

UFRRJ

INSTITUTO DE AGRONOMIA

**CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
CIÊNCIA DO SOLO**

DISSERTAÇÃO

**Volatilização de Amônia de Fertilizantes
Nitrogenados de Eficiência Aumentada**

Maria Luiza Pedroso Ghizzi

2012



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
CIÊNCIA DO SOLO**

**VOLATILIZAÇÃO DE AMÔNIA DE FERTILIZANTES
NITROGENADOS DE EFICIÊNCIA AUMENTADA**

MARIA LUIZA PEDROSO GHIZZI

Sob a Orientação do Professor
Eduardo Lima

e Co-orientação do Professor
Everaldo Zonta

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestra em Ciências**, no Curso de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração em Ciência do Solo.

Seropédica, RJ
Julho de 2012

631.8
G427v Ghizzi, Maria Luiza Pedroso, 1977-
T Volatilização de amônia de fertilizantes nitrogenados de
eficiência aumentada / Maria Luiza Pedroso Ghizzi – 2012.
114 f. : il.

Orientador: Eduardo Lima.
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal Rural do Rio de
Janeiro, Curso de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do
Solo.
Bibliografia: f. 92-95.

1. Adubos e fertilizantes – Aplicação – Teses. 2. Fertilizantes
nitrogenados – Teses. 3. Uréia como fertilizante – Teses. 4. Solos –
Lixiviação – Teses. I. Lima, Eduardo, 1955-. II. Universidade
Federal Rural do Rio de Janeiro. Curso de Pós-Graduação em
Agronomia – Ciência do Solo. III. Título.

É permitida a cópia parcial ou total desta dissertação, desde que seja citada a fonte.

**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA E CIÊNCIA DO SOLO**

MARIA LUIZA PEDROSO GHIZZI

Dissertação submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestra em Ciências**, no Curso de Pós-Graduação em Agronomia e Ciência do Solo, área de Concentração em Ciência do Solo.

DISSERTAÇÃO APROVADA EM 18/07/2012.

Eduardo Lima. Dr. UFRRJ
Orientador

Raquel Capistrano Moreira. Dra. PETROBRAS

Heitor Cantarella. Dr. IAC

DEDICATÓRIA

Ofereço aos meus pais, João Luiz e Juacema pelo exemplo de vida e pelo comprometimento e apoio em minha educação e desenvolvimento profissional.

AGRADECIMENTOS

Aos professores Eduardo Lima e Everaldo Zonta pela orientação, incentivo, cobrança e apoio.

Ao CPGA-CS/UFRRJ pela oportunidade de capacitação e desenvolvimento profissional, como também por proporcionar a estrutura para desenvolvimento do projeto de pesquisa.

A Petrobras e ao CENPES por incentivarem e apoiarem o desenvolvimento das atividades de mestrado.

Ao bolsista Farley e ao estagiário Júnior pela grande ajuda na instalação, condução e análises laboratoriais do experimento.

Às empresas que cederam as amostras de fertilizantes para os experimentos e a todas as pessoas que de alguma forma contribuíram para aquisição destas.

Aos demais pesquisadores de diversas instituições de pesquisa e ensino que contribuíram com orientações e informações para o desenvolvimento das atividades.

A Deus que me amparou nos momentos de dificuldade.

A TODOS MUITO OBRIGADA!

RESUMO

GHIZZI, Maria Luiza Pedroso. **Volatilização de amônia de fertilizantes nitrogenados de eficiência aumentada**. 2012. 99f. Dissertação (Mestrado em Agronomia, Ciência do Solo). Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2012.

Os fertilizantes à base de ureia de eficiência aumentada vêm evoluindo e ganhando mercado nos últimos anos por aumentarem a eficiência do uso do nitrogênio ao reduzirem suas perdas por volatilização e/ou lixiviação. Este trabalho teve como objetivo comparar as perdas de amônia por volatilização de ureia pura com diversos destes fertilizantes comerciais: ureias-aldeído, ureia recoberta por enxofre, ureia recoberta por polímeros, ureia com inibidores de urease/nitrificação. Os experimentos foram realizados na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, em Seropédica (RJ), em casa de vegetação. As unidades experimentais foram constituídas por tubos de PVC preenchidos com solo arenoso sob dois pHs (5,7 e 6,6) que receberam aplicações em superfície dos diferentes fertilizantes em dose equivalente a 120 kg de nitrogênio por hectare. Logo após a aplicação dos fertilizantes foram instaladas câmaras coletoras semi-abertas livres estáticas (Araújo et al., 2009) para coleta da amônia volatilizada. Foram realizadas 19 coletas de volatilizados em cada unidade experimental até o octagésimo quarto dia após aplicação dos fertilizantes. Analisou-se a quantidade de N-NH₃ presente nestas amostras. Após o experimento de volatilização, aplicaram-se lâminas de água desmineralizada e coletaram-se lixiviados durante 4 dias consecutivos para determinação da concentração de amônio e nitrato/nitrito. Por fim determinou-se o nitrogênio residual, a partir da análise de amônio e nitrato/nitrito presentes em amostras de solo retiradas de cada coluna em três profundidades. Os resultados obtidos mostraram que a maioria dos fertilizantes de eficiência aumentada testados apresentou redução nas perdas de nitrogênio por volatilização de amônia quando comparados a ureia, nos dois pHs. Dentre estes, os fertilizantes de liberação lenta (produtos da condensação de ureia aldeído e produtos complexos quimicamente decomponíveis) tiveram menores perdas de amônia. Os pHs comparados em muitos dos tratamentos não geraram diferenças estatisticamente significativas na volatilização da amônia. Os resultados de lixiviação e nitrogênio residual não permitiram distinção entre as fontes nitrogenadas utilizadas no experimento.

Palavras-chave: Fertilizantes de liberação lenta. Fertilizantes de liberação controlada. Fertilizantes estabilizados. Lixiviação. Nitrogênio residual.

ABSTRACT

GHIZZI, Maria Luiza Pedroso. **Ammonia volatilization of enhanced efficiency nitrogenous fertilizers**. 2012. 99p. Dissertation (Master Science in Agronomy, Soil Science). Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2012.

In the last years, urea based enhanced efficiency fertilizers are improving and gaining market share, due to an increase in the nitrogen use efficiency through the reduction of losses of nitrogen by volatilization and/or leaching. This study compares the ammonia losses by volatilization from pure urea with several of these fertilizers: urea-aldehyde condensation products, sulphur coated urea, polymer coated urea, urea with nitrification/urease inhibitor. The experimental work was held in a greenhouse at Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. The apparatus consisted of PVC tubes filled with sandy soil, under two different pH (5.7 and 6.6), which surfaces were treated with the different fertilizers with the same nitrogen content (120 kg nitrogen/ha). Right after the application, semi-open static collectors (Araujo et al, 2009) were installed to collect volatilized ammonia samples. It was realized nineteen collections on each experimental unit until the 84th day after soil treatment. The samples collect were analyzed to determine the amount of ammonia. Following to that, it was done additions of demineralised water to collect leaching samples during four consecutive days for ammonium and nitrate/nitrite measurement. Finally, soil samples were taken at three different depths from each experimental unit for residual nitrogen measurement. Most of the enhanced efficiency fertilizers tested showed a reduction of nitrogen losses by ammonia volatilization when compared with urea under both pH. Among them, the slow-release fertilizers (urea-aldehyde condensation products and chemically decomposable compounds products) showed the best results. In general, no statistical significant difference was observed with pH change. Furthermore, the results of the analysis of the leaching samples and residual nitrogen didn't allowed distinction for the different nitrogen sources used on the experiment.

Keywords: Slow-release fertilizers. Controlled-release fertilizers. Stabilized fertilizers. Leaching. Residual nitrogen.

ÍNDICE DE TABELAS

Tabela 1. Posição/participação dos países no consumