendo a formação dos produtos da reação que proporcionam as perdas de N-NH₃ por volatilização.

A maior intensidade de emissão de N-NH₃ foi de aproximadamente 275 g ha⁻¹ h⁻¹, para o tratamento USUM, sendo que houve uma redução intensa desta emissão após 96 horas da aplicação, cujos valores ficaram abaixo de 50 g ha⁻¹ h⁻¹. A expressiva redução na taxa diária de volatilização, passando 96 horas depois da aplicação da uréia, pode indicar que a amônia moveu-se para camadas mais profundas do solo, onde o processo de volatilização de N-NH₃ é reduzido (Rodrigues & Kiehl, 1986; 1992; Hargrove, 1988). Essa tendência de reação à taxa de emissão de amônia também ocorre para os tratamentos USSA e USLA, embora um pouco mais tarde ao que o tratamento USUM, tendo em vista que a intensidade máxima também ocorreu um pouco mais tarde para esses tratamentos.

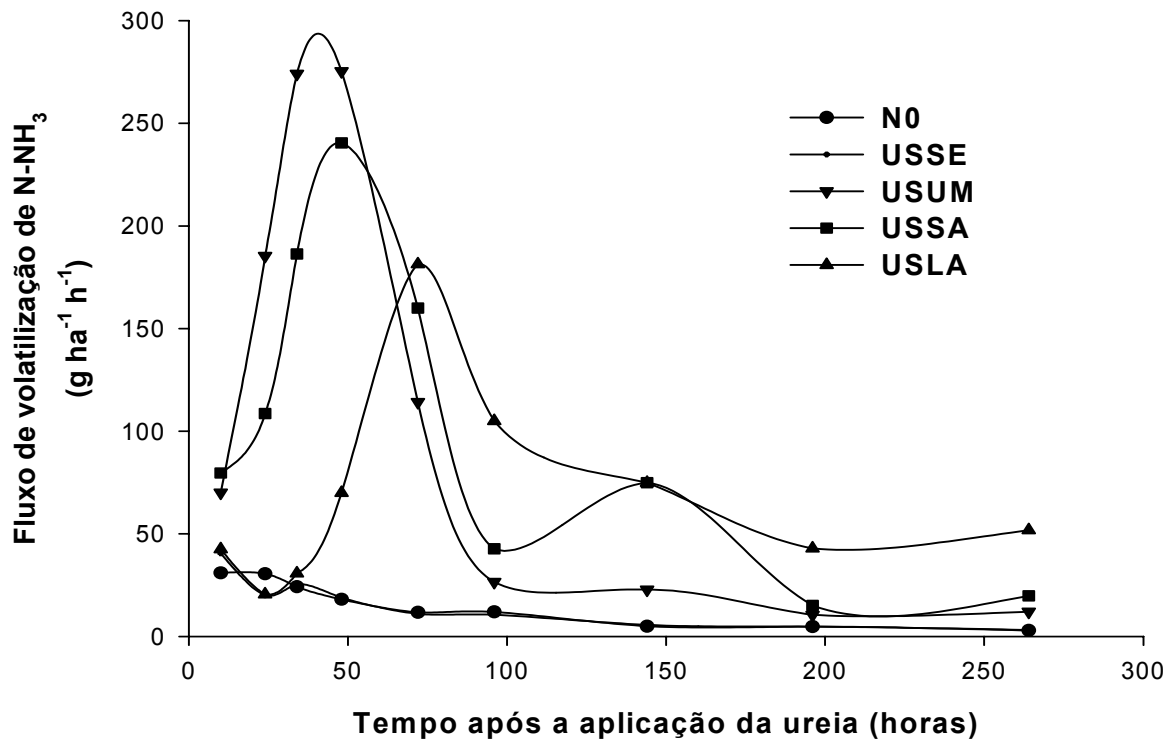


Figura 2. Fluxo da emissão de N-NH₃ para a atmosfera com aplicação de uréia em solo sobre diferentes níveis de umidades. **NO** = sem aplicação de uréia; **USSE** = uréia aplicada em solo seco; **USUM** = uréia aplicada em solo úmido; **USSA** = uréia aplicada em solo saturado; e **USLA** = uréia aplicada sobre lâmina de água.

Em condições de campo, os fluxos diários de volatilização de amônia e consecutivas perdas de nitrogênio podem ser afetados pela ação conjunta de fatores de solo e de clima. Podem-se citar como fatores de solo, o elevado potencial de hidrólise da uréia em solo úmido, a elevação do pH no local de hidrólise da uréia e o maior conteúdo de água no solo (Ernst & Massey, 1960; Black et al., 1985; Hargrove, 1988). Como fator de clima, destaca-se a temperatura (Black et al., 1987; Bouwmeester et al., 1985; Hargrove, 1988) que, juntamente com as características do solo, proporcionam elevada concentração de N-NH₃ próxima à superfície e alta taxa de perda de água do solo. Dessa maneira, determinam um elevado potencial de perda de N-NH₃ para fora do sistema solo. Uma correlação positiva entre evaporação e volatilização de N-NH₃. Wahhab et al (1957) e pela solubilidade da amônia em água, que como consequência aumenta a perda de amônia em solos alagados (Rajaratnam et al, 1973).

Os diferentes valores nos fluxos de emissão de $N-NH_3$ provocados pelos diferentes níveis de umidade do solo resultaram em diferentes quantidades acumuladas de $N-NH_3$ volatilizada no período de condução do experimento (Tabela 5). As maiores perdas acumuladas de $N-NH_3$ ocorreram até as 144 horas após a aplicação dos tratamentos, exceto para o tratamento USSE que não volatilizou nitrogênio durante a avaliação comparado com o tratamento N0. Resultados semelhantes foram encontrados por Sengik & Kiehl (1995a; 1995b) onde a máxima perda de $N-NH_3$ por volatilização concentrou-se nas primeiras 144 horas (6 dias) após a aplicação do fertilizante. Nas primeiras 24 horas, a maior perda de nitrogênio ocorreu para a uréia aplicada no tratamento USUM, enquanto que entre 24 e 72 horas as maiores perdas foram para os tratamentos USUM e USSA. A partir das 96 horas da aplicação da uréia, as perdas acumuladas de nitrogênio por volatilização de amônia para os tratamentos USUM, USSA e USLA foram equivalentes, sendo que praticamente não houve perda de N com a uréia aplicada em USSE (Tabela 5). Cabe salientar que neste tratamento o solo encontrava-se em condições de baixa umidade, a qual dificilmente seria encontrada em condições de campo em vista que causaria prejuízo ao desenvolvimento das plantas.

Os resultados das perdas acumuladas de nitrogênio até 264 horas após a aplicação de uréia no solo em diferentes níveis de umidades gravimétrica do solo mostram o efeito que o nível de umidade pode causar na dinâmica de perda de N quando a uréia é aplicada em diferentes condições de campo. Embora as perdas de N ao final do período de avaliação tenham sido equivalentes, a presença das plantas absorvendo parte do N aplicado também irá influenciar a eficiência ao modo e condições de aplicar a uréia. Nesse sentido, considerando a aplicação da uréia antes do alagamento do solo, as maiores perdas de N por volatilização vão ocorrer dentro do intervalo de 3 dias após a aplicação. A entrada a água de irrigação logo em seguida a aplicação poderia ser uma estratégia para incorporar a uréia ao solo, diminuindo as perdas e aumentando a eficiência da adubação, desde que o N permaneça acessível as plantas.

A entrada de água após 3 dias de aplicação deverá ter pouco efeito para diminuir as perdas de N por volatilização, o que não quer dizer que sua eficiência seja menor que a aplicação sobre a lâmina de água, tendo em vista que nesse tratamento também ocorreram perdas de N por volatilização de amônia.

De outro modo, a aplicação da uréia sobre lâmina de água não irá impedir as perdas por volatilização de amônia, além de ser normalmente mais difícil a campo e com maior custo de aplicação.

Tabela 5. Perdas acumuladas de N-NH₃ com aplicação de uréia em diferentes níveis de umidades do solo.

Tratamentos	Tempo após aplicação da uréia (horas)								
	10	24	34	48	72	96	144	192	264
	..... N-NH ₃ kg ha ⁻¹								
NO	0,31b	0,73b	0,98b	1,23b	1,51c	1,75b	2,04b	2,27b	2,48b
USSE	0,40ab	0,69b	0,94b	1,20b	1,47c	1,73b	2,03b	2,23b	2,46b
USUM	0,70ab	3,29a	6,04a	9,89a	12,63a	13,72a	14,36a	14,87a	15,74a
USSA	0,79a	2,31b	4,18ab	7,54a	11,38a	12,80a	13,82a	14,55a	15,97a
USLA	0,42ab	0,71b	1,08b	2,00b	6,35b	9,94a	12,46a	14,52a	18,25a
Media	0,52	1,55	2,63	4,37	6,67	7,99	8,94	9,69	10,98
CV%	40	54,4	54,6	30,3	23,9	21,9	22,6	21,5	24,4

NO = sem aplicação de uréia; **USSE** = uréia aplicada em solo seco; **USUM** = uréia aplicada em solo úmido; **USSA** = uréia aplicada em solo saturado; e **USLA** = uréia aplicada sobre lâmina de água. Tratamentos com médias seguidas por letras distintas na coluna diferem pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade de erro.

A percentagem de N volatilizado proveniente da uréia, calculada por meio da diferença entre os tratamentos com e sem aplicação de uréia, encontra-se na tabela 6. As perdas após 264 horas (11 dias) da aplicação de uréia variaram entre 13 a 16% do N aplicado nos tratamentos USUM, USSA e USLA e ficaram em 0,03% no tratamento USSE. Estas perdas são da mesma ordem de magnitude das encontradas por Sengik & Kiel (1995a). De maneira geral, essas quantidades são relativamente baixas, comparado aos valores normalmente encontrados em condições de sequeiro e a campo por Fenn & Kissel (1974) e por Fergusson et al. (1984), cujas perdas variaram de 42 a 50% do N, incluindo aplicar uréia na

superfície e sem incorporação ao solo (Lara cabezas et al., 1997b; Lara Cabezas et al., 2000). Este fato pode ser parcialmente atribuído ao dispositivo semi-aberto estático empregado na quantificação da amônia volatilizado. O fato de o dispositivo ser semi-aberto, impede a ação do vento sobre o processo volatilização o que pode subestimar a perda real de N por este processo. (Thompson et al. 1990; Sommer & Hutchings 2001). Outra variável que determina a intensidade de perda é a temperatura, cuja variação diária e noturna na casa-de-vegetação não foi controlada, estando sujeita as oscilações ambientais ocorridas no período da avaliação. Dessa forma, os valores absolutos de perda devem ser interpretados com cautela e referendados em trabalhos futuros.

Desde o ponto de vista estatístico as perdas de N por volatilização com a uréia não diferiram entre a aplicação no solo úmido (USSU) e em lâmina de água (USLA). Tal resultado indica que a aplicação de uréia para a cultura de arroz irrigado depois do alagamento (sobre lâmina de água) não se traduz em vantagem para diminuir as perdas por volatilização em relação a aplicação do N antes do alagamento.

Tendo em vista os diferentes potenciais de perdas de N por volatilização de amônia, bem como a taxa de absorção de N pelas plantas, que podem ser afetados pelas condições climáticas (temperatura, umidade reativa do ar e umidade do solo) e fatores genéticos, a combinação desses fatores pode determinar diferenças no tempo ótimo entre a aplicação de N e o início do alagamento para maior aproveitamento do fertilizante nitrogenado aplicado.

Tabela 6. Quantidades de N-NH₃ volatilizado proveniente da aplicação da uréia (NVPU) aplicado em diferente estado de umidades em relação ao tratamento sem uréia.

Tempo após aplicação	NVPU				CV
	USSE	USSU	USSA	USLA	
horas	.....% do N aplicado.....				%
10	0,09a	0,39a	0,49a	0,11a	87
24	-0,05b	2,55a	1,46ab	-0,20b	91
34	-0,04ab	5,06a	3,19ab	0,04ab	80
48	-0,02b	8,66a	6,31a	0,76b	39
72	-0,04c	11,12a	9,87a	4,83b	28
96	-0,01b	11,97a	11,07a	8,19a	25
144	-0,03b	12,32a	11,82a	10,42a	26
192	-0,04b	12,60a	12,32a	12,25a	25
264	0,03b	13,25a	13,52a	15,77a	29

USSE = uréia aplicada em solo seco; **USSU** = uréia aplicada em solo úmido; **USSA** = uréia aplicada em solo saturado; e **USLA** = uréia aplicada sobre lâmina de água.

Tratamentos com médias seguidas por letras distintas na linha diferem pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade de erro.

4.2. Época de aplicação de nitrogênio em função da época de início do alagamento da lavoura de arroz irrigado – experimento em casa-de-vegetação

O incremento percentual de matéria verde e seca na parte aérea do arroz irrigado em função da adubação nitrogenada de cobertura aplicada em diferentes épocas em relação à entrada de água encontra-se na figura 3. Embora em valores absolutos haja uma diferença de 14 pontos percentuais entre a aplicação após a aplicação da lâmina de água e a aplicação aos 15 DAA, não houve diferença estatística significativa. Este comportamento demonstra que a época de aplicação de N em relação ao início do alagamento não foi fator determinante para a resposta ao N aplicado. Entretanto, deve-se considerar que no caso do experimento ser conduzido em vasos, o sistema é fechado e não devem ocorrer perdas por lixiviação ou escoamento superficial, aumentando a eficiência do N aplicado. Dessa forma, apesar da maior exposição às variações climáticas e edáficas que podem representar maior variabilidade, experimentos desenvolvidos em condições de campo podem ser mais sensíveis para diferenciar com maior precisão a melhor época a ser aplicada a primeira adubação de cobertura para a cultura do arroz irrigado.

Os parâmetros teor e quantidade acumulada de N na parte aérea do arroz irrigado em função da época de aplicação de uréia para o arroz irrigado diferiram entre os tratamentos (Tabela 7). Para o teor de N no tecido, a uréia aplicada quinze dias (N15AA) e cinco dias antes do alagamento (N5AA) tiveram os maiores valores, enquanto os tratamentos com aplicação um dia antes (N1AA) e um dia após o alagamento (N1DA) foram os menores valores daqueles adubados, sendo significativamente superiores à testemunha. Comportamento semelhante foi observado para a quantidade equivalente de N acumulado na parte aérea do arroz, os quais demonstram resposta diferenciada nas diferentes épocas de aplicação de N sobre a disponibilidade às plantas.

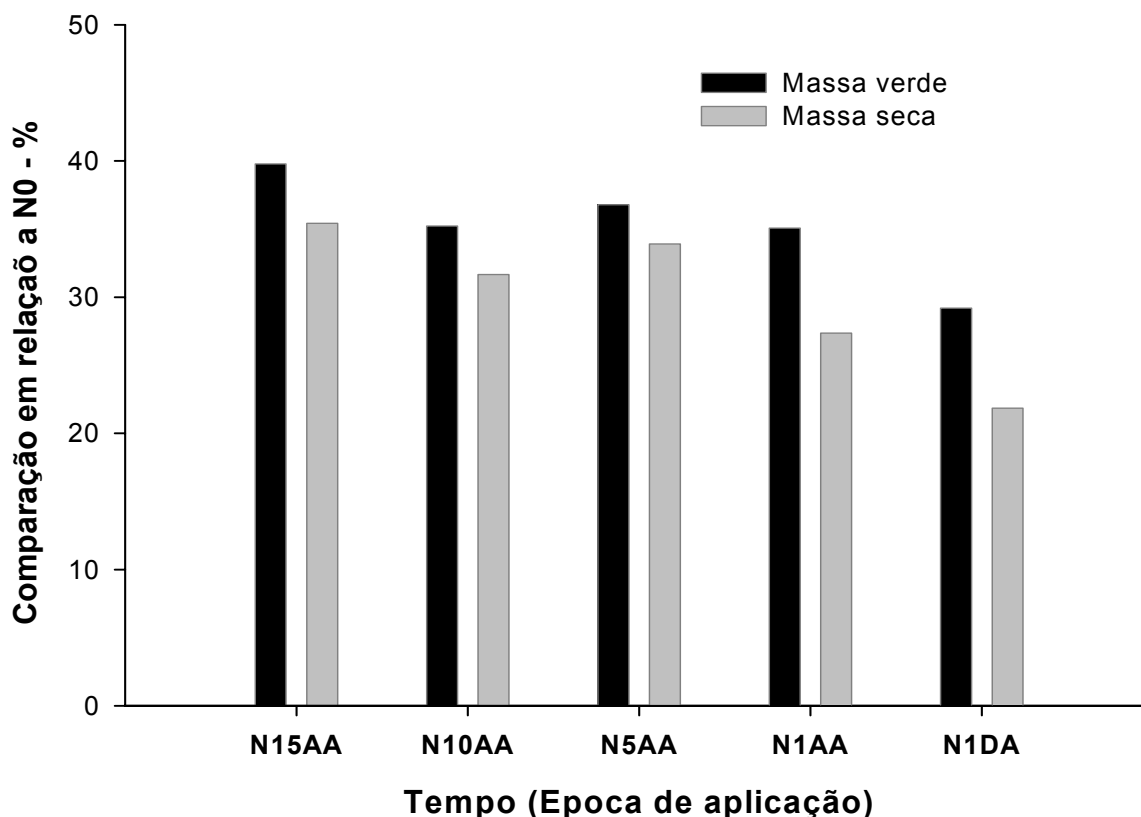


Figura 3. Produção relativa de matéria verde e seca da parte aérea do arroz irrigado, com a adubação nitrogenada de cobertura aplicada em diferentes épocas em relação ao alagamento do solo. **N0**= Testemunha; **N15AA** = nitrogênio aplicado quinze dias antes do alagamento; **N10AA** = nitrogênio aplicado dez dias antes do alagamento; **N5AA** = nitrogênio aplicado cinco dias antes do alagamento; **N1AA** = nitrogênio aplicado um dia antes do alagamento; **N1DA** = nitrogênio aplicado um dia após do alagamento.

Médias de tratamentos não diferem pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade de erro

A maior quantidade de N absorvido no procedimento de aplicar uréia antes do alagamento, exceto no tratamento N1AA, possivelmente esteja relacionada com melhor aproveitamento do N aplicado. A uréia aplicada em solo seco é hidrolizada a amônio, ficando este provavelmente mais ligado aos sítios de troca dos colóides do solo e menos sujeitos as perdas (Humphereys et al., 1987b), o qual pode sofrer nitrificação a nitrato, cuja forma de N também pode ser utilizada pelas plantas. Caso o N seja utilizado pelas plantas antes do alagamento, haverá pouco nitrato para ser reduzido e perdido por desnitrificação. O tratamento com aplicação da uréia 1 dia antes do alagamento não promoveu o efeito esperado da incorporação do N em profundidade através da água proporcionando menores perdas e maior eficiência da

aplicação. Já, quando a uréia é aplicada diretamente na água ela estaria mais sujeita as perdas por volatilização de amônia e denitrificação (Vlek et al., 1980; Simpson et al., 1984; Humphereys et al., 1987b e Katyal & Gadalla, 1990), conforme abordado anteriormente.

Deambrossi & Méndez (1994) também encontraram menor quantidade de N absorvido nos tratamentos em que a uréia foi aplicada na água, comparado aos tratamentos com aplicação em solo seco. Entretanto, os resultados não concordam com o obtido por Heenam & Bacon (1989), os quais registraram um maior consumo de N aplicando a uréia um dia antes do alagamento.

Tabela 7. Teor e quantidade acumulada de nitrogênio na parte área do arroz irrigado, em função de diferentes épocas de aplicação de nitrogênio em relação ao início do alagamento do solo, aos 20 dias após o início do alagamento do solo.

Tratamentos	N no tecido	N acumulado
	.....g kg ⁻¹.....	.....kg ha ⁻¹
N15AA	30,8ab	103,7a
N10AA	28,3b	92,4ab
N5AA	32,0a	106,0a
N1AA	24,4c	73,6cb
N1DA	23,3c	64,5c
N0	17,0d	36,6d

N15AA = nitrogênio aplicado quinze dias antes do alagamento; **N10AA** = nitrogênio aplicado dez dias antes do alagamento; **N5AA** = nitrogênio aplicado cinco dias antes do alagamento; **N1AA** = nitrogênio aplicado um dias antes do alagamento; **N1DA** = nitrogênio aplicado um dia após do alagamento; **N0** = testemunha.

Tratamentos com médias seguidas por letras distintas na coluna diferem pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade de erro.

Na tabela 8 é observada a eficiência agrônômica e a recuperação do N aplicado, sendo que a primeira não foi significativamente diferente entre os tratamentos, seguindo comportamento encontrado para as produções de matéria verde e seca, e a segunda apresentou a mesma tendência para o teor de N ou N

acumulado. A eficiência de recuperação média do N aplicado antes do alagamento foi de 57% e de 28% para o N aplicado após o alagamento, o que indica perdas de 43% e 72% do nitrogênio do sistema solo-água, seja na forma volatilizada ou denitrificada. Este valor é similar ao relatado por De Datta (1981) que estabeleceu que a recuperação de N aplicado raramente excede 30 a 40% ou segundo Vlek & Byrnes (1986) para os quais a recuperação de N é variável por lavoura entre 20 e 40% do N aplicado. As eficiências de recuperação relatadas são variáveis, estando relacionado a diferenças nas práticas culturais, doses e fontes de N, manejo de água, tipo de solo e condições meteorológicas dos ambientes considerados, entre outros fatores.

Tabela 8. Efeito das épocas de aplicação de nitrogênio em relação ao início do alagamento sobre a eficiência agrônômica e a recuperação aparente do N pela cultura de arroz irrigado.

Tratamentos	Eficiência agrônômica	Recuperação Aparente
	.....kg MS kg N ⁻¹%.....
N15AA	12,2a	67,09a
N10AA	11,2a	55,82ab
N5AA	11,8a	69,46a
N1AA	8,7a	36,98cb
N1DA	6,2a	27,92c

N15AA = nitrogênio aplicado quinze dias antes do alagamento; **N10AA** = nitrogênio aplicado dez dias antes do alagamento; **N5AA** = nitrogênio aplicado cinco dias antes do alagamento; **N1AA** = nitrogênio aplicado um dia antes do alagamento; **N1DA** = nitrogênio aplicado um dia após do alagamento.

Tratamentos com médias seguidas por letras distintas na coluna diferem pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade de erro.

Constata-se que aplicando uréia antes do alagamento do arroz há uma tendência de um melhor aproveitamento do N pelas plantas. Estes resultados esta de acordo com os obtido por Humphreys et al. (1987a) e Heenan & Bacon (1989) que também encontraram tendência de melhor aproveitamento de N pelas plantas, com a aplicação da uréia antes do alagamento.

4.3. Época de aplicação de nitrogênio em função da época de início do alagamento – experimentos a campo

4.3.1 Experimento 1.

Foram observadas diferenças significativas para quantidade acumulada de N na parte aérea do arroz irrigado em função da aplicação de uréia para o arroz irrigado, cujos parâmetros apresentaram comportamento diferente entre os tratamentos, não assim para o teor de N no tecido que não apresentou diferença estatística significativa, menos para a testemunha (Tabela 9). A aplicação de uréia aos quatro dias (N4AA) e um dia (N1AA) antes do alagamento foram os tratamentos que apresentaram o melhor comportamento em relação aos demais, evidenciando que a aplicação do fertilizante nitrogenado pode ser mais eficiente quando realizada antes da entrada da água na lavoura. Para esses tratamentos, não houve diferença significativa quando comparados com a aplicação sete dias antes ou um dia depois do alagamento, exceto para o N acumulado no N2DA, embora estes últimos também não se diferenciaram estatisticamente da testemunha sem aplicação de N. No tratamento N0, os valores foram significativamente inferiores aos demais tratamentos para os dois parâmetros estudados, o qual demonstra resposta das plantas ao N aplicado.

Maiores valores de N absorvido foram associados ao N aplicado antecedendo a entrada de água na lavoura, justificando a expectativa de maior disponibilidade de nitrogênio às plantas para uréia aplicada em condições de solo seco antecedendo ao momento do alagamento. Trabalho similar e reportado por Ricecheck, (2002) conclui que o sistema de manejo de N no solo seco proporciona maior disponibilidade e aproveitamento do N devido à incorporação deste pela água de irrigação e diminuição das perdas.

Tabela 9. Teor e quantidades acumulada de nitrogênio na parte área do arroz irrigado, em função de diferentes épocas de aplicação de nitrogênio em relação ao início do alagamento do solo, aos 20 dias após o início do alagamento do solo.

Tratamentos	N no tecido	N acumulado
	.....g kg ⁻¹ .....	.....kg ha ⁻¹
N7AA	16,5ab	56,6ab
N4AA	18,4a	63,7a
N1AA	18,6a	61,8a
N1DA	15,9ab	44,0ab
N2DA	15,3ab	38,7b
N0	14,8b	38,0b

N7AA = nitrogênio aplicado sete dias antes do alagamento; **N4AA** = nitrogênio aplicado quatro dias antes do alagamento; **N1AA** = nitrogênio aplicado um dia antes do alagamento; **N1DA** = nitrogênio aplicado um dias após do alagamento; **N2DA** = nitrogênio aplicado dois dias após do alagamento; **N0** = testemunha.

Tratamentos com médias seguidas por letras distintas na coluna diferem pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade de erro.

Na figura 4 observa-se que as produções de matéria verde e seca da cultura do arroz irrigado para as aplicações de N antes do alagamento (N7A, N4A e N1A), comparado com a testemunha sem N (N0), foram, respectivamente, de 28 a 30% e de 15 a 25% superiores. Em contrapartida, as aplicações aos 1 e 2 dias depois do alagamento (N1A e N2DA) para o parâmetro de matéria seca apresentaram valores similares a testemunha, sendo menores que as aplicações anteriores ao alagamento, sugerindo baixa eficiência da adubação nitrogenada nestas condições. Humphereys et al. (1987a) também encontrou uma maior produção de matéria seca nos tratamentos em que a uréia foi aplicada antes do alagamento, em relação aos tratamentos em que a uréia foi aplicada na água.

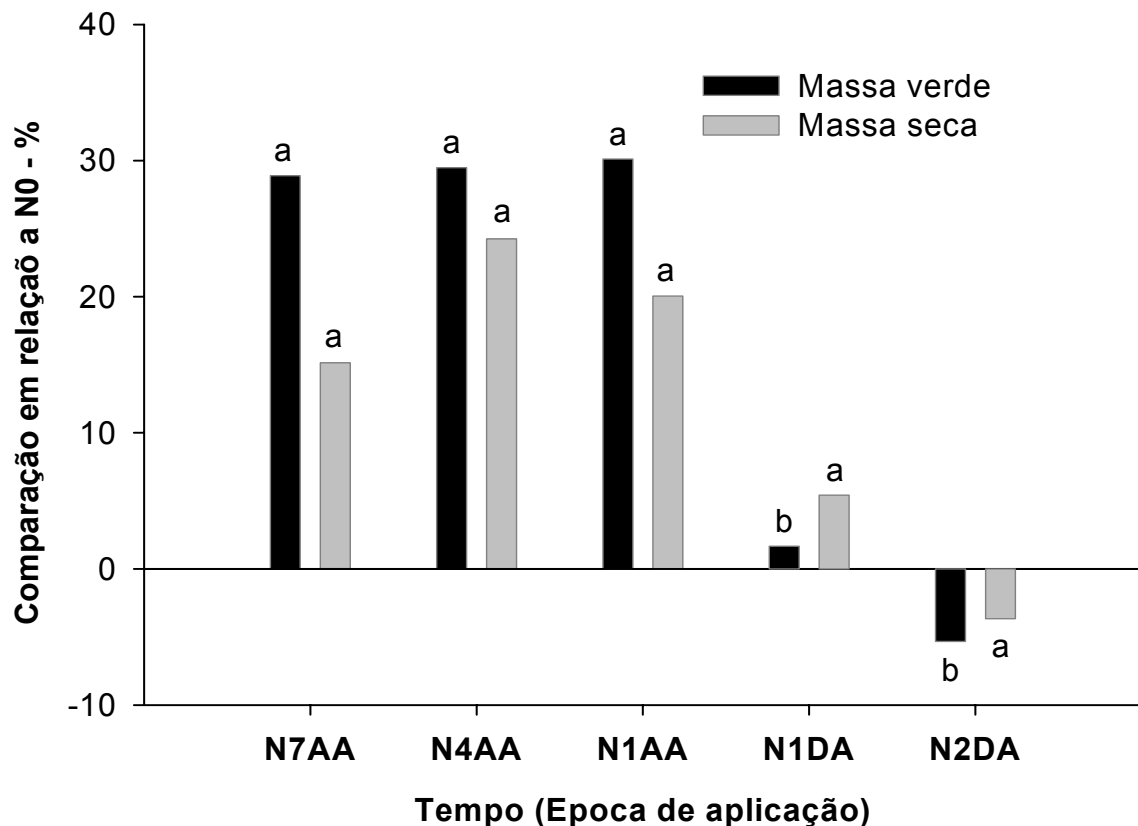


Figura 4. Produção relativa de matéria verde e seca da parte aérea do arroz irrigado, com a adubação nitrogenada de cobertura aplicada em diferentes épocas em relação ao alagamento do solo. **N7AA** = nitrogênio aplicado sete dias antes do alagamento; **N4AA** = nitrogênio aplicado quatro dias antes do alagamento; **N1AA** = nitrogênio aplicado um dia antes do alagamento; **N1DA** = nitrogênio aplicado um dias após do alagamento; **N2DA** = nitrogênio aplicado dois dias após do alagamento.

Tratamentos com médias seguidas por letras distintas no histograma diferem pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade de erro.

A eficiência agrônômica e recuperação do N aplicado, expressas na tabela 10, revelam que os tratamentos com aplicação de uréia antes do alagamento proporcionaram maior eficiência de uso do N que a aplicação de uréia depois da lavoura ser inundada. Resultados similares também foram reportados por Larroza, (2000), avaliando modalidades de aplicação de N, onde a uréia aplicada em solo drenado, no início do perfilhamento seguida de irrigação definitiva ou banho proporcionaram maior acúmulo de N quando comparado com a aplicação realizada em lâmina de água, ampliando-se esta diferença à medida que se eleva a quantidade aplicada. Da mesma forma, Humphereys et al (1987a) e Heenan &

Bacon (1989) na Austrália também encontraram maior eficiência com a aplicação da uréia antes do alagamento.

Tabela 10. Efeito da época de aplicação de nitrogênio em relação ao início do alagamento sobre a eficiência agrônômica e a recuperação aparente do N pela cultura de arroz irrigado.

Tratamentos	Eficiência agrônômica	Recuperação aparente
	.....kg MS kg N ⁻¹%.....
N7AA	18,3a	41,4ab
N4AA	19,6a	57,1a
N1AA	15,7a	53,0ab
N1DA	3,9a	13,3ab
N2DA	-1,3a	1,5b

N7AA = nitrogênio aplicado sete dias antes do alagamento; **N4AA** = nitrogênio aplicado quatro dias antes do alagamento; **N1AA** = nitrogênio aplicado um dia antes do alagamento; **N1DA** = nitrogênio aplicado um dia após o alagamento; **N2DA** = nitrogênio aplicado dois dias após o alagamento.

Tratamentos com médias seguidas por letras distintas na coluna diferem pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade de erro.

A eficiência de recuperação de N média foi de 50% para a uréia aplicada antes do alagamento e de 7,4% para a uréia aplicada depois do alagamento. Valores similares foram obtidos por Larroza, (2000) em Santa Maria RS, indicando 49% de recuperação quando a uréia foi aplicada em três modalidades (uréia+banho, uréia+alagamento, alagamento+uréia). Também Heenan & Bacon (1989) obtiveram, na maturação, 49% de recuperação do N aplicado. Fageria et al (1999) determinaram uma eficiência de recuperação nos grãos de 39%. Não foram encontrados na bibliografia dados sobre eficiência de recuperação na fase de perfilhamento. A determinação de recuperação de N nos grãos, possivelmente, é menor porque as estimativas são feitas no final do ciclo da cultura e, portanto, com maiores possibilidades de perdas de N.

Apesar dos efeitos provocados sobre a produção de matéria verde e seca da parte aérea das plantas e sobre a eficiência de recuperação de N, o rendimento de grãos não foi influenciado pela época de aplicação do fertilizante nitrogenado

(Figura 5). Deve ser considerado que houve uma segunda aplicação de N, em todos os tratamentos, após as avaliações, que poderiam ter uniformizado as diferenças entre as épocas de N. Entretanto, não houve diferença significativa no rendimento de grãos inclusive para a testemunha, o que significa que disponibilidade de N no solo após o alagamento foi suficiente para as produtividades obtidas. Nestas condições, não há como relacionar o efeito da época de aplicação do fertilizante nitrogenado sobre a produtividade da cultura. Resultados similares foram encontrados por Marzari et al. (2005) estudando a modalidades de aplicação da uréia no rendimento de grãos. Machado & Dias (1985), avaliando a produtividade do arroz irrigado cv Bluebelle em experimento com cinco anos de duração, evidenciou ausência de resposta à aplicação de diferentes doses de N. Os autores atribuem a ausência de respostas e as variações de produtividade entre os anos ao fator clima, principalmente temperatura e radiação solar. Há vários experimentos em que o arroz responde à adubação nitrogenada e outros que mostram ausência ou somente pequena resposta do arroz, indicando que outros fatores afetam sobremaneira a resposta da cultura à adubação nitrogenada, especialmente relacionados ao potencial de mineralização de N do solo e as condições climáticas durante o cultivo, e não somente a dose ou época de aplicação do N (Scivittaro & Machado, 2004; Rhoden, 2005). Em futuros experimentos sugere-se que a segunda aplicação de N na cultura seja suprimida a fim de que se possa avaliar com mais precisão o efeito das épocas de aplicação da uréia no rendimento grãos.

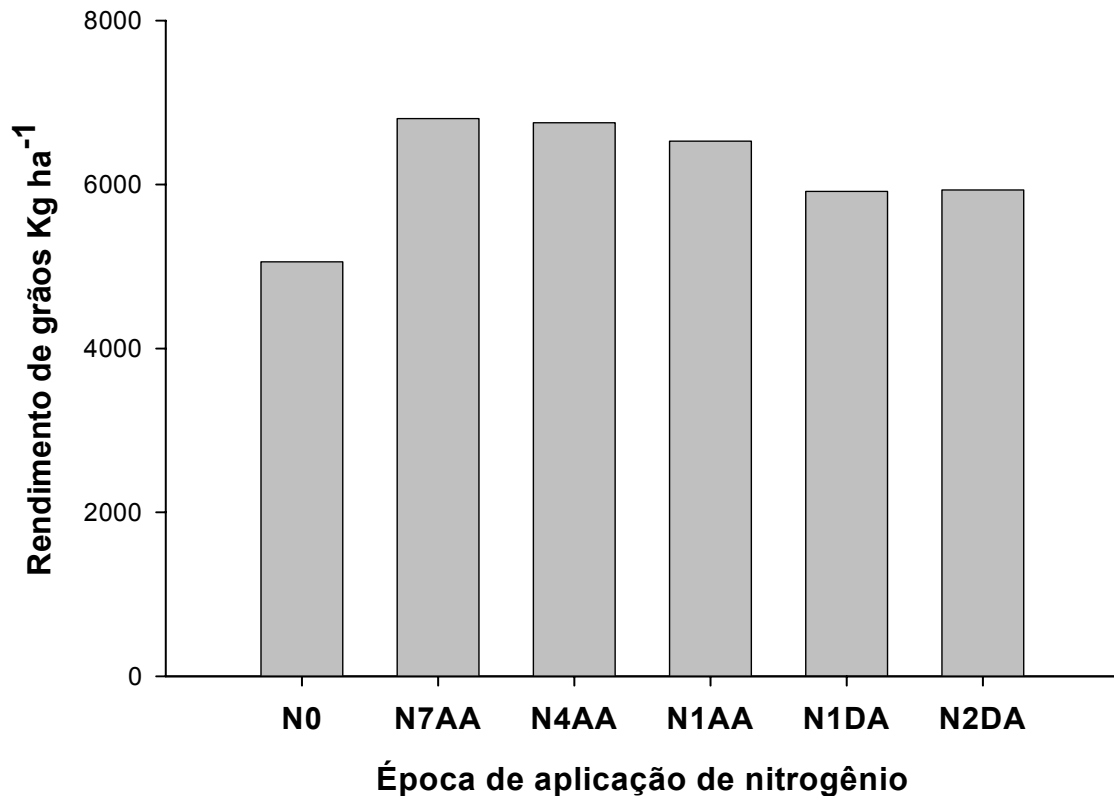


Figura 5. Produtividade de grãos de arroz irrigado com a aplicação da adubação nitrogenada de cobertura em diferentes épocas em relação ao alagamento do solo. **N0**= testemunha; **N7AA** = nitrogênio aplicado sete dias antes do alagamento; **N4AA** = nitrogênio aplicado quatro dias antes do alagamento; **N1AA** = nitrogênio aplicado um dia antes do alagamento; **N1DA** = nitrogênio aplicado um dias após do alagamento; **N2DA** = nitrogênio aplicado dois dias após do alagamento.

Médias de tratamentos não diferem pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade de erro.

4.3.2 Experimento 2.

Os teores e as quantidades acumuladas de nitrogênio na parte área do arroz irrigado, em função de diferentes épocas de aplicação de nitrogênio em relação ao início do alagamento do solo foram significativamente diferentes entre tratamentos (Tabela 11). Entretanto, o tratamento com os maiores valores (N3AA) não foi diferente da testemunha sem aplicação de N. De qualquer modo, os menores valores foram obtidos com a uréia aplicada depois do alagamento, sugerindo que este modo de aplicação favorece potenciais perdas por volatilização de $N-NH_3$, como mostradas na Tabela 1, além de uma eventual perda por desnitrificação a partir da redução do nitrato gerado em zonas oxidadas. Cabe salientar que as perdas potenciais de N, bem como o N no tecido e o acumulados pelas plantas, podem ser afetadas pelas condições climáticas (temperatura, umidade relativa do ar e umidade do solo) e fatores genéticos, os quais podem determinar diferenças no tempo ótimo entre a aplicação de N e o início da irrigação para a maior eficiência do fertilizante nitrogenado aplicado.

A produção relativa à testemunha sem aplicação de N de matéria verde e seca das plantas de arroz em função da adubação nitrogenada de cobertura aplicada em diferentes épocas em relação à entrada de água na lavoura também foi significativamente diferente entre os tratamentos (Figura 6). As aplicações de N aos 10 dias antes e 3 dias depois do alagamento do solo proporcionaram uma produção de matéria verde e seca, em valores absolutos, de 13 a 1,8% e de 13 a 10% inferiores, respectivamente, ao produzido pela testemunha sem N. A aplicação de N no dia do alagamento foi sobre solo já saturado (tendo em vista que ocorreu uma chuva forte na noite anterior antecedendo a aplicação de N), tendo comportamento semelhante ao tratamento com aplicação 6 dias antes da irrigação. Já para a uréia aplicada três dias antes da irrigação, os dois parâmetro indicaram 25 e 19% superiores em relação a testemunha, sugerindo maior eficiência da adubação nitrogenada de cobertura realizada nestas condições de manejo.

Tabela 11. Teores e quantidades acumulada de nitrogênio na parte aérea do arroz irrigado, em função de diferentes épocas de aplicação de nitrogênio em relação ao início do alagamento do solo.

Tratamentos	N no tecido	N acumulado
	.....g kg ⁻¹.....	.....kg ha ⁻¹
N10AA	15,8ab	65,3ab
N6AA	17,1ab	75,5ab
N3AA	18,6a	91,7a
N0D	15,5ab	64,8ab
N3DA	14,9b	52,3b
N0	17,8ab	71,0ab

N10AA = nitrogênio aplicado dez dias antes do alagamento; **N6AA** = nitrogênio aplicado seis dias antes do alagamento; **N3AA** = nitrogênio aplicado três dias antes do alagamento; **N0D** = nitrogênio aplicado no dia do alagamento; **N3DA** = nitrogênio aplicado três dias após do alagamento; **N0** = testemunha.

Tratamentos com médias seguidas por letras distintas na coluna diferem pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade de erro.

De acordo a Tabela 12, embora sem diferença estatística, a uréia aplicada três dias antes da irrigação (N3AA) constituiu a época de aplicação em cobertura com maiores valores de eficiência agrônômica, cujos valores para os demais tratamentos diminuíram tanto para os de maior tempo anteriores ao alagamento (N10AA e N6AA) quanto para a uréia aplicada no dia (N0) ou três dias depois (N3DA). Da mesma forma, o maior valor absoluto de eficiência de recuperação de N (46,0%) foi para a uréia aplicada três dias antes da irrigação da lavoura. O restante do nitrogênio aplicado não foi aproveitado pela plantas, sendo perdido do sistema solo, seja via os processos de volatilização, denitrificação ou outras formas de perdas possíveis. Resultados de outros experimentos que sustentam maior eficiência de recuperação de N quando a uréia é aplicada antes da irrigação foram citados no experimento 1.

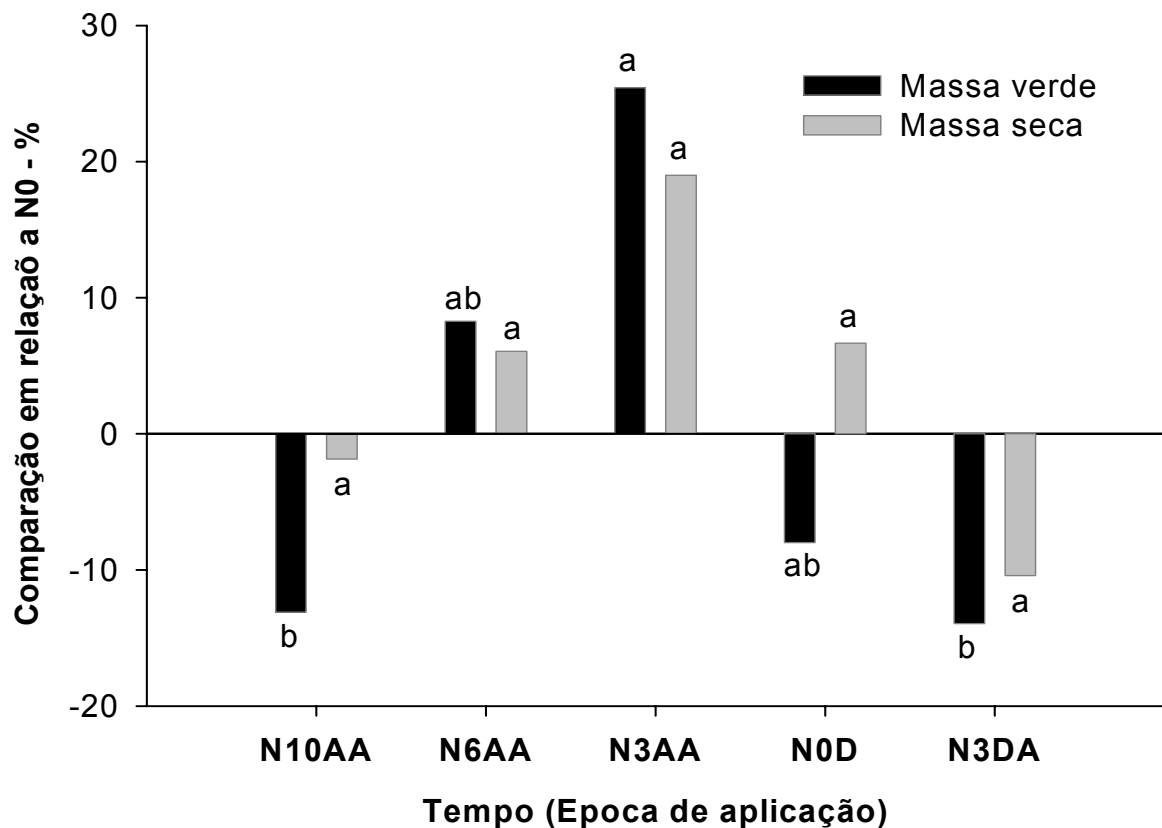


Figura 6. Produção relativa de matéria verde e seca da parte aérea do arroz irrigado, com a adubação nitrogenada de cobertura aplicada em diferentes épocas em relação ao alagamento do solo. **N10AA** = nitrogênio aplicado dez dias antes do alagamento; **N6AA** = nitrogênio aplicado seis dias antes do alagamento; **N3AA** = nitrogênio aplicado três dias antes do alagamento; **N0D** = nitrogênio aplicado no dia do alagamento; **N3DA** = nitrogênio aplicado três dias após do alagamento.

Tratamentos com médias seguidas por letras distintas no histograma diferem pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade de erro.

Um aspecto importante a ser considerado neste experimento, que difere do experimento 1, é que a aplicação de uréia antes do alagamento também apresentou baixa eficiência, possivelmente devido as condições favoráveis às perdas e/ou menor absorção pelas plantas. Isto significa dizer que pode haver uma maior eficiência da aplicação de uréia antes da irrigação e que um conjunto de condições ambientais pode determinar que não se deva demorar mais do que três dias com a entrada da água na lavoura para um melhor aproveitamento.

Tabela 12. Efeito das épocas de aplicação de nitrogênio em relação ao início do alagamento sobre a eficiência agrônômica e a recuperação aparente do N na cultura de arroz irrigado.

Tratamentos	Eficiência agrônômica.....kg MS kg N ⁻¹	Recuperação Aparente%.....
N10AA	5,23a	-12,64ab
N6AA	10,35a	9,98ab
N3AA	23,53a	46,03a
N0D	6,54a	-13,64ab
N3DA	-9,15a	-41,51b

N10AA = nitrogênio aplicado dez dias antes do alagamento; **N6AA** = nitrogênio aplicado seis dias antes do alagamento; **N3AA** = nitrogênio aplicado três dias antes do alagamento; **N0D** = nitrogênio aplicado no dia do alagamento; **N3DA** = nitrogênio aplicado três dias após do alagamento.

Tratamentos com médias seguidas por letras distintas na coluna diferem pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade de erro.

Diferenças na eficiência de uso e manejo da primeira adubação nitrogenada de cobertura não se refletiram em efeitos significativos sobre o rendimento de grãos de arroz irrigado, inclusive para a testemunha sem N (Figura 7). Parte deste comportamento pode ser explicado pelas mesmas razões do experimento 1 (uma segunda aplicação de N, a qual pode uniformizar eventuais diferenças resultantes da primeira aplicação), além de eventuais outros fatores limitantes a produtividade ou favoráveis a disponibilidade de N que determinaram a ausência de resposta a aplicação de N.

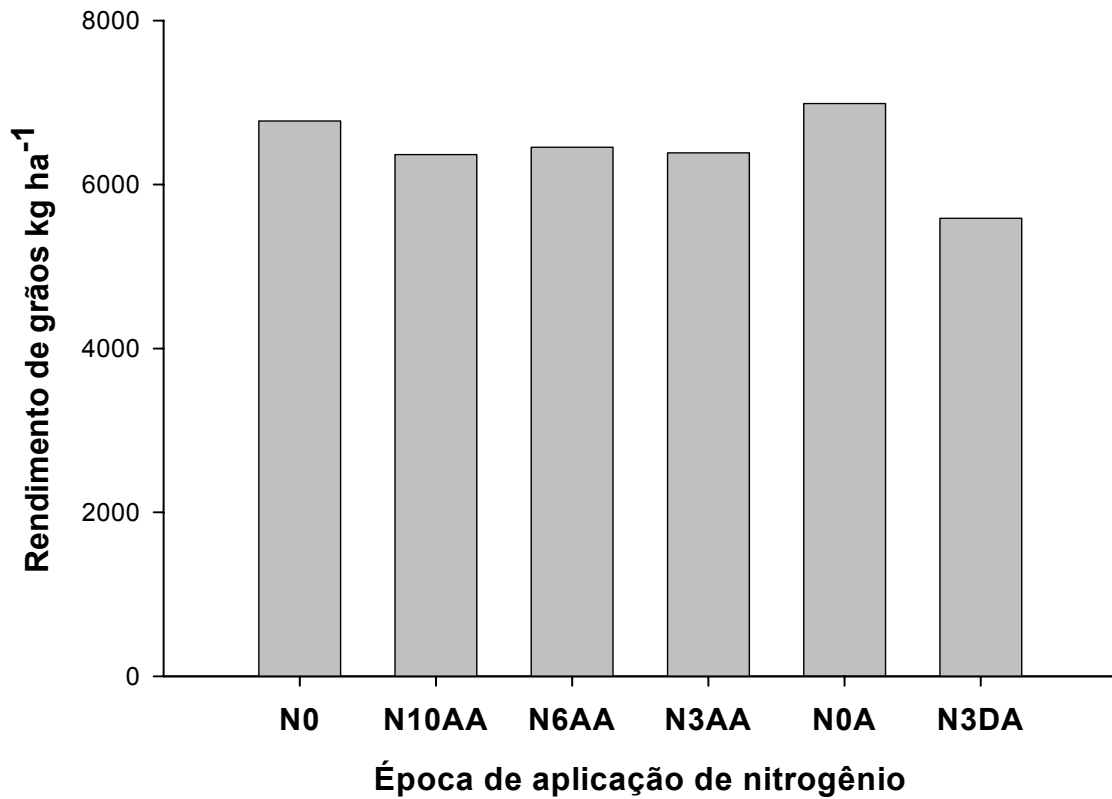


Figura 7. Produtividade de grãos de arroz irrigado com a aplicação da adubação nitrogenada de cobertura em diferentes épocas em relação ao alagamento do solo. **N0** = testemunha **N10AA** = nitrogênio aplicado dez dias antes do alagamento; **N6AA** = nitrogênio aplicado seis dias antes do alagamento; **N3AA** = nitrogênio aplicado três dias antes do alagamento; **N0D** = nitrogênio aplicado no dia do alagamento; **N3DA** = nitrogênio aplicado três dias após do alagamento.

Médias de tratamentos não diferem pelo teste de Tukey em nível de 5% de probabilidade de erro.

5. CONCLUSÕES

1. A aplicação de uréia sobre a lâmina de água proporcionou equivalente perda de N por volatilização de amônia acumulada ao final de 264 horas de avaliação comparada com a aplicação em solo úmido ou saturado.
2. Uréia aplicada antes da inundação da lavoura do arroz irrigado proporcionou maior eficiência do N aplicado, embora não afetou o rendimento de grãos.
3. O tempo ideal entre a aplicação da uréia e o início da irrigação para uma maior eficiência agrônômica e de recuperação do nitrogênio aplicado varia com as condições ambientais no período correspondente.

6. REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADYA, T. K., PATINAIK, P., RAO, V. R. et al. Nitrification of ammonium in different components of a flooded rice soil system. **Biol. Fertil. Soils**, v. 23, n. 3, p. 321-326, 1996.

ARTH, I., FREENZEL, P., CONRAD, R. Denitrification coupled to nitrification in the rhizosphere of rice. **Soil Biol. Biochem**, v. 30, n. 4, p. 509-515, 1998.

AULAKH, M. S., DORAN, J. W., MOISIER, A. R. Soil denitrification - Significance, measurement, and effects of management. **Advances in Soil Science**, v. 18, p. 1-57, 1992.

AZAMBUJA, I. H. V., VERNETTI JÚNIOR, F. J., MAGALHÃES JÚNIOR, A. M. Aspectos sócio-econômicos da produção do arroz. In: GOMES, A. S.; MAGALHÃES JÚNIOR, A. M. **Arroz irrigado no Sul do Brasil**. Brasília: Embrapa. Informação Tecnológica, 2004. 899 p.

BACHA, R. E., et al. Avaliação de recomendações de adubação em arroz irrigado para Santa Catarina – 1990/91. In: REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 19., 1991, Balneário Camboriú. **Anais...** Florianópolis: EMPASC, 1991. p.140-142.

BARBER, S. A. **Soil nutrient bioavailability**: A mechanistic approach. John Willey & Sons, New York, 1984. 396p.

BARLAAN, E. A., SATO, H., ICHI, M. Nitrate reductase activities in rice genotypes in irrigated lowlands. **Crop science**, v 38, n. 3, p. 728-734, 1998.

BARTLETT, R.J., JAMES, B.R. Redox chemistry of soil. **Advances in Agronomy**, v.50, p. 151-208, 1993.

BELTRAME, L. F. S., IOCHPE, B., DA ROSA, S.M. et al. Lixiviação de íons em solo cultivado com arroz irrigado por inundação. **Revista Bras. Ci. Solo**, v. 16, p. 203-208, 1992.

BLACK, A.S.; SHERLOCK, R.R., SMITH, N.P. et al. Effect of form of nitrogen, season, and urea applications rate on ammonia volatilization from pastures. **New Zealand Jour. of Agri. Res.**, v.28, p.469-474, 1985.

BLACK, A.S.; SHERLOCK, R.R., SMITH, N.P. et al. Effect timing of simulated rainfall on ammonia volatilization from urea applied to soil to soil of varying moisture content. **Jour. of Soil Sc.**, v.38, p.679-688, 1987.

BOUWMEESTER, R. J. B., VLEK, P. L. G., STUMPE, J. M. Effects of environmental factors on ammonia volatilization from a urea-fertilized soil. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 49, n. 2, p. 376-381, 1985.

BURCH. J., FOX R. H. The effect of temperature and initial soil moisture content on the volatilization of ammonia from surface-applied urea, **Soil Science**, v. 147, n. 5, p. 311-318, 1989.

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

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. 10. ed. Porto Alegre: **SBCS-Núcleo Regional Sul**, 2004. 400p.

DE DATTA, S. K. **Principles and practices of rice production**. New York: John Wiley & Sons, 1995. 618p.

DEAMBROSI, E., MENDEZ, R. AVILA, S. Eficiencia de aplicación de nitrógeno en cobertura al macollaje con respecto al riego. In: INIA Uruguay, Arroz, Resultados Experimentales 1993-1994, Tomo I Treinta y Tres : **INIA**, 1994a. Cap. 2, p. 2-15/2-20. (Serie actividades de difusión; v. 25).

DIEST, V. A. Volatilización del amoníaco en los suelos anegados, y sus repercusiones en el rendimiento de arroz. Noticiarios de la Comisión Internacional del arroz, **FAO**, v. 37, p. 1-6, 1988.

EMBRAPA. Serviço Nacional de Levantamento e Conservação de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro: EMBRAPA, 1999. 412p.

ERNST, J. W. MASSEY, H.F. The effect of several factors on volatilizations of ammonia formed from urea in the soil. **Soil Sci. Soc. Amer. Proc.**, v.24. p.87 – 90, 1960.

FAGERIA, N. K., STONE, L. F., SANTOS, A. B. Manejo do nitrogênio na cultura do arroz irrigado, Santo Antônio de Goiás, GO, 1999. In: Congresso Brasileiro de arroz irrigado, 1.; Reunião da cultura do arroz irrigado, 23., 1999, Pelotas. **Anais... Pelotas: EMBRAPA Clima temperado**, 1999. p. 359-361.

FENN, L. B. & KISSEL, D. E. Ammonia volatilization from surface-applications of ammonium compounds on calcareous soils: effects of temperature and rate of ammonium nitrogen application. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, vol. 38: 606-610, 1974.

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

FILLERY, I.R.P., SIMPSON, J.R., DE DATTA, S.K. Influence of field environment and fertilizer management on ammonia loss from flooded rice. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v.48, p.914-920, 1984.

FRENEY, J.R. et al. Estimating ammonia volatilization from flooded rice fields by simplified methods. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 49, n. 4, p. 1049-1054, 1985.

GOMES, A. da S., VAHL, L.C., PATELLA, J.F. **Resposta da cultura do arroz irrigado à adubação nitrogenada no RS**. Pelotas: UEPAE, 1979. 16p. (Mimeografado).

HARGROVE, W.I., Soil environmental and management factors influencing ammonia volatilization under field conditions, In: BOCK, B.R.; KISSEL, D.E. (Ed.) **Ammonia volatilization from urea fertilizers**. Alabama: NFDC, TVA, 1988. cap. 2 p.17-36.

HEENAN, D. P., BACON, P. E. Effects of timing and placement of urea on aerial-sown semi-dwarf rice in South-east Australia. **Aust. J. Agric. Res.**, v. 40, p. 509-516, 1989.

HUMPHERYS, E., MUIRHEAD, W. A., MELHUIISH, F. M. et al Effects of time of urea application on combine-sown Calrose rice in South-east Australia. I. Crop response and N uptake. **Aust. J. Agric. Res.**, v. 38, n. 1, p. 101-112, 1987a.

HUMPHERYS, E., MUIRHEAD, W. A., MELHUIISH, F. M. et al Effects of time of urea application on combine-sown Calrose rice in South-east Australia. II. Mineral nitrogen transformations in the soil-waters system. **Aust. J. Agric. Res.**, v. 38, n. 1, p. 113-127, 1987b.

JAYAWERA, G. R., MIKKELSEN, D. S. Assessment of ammonia volatilizations from flooded soil systems. **Advances in Agronomy**, v. 45, p. 303-356, 1991.

KATYAL, J. C., CARTER, M. F., VLEK, P. L. G. Nitrifications activity in submerged soils and its relations to denitrification loss. **Biology and fertility of Soils**, v. 7, n. 1, p. 16-22, 1988.

KATYAL, J. C., GADALLA, A. M. Fate of urea-N in floodwater. I. Relation with total N loss. **Plant and Soil**, v. 121, n. 1, p. 21-30, 1990.

KEERTHISINGHE, G., MENGEL, K., DE DATTA, S. K. The release of non exchangeable ammonium (N^{15} labeled) in wetland rice soils. **Soi Sci. Soc. Am. J.**, v. 14, n. 2, p. 291-294, 1984.

KIEHL, J.C. Emprego de sais inorgânicos no controle da volatilização de amônia decorrente da aplicação de uréia no solo. Piracicaba, 1989. 108f. Tese (Livre Docência) - **Escola Superior “Luiz de Queiroz”**, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1989.

KUSSOW, W.R., CORUM, K.R.; DALL’ACQUA. **Interpretação agro-econômica de ensaios de adubação**. Goiânia: EMBRAPA-CNPAP, 1976. 49p. (Boletim Técnico, 4).

LARA CABEZA, W.A.R., et al. Balanço da adubação nitrogenada sólida e fluída de cobertura na cultura de milho, em sistema de plantio direto no triangulo mineiro. **Revista. Bras. Ci. Solo**, v.24, p.363- 476, 2000.

LARA CABEZA, W.A.R., et al. Volatilização de NH_3 na cultura de milho: I. Efeito da irrigação e substituição parcial da uréia por sulfato de amônio. **Revista. Bras. Ci. Solo**, v.21, p.481- 487, 1997a.

LARA CABEZA, W.A.R., et al. Volatilização de NH_3 na cultura de milho: II. Avaliação de fontes sólidas e fluídas em sistema de plantio direto e convencional. **Revista. Bras. Ci. Solo**, v.21, p.489- 496, 1997b.

LARROZA, F.R. Eficiência da aplicação de nitrogênio no perfilhamento do arroz em três manejos de irrigação. 2000. 75f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2000.

LIWANG, M. A., et al. Modeling urea ammonium, and nitrate transport and transformations in flooded soil columns. **Soil Science**, v. 164, n. 62, p. 123- 132, 1999.

LOPES, M. S., et al. Efeito de doses de nitrogênio sobre a competitividade do arroz irrigado com o arroz vermelho. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 1.; REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 22., 1998, Pelotas, **Anais...** Pelotas: Embrapa Clima Temperado, 1999b. p.341-342.

LOPES, S.I.G.; LOPES, M.S.; MACEDO, V.R.M. Curva de resposta à aplicação de nitrogênio para a cultivar IRGA 146 e três linhagens. In: REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 21., 1995, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: IRGA, 1995a. p.167-168.

LOPES, S.I.G. Curva de resposta à aplicação de nitrogênio para o cultivar IRGA 416. In: REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 20., 1993, Pelotas. **Anais...** Pelotas: EMBRAPA-CPACT, 1993a. p.151-152. (EMBRAPA-CPATC. Documentos, 1).

LOPES, S.I.G., et al. Curva de resposta à aplicação de nitrogênio nas cultivares IRGA 146 e Colombiano. In: REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 21., 1995, Porto Alegre. **Anais...** Porto Alegre: IRGA, 1995c. p.161 - 163.

LOPES, S.I.G., et al. Resposta à aplicação de nitrogênio de quatro linhagens e quatro cultivares de arroz irrigado. In: REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 22., 1997, Balneário Camboriú. **Anais...** Itajaí: EPAGRI, 1997. p.167 - 158.

MACHADO, M.O. **Adubação e calagem para a cultura do arroz irrigado, no Rio Grande do Sul.** Pelotas: EMBRAPA-CPATB, 1993. 63p (EMBRAPA-CPATB. Boletim de Pesquisa, 2).

MACHADO, M.O. Caracterização e adubação do solo. In: EMBRAPA-CPATB. **Fundamento para a cultura do arroz irrigado.** Campinas: Fundação Cargill, 1985. p.129-179.

MACHADO, M.O., et al. Resposta de três genótipos de arroz irrigado à adubação nitrogenada, na safra 1998/1999, num planossolo da região Sul do Rio Grande do Sul. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE ARROZ IRRIGADO, 1.; REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 22., 1999, Pelotas. **Anais...** Pelotas: Embrapa clima Temperado, 1999a. p.372-374.

MACHADO, M.O. Resposta do arroz irrigado à adubação e à calagem no Rio Grande do Sul. **Trigo e Soja**, 93; 11-21, 1987.

MACHADO, M.O., DIAS, A.D. Resposta do arroz irrigado (cv Bluebelle) ao nitrogênio, em cinco anos de cultivo. In: REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 14., 1985, Pelotas. **Anais...**Pelotas: EMBRAPA-CPATB, 1985. p.241-249.

MACHADO, M.O., et al. Efeito de doses e épocas de aplicação de nitrogênio em linhagens promissoras de arroz irrigado nas safras 1994/1995 e 1995/1996. In: REUNIÃO DA CULTURA DO ARROZ IRRIGADO, 22., 1997, Balneário Camboriú. **Anais**. Itajaí: EPAGRI, 1997b. p.284-287.

MARZARI, V., et al. Épocas de aplicação do fertilizante nitrogenado no sistema convencional de semeadura de arroz irrigado. **Ciência Rural**, v.35 n.5, 2005.

MELGAR, R.; CAMOZZI, M.E.; FIGUEROA, M.M, **Guía de Fertilizantes, enmiendas y productos nutricionales**. Buenos Aires; INTA, 1999, cap.1, p. 13-25.

MELO, W.J. **Matéria orgânica, nitrogênio e enxofre**: curso de atualização em fertilidade do solo. Jaboticabal: ANDA, 1978. 66p.

MENGEL, K., SHON, H. G., KEERTHISINGHE, G. et al. Ammonium dynamics of puddled soils in relation to growth and yield of lowland rice. In: DE DATTA, S. K., PATRICK, W. H. Jr. **Nitrogen economy of flooded rice soils**. Dordrecht : Martinus Nijhoff Publishers, 1986. 186 p. p. 117-130.

MIELNICZUK. J. Influência do manejo de solo, irrigação e nitrogênio no rendimento do arroz. 1970, 61f.. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Rio Grande do sul, Porto Alegre, 1970.

MIKKELSEN, D. S. Nitrogen budgets in flooded soils used for rice production. **Plant and Soil**, v. 100, n. 1-3, p. 71-97, 1987.

MIKKELSEN, D. S., DE DATTA, S. K., OBCEMEA, W. N. Ammonia volatilization losses from flooded rice soils. **Soil Sci, Soc. Am. J.**, v. 42, n. 5, p. 725-730, 1978.

MORAES, J. F. V., DA SILVA, C. J., CORRÊA, E. Transformação no nitrogênio em dois solos submetidos a inundação. **Pesq. Agropec. Bras. Ser. Agron.**, v. 10, p. 25-30, 1975.

MORAES, J. F. V., FREIRE, C. J. S. Variação do pH, da condutividade elétrica e da disponibilidade dos nutrientes nitrogênio, fósforo, potássio, cálcio e magnésio em quatro solos submetidos a inundação. **Pesq. Agropec. Bras, Ser. Agron.**, v. 9, p. 35-43, 1974.

MORENO, J. A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Secretaria da Agricultura. Divisão de Terras e Colonização, 1961. 42p.

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

PATRICK JR., W.H. Nitrogen transformations in submerged soils. In: **Nitrogen in Agriculture Soils**. Madison: Wisconsin, 1982.

PATRICK, W. H. Jr., MAHAPATRA, I. C. Transformations and availability to rice of nitrogen and phosphorus in waterlogged soils. **Advances in Agronomy**, v. 20, p. 323-359, 1968.

PATRICK, W. H. Jr., MIKKELSEN, D. S. WELLS, B. R. Plant nutrients behavior in flooded soils. In: Fertilizer Technology and use. 3rd, ed. **Am. Soc. of Agr.**, 1985, p. 197-228.

PATRICK, W. H. Jr., REDDY, K. R. Fate of fertilizer nitrogen in a flooded rice soil. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 40, n. 5, p. 678-681, 1976.

RAIJ, B. van, **Fertilidade do solo e adubação**. Piracicaba: Ceres; POTAFOS, 1991. 341p.

RAJARATNAM, J. A. PURUSHOTHAMAN. Studies of nitrogen losses from soils in Malasia. I. Influence of soil Moisture, rates and types of nitrogenous compound on ammonia volatilizations. **Mal. Agric. Res.**, v.2, p.59 – 64, 1973.

RAO, A.C.S., et al. Considerations in estimating nitrogen recovery efficiency by the difference and isotopic dilution methods. **Fertilizer Research**, 33:209-17, 1992.

REDDY, K. R., PATRICK, W. H. Jr., PHILLIPS, R. E. Ammonium diffusion as a factor in nitrogen loss from flooded soils. **Soil Sci. Soc. Ame. J.**, v.40, n.4, p. 528-533, 1976.

REYNOLDS, C. M., WOLF, D. C. Effects of soil moisture and air relative humidity on ammonia volatilization from surfaces-applied urea. **Soil Science**, v. 143, n. 2, p. 144-152, 1987.

RHODEN, A.C. Potencial de mineralização anaeróbia do nitrogênio em solos de várzea do Rio Grande do Sul. 2005. 108f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo). Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

RICECHECK. Recommendations: A guide to objective rice crop management for improving yields, grain quality and profits and for economic and environmental sustainability. **NSW Agriculture and BIRDC**. Rice Research & Development Committee, 20 p. 2002.

RODRIGUES, M.B., KIEL, J.C. Distribuição e nitrificação da amônia proveniente da uréia aplicada ao solo. **Revista Bras. Ci. Solo**, v. 16, p. 403-408, 1992.

RODRIGUEZ, M.B., KIEHL, J.C. Volatilização de amônia após emprego da uréia em diferentes doses em modo de aplicação. **Revista Bras. Ci. Solo**, v.10. p.37 - 43 1986.

SAVANT, N. K., DE DATTA, S. K. Nitrogen transformations in wetland rice soils. **Advances in Agronomy**, v. 35, p. 241-302, 1982.

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

SCIVITTARO, V.B., MACHADO, M.O. **Adubação e calagem para a cultura do arroz irrigado**. In: GOMES, A.S.; MAGALHÃES JR, A.M. (eds). Arroz irrigado no sul do Brasil. Brasília: EMBRAPA Informação Tecnológica, 2004. Cap.9, p.259-303.

SENGIK, E., KIEHL, J.C. Efeito de resíduos orgânicos e do fosfato monocálcico na volatilização de amônia em terra tratada com uréia. **Revista Bras. Ci. Solo.**,v.19. p. 321 – 326, 1995a.

SENGIK, E., KIEHL, J.C. Controle da volatilização de amônia em terra tratada com uréia em turfa pelo emprego de sais orgânico. **Revista Bras. Ci. Solo.**,v.19. p.455 – 461, 1995b.

SIMPSON, J. R., FRENEY, J. R., WETSELAAR, R. et al. Transformations and of urea losses of urea nitrogen after applications to floodes rice. **Aust. J. Agric. Res.**, v. 35, n. 2, p. 189-200, 1984.

SOSBAI, Sociedade Sul-Brasileira de Arroz Irrigado. Arroz Irrigado: Recomendações Técnicas da Pesquisa para o Sul do Brasil. In: Congresso Brasileiro de Arroz Irrigado, 4.; Reunião da Cultura do Arroz Irrigado, 26. Santa Maria, 2005. 159p.

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

SOUSA, R.O.; CAMARGO, F.A.O.; VAHL, L.C. Solos alagados. In: Meurer, E.J. **Fundamentos de química do solo**. Porto Alegre: Gênese, 2004. cap.7, p. 206 - 237.

STEINMETZ, S.; MOTTA, F.S. Comportamento de seis cultivares de arroz submetido a quatro níveis de adubação nitrogenada e sua relação com a radiação solar. In: REUNIÃO GERAL DA CULTURA DO ARROZ, 4., 1974 Pelotas. **Anais...** Pelotas: IRGA/IPEAS, 1974. p.97-105.

STEVENSON, F.J. **Cycles of soil carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients.** Wiley-Interscience, 1986. 380p.

TEDESCO, M.J. ; et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais,** Porto Alegre, Departamento de Solos, UFRGS, 1995. 174p.

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

VAHL, L.C. **Solos e adubação do arroz no Rio Grande do Sul.** Pelotas: UEPAE, 1979. 48 p. (UEPAE. Circular Técnica, 2).

VLEK, P. L. G., CRASWELL, E. T. Ammonia volatilizations from flooded soils. **Fertilizer research**, v. 2, p. 227-245, 1981.

VLEK, P. L. G., STUMPE, J. M. Effects of solution chemistry and environmental conditions on ammonia volatilization losses from aqueous systems. **Soils Sci. Soc. Am. J.**, v. 42, p. 416-421, 1978.

VLEK, P. L. G., STUMPE, J. M., BYRNES, B. H. Urease activity and inhibition in flooded soil systems. **Fertilizer research**, v. 1, p. 191-202, 1980.

VLEK, P. L., BYRNES, B. H. The efficacy and loss of fertilizer N in lowland rice. **Fertilizer research**, v. 9, p. 131- 147, 1986.

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

WAHHAB, A., RANDHAAWA, M.S., ALAM, S.Q. Loss of ammonia from ammonium sulphate under different conditions when applied to soils. **Soil Sci.**, v.87, p.249 – 255, 1957.

WILSON, C. E., WELLS, B. R., NORMAN, R. J. Fertilizer nitrogen uptake by rice from urea-ammonium nitrate solutions vs. granular urea. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, v. 58, n. 6, p. 1825-1828, 1994.

7. ANEXOS

Anexo 1. Valores mensais médios de temperatura e precipitação pluvial

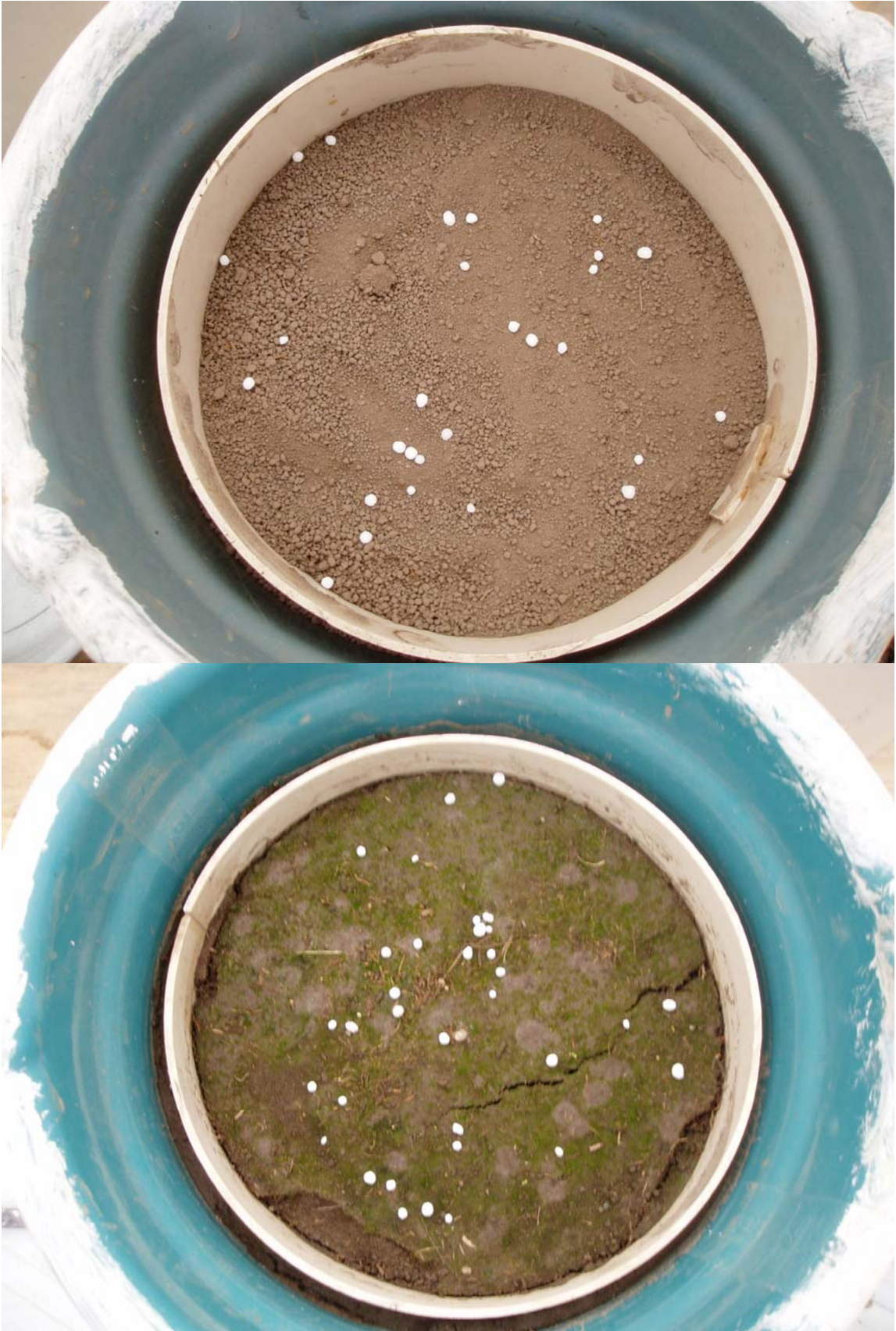
Tabela 13. Valores mensais médios de temperatura e precipitação pluvial durante o desenvolvimento do experimento a campo e em casa-de-vegetação.

Mês/ano	Precipitação pluvial	Temperatura
	mm	°C
Novembro 2004	147,7	21,1
Dezembro 2004	62,2	23,8
Janeiro 2005	49,8	25,0
Fevereiro 2005	59,4	25,1
Março 2005	56,9	23,7
Setembro 2005	212,5	14,8
Outubro 2005	273,2	18,5
Novembro 2005	57,2	22,0
Dezembro 2005	101,9	23,4

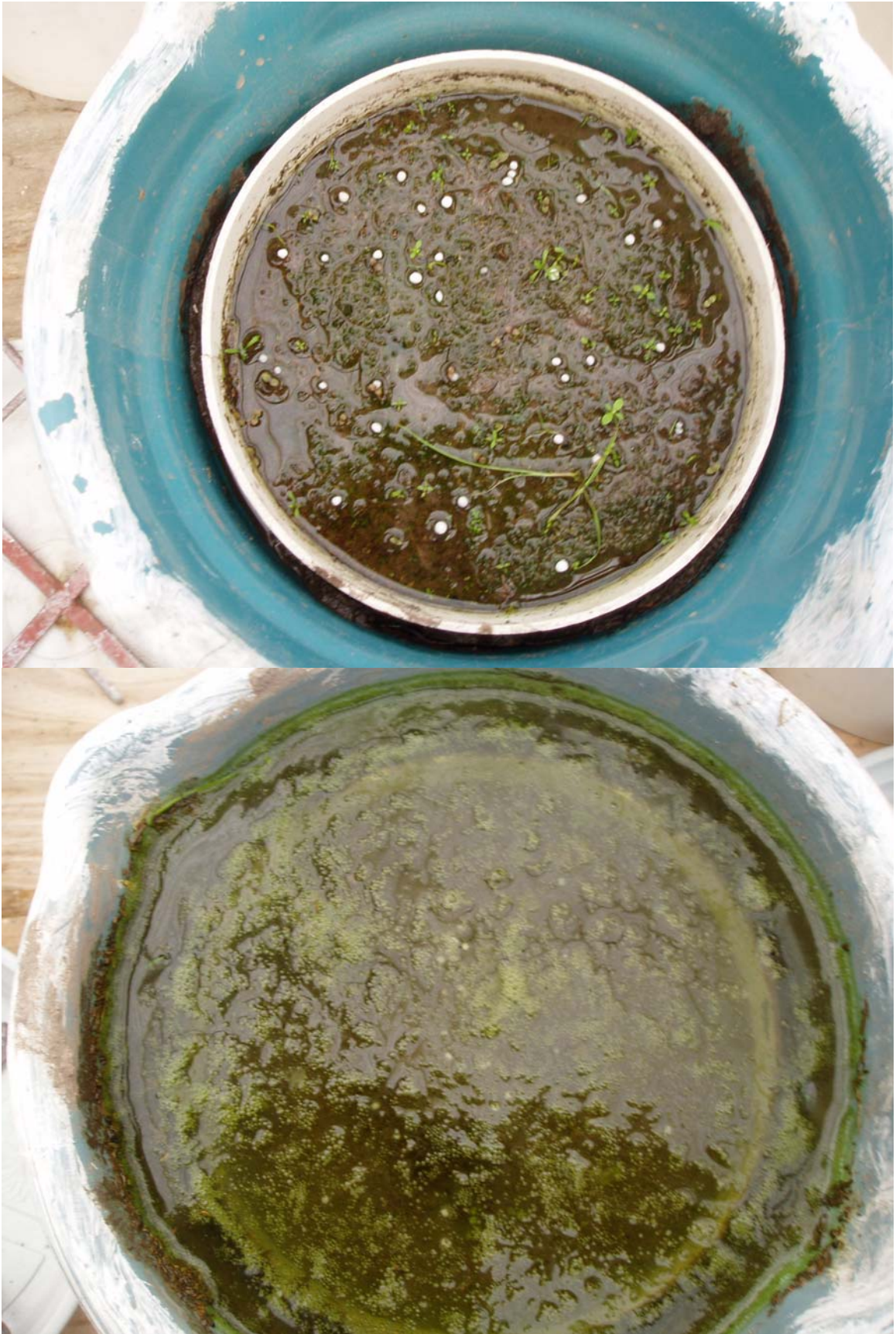
Fonte: Estação Meteorológica da UFSM



Anexo 2. Fotos dos vasos com coletores de amônia em casa-de-vegetação.



Anexo 3. Fotos dos vasos com os tratamentos (USSE) e (USUM).



Anexo 4. Fotos dos vasos com os tratamentos (USSA) e (USLE).



Anexo 5. Fotos dos vasos plântulas em casa-de-vegetação para avaliação do N acumulado.



Anexo 6. Fotos dos experimentos de campo 1 e 2.

Anexo 7. Análises de variâncias para os parâmetros estudados no experimento em casa-de-vegetação.

Tabela 14. Análise da variância para N acumulados na parte área do arroz irrigado em função de diferentes épocas de aplicação de nitrogênio em relação ao início do alagamento do solo.

FV	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	Pr>F	R²	Ȳ	CV%
Tratamentos	5	3770,6	754,13	25,03*	0,0001	0,90	40,89	13,42
Residuo	18	452,01	107,01					
Total	23	4222,61						

Sendo: **F**= fator de variação; **G**=graus de liberdades; **SQ**=soma de quadrados; **QM**=quadrado médio; **F**=valor de F calculado; **Pr>F**=probabilidade de significância; **R²**= coeficiente de determinação; **Ȳ** =média do acumulado; **CV**=coeficiente de variação em percentagem, (*) Significativo ao nível de 5% de probabilidades; **(NS)** não significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Tabela 15. Análise da variância para a eficiência de recuperação de N pela cultura de arroz irrigado em função de diferentes épocas de aplicação de nitrogênio em relação ao início do alagamento do solo.

FV	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	Pr>F	R²	Y	CV%
Tratamentos	5	1431,97	357,99	12,19*	0,0003	0,85	26,48	20,46
Residuo	18	352,44	29,37					
Total	23	1784,41						

Sendo: **F**= fator de variação; **G**=graus de liberdades; **SQ**=soma de quadrados; **QM**=quadrado médio; **F**=valor de F calculado; **Pr>F**=probabilidade de significância; **R²**= coeficiente de determinação; **Ȳ** = média do recuperado; **CV**=coeficiente de variação em percentagem, (*) Significativo ao nível de 5% de probabilidades.

Anexo 8. Análises de variâncias para os parâmetros estudados no experimento 1

Tabela 16. Análise da variância para N acumulados na parte área do arroz irrigado em função de diferentes épocas de aplicação de nitrogênio em relação ao início do alagamento do solo.

FV	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	Pr>F	R ²	Ŷ	CV%
Blocos	3	677,47	225,82	2,24NS	0,12	0,69	50,47	19,89
Tratamentos	5	2714,24	542,84	5,38*	0,005			
Residuo	15	1512,78	100,85					
Total	23	490,50						

Sendo: **F**= fator de variação; **G**=graus de liberdades; **SQ**=soma de quadrados; **QM**=quadrado médio; **F**=valor de F calculado; **Pr>F**=probabilidade de significância; **R²**= coeficiente de determinação; **Ŷ**=média do acumulado; **CV**=coeficiente de variação em percentagem, (*) Significativo ao nível de 5% de probabilidades; **(NS)** não significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Tabela 17. Análise da variância para a eficiência de recuperação de N pela cultura de arroz irrigado em função de diferentes épocas de aplicação de nitrogênio em relação ao início do alagamento do solo.

FV	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	Pr>F	R ²	Y	CV%
Blocos	3	7092,62	2364,20	4,51*	0,02	0,72	33,26	68,82
Tratamentos	4	9715,98	2428,99	4,63*	0,07			
Residuo	12	6289,04	524,06					
Total	19	23097,65						

Sendo: **F**= fator de variação; **G**=graus de liberdades; **SQ**=soma de quadrados; **QM**=quadrado médio; **F**=valor de F calculado; **Pr>F**=probabilidade de significância; **R²**= coeficiente de determinação; **Ŷ**=média do recuperado; **CV**=coeficiente de variação em percentagem, (*) Significativo ao nível de 5% de probabilidades.

Tabela 18. Análise da variância para produtividades de grãos do arroz irrigado em função de diferentes épocas de aplicação de nitrogênio em relação ao início do alagamento do solo.

FV	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	Pr>F	R ²	Ŷ	CV%
Blocos	3	182982,6	60994,2	0,08NS	0,97	0,42	6165	14,58
Tratamentos	5	8941384,1	1788276,8	2,21NS	0,10			
Residuo	15	12130850,1	808723,3					
Total	23	21255216,9						

Sendo: **F**= fator de variação; **G**=graus de liberdades; **SQ**=soma de quadrados; **QM**=quadrado médio; **F**=valor de F calculado; **Pr>F**=probabilidade de significância; **R²**= coeficiente de determinação; **Ŷ**=média do acumulado; **CV**=coeficiente de variação em percentagem, **(NS)** não significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Anexo 9. Análises de variâncias para os parâmetros estudados no experimento 2

Tabela 19. Análise da variância para N acumulados na parte área do arroz irrigado em função de diferentes épocas de aplicação de nitrogênio em relação ao início do alagamento do solo.

FV	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	Pr>F	R ²	Ŷ	CV%
Blocos	3	2734,3	911,4	3,29*	0,05	0,59	70,11	23,75
Tratamentos	5	3455,8	691,1	2,49NS	0,07			
Residuo	15	4160,2	277,3					
Total	23	10350,4						

Sendo: **F**= fator de variação; **G**=graus de liberdades; **SQ**=soma de quadrados; **QM**=quadrado médio; **F**=valor de F calculado; **Pr>F**=probabilidade de significância; **R²**= coeficiente de determinação; **Ŷ**=média do acumulado; **CV**=coeficiente de variação em percentagem, (*) Significativo ao nível de 5% de probabilidades; (**NS**) não significativo ao nível de 5% de probabilidade.

Tabela 20. Análise da variância para a eficiência de recuperação de N pela cultura de arroz irrigado em função de diferentes épocas de aplicação de nitrogênio em relação ao início do alagamento do solo.

FV	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	Pr>F	R ²	Ŷ	CV%
Blocos	3	41383,4	13794,4	12,13*	0,0006	0,81	-2,37	14,21
Tratamentos	4	17045,3	4261,3	3,75*	0,0335			
Residuo	12	13648,6	1137,3					
Total	19	72077,4						

Sendo: **F**= fator de variação; **G**=graus de liberdades; **SQ**=soma de quadrados; **QM**=quadrado médio; **F**=valor de F calculado; **Pr>F**=probabilidade de significância; **R²**= coeficiente de determinação; **Ŷ**=média do recuperado; **CV**=coeficiente de variação em percentagem, (*) Significativo ao nível de 5% de probabilidades.

Tabela 21. Análise da variância para produtividades de grãos do arroz irrigado em função de diferentes épocas de aplicação de nitrogênio em relação ao início do alagamento do solo.

FV	G.L.	S.Q.	Q.M.	F	Pr>F	R ²	Ŷ	CV%
Blocos	3	7230904,8	2410301,6	1,55NS	0,24	0,33	6426	19,4
Tratamentos	5	4565990,2	913198,0	0,59NS	0,71			
Residuo	15	23342844,5	1556189,6					
Total	23	35139739,5						

Sendo: **F**= fator de variação; **G**=graus de liberdades; **SQ**=soma de quadrados; **QM**=quadrado médio; **F**=valor de F calculado; **Pr>F**=probabilidade de significância; **R²**= coeficiente de determinação; **Ŷ** = média do acumulado; **CV**=coeficiente de variação em percentagem; (NS) não significativo ao nível de 5% de probabilidade.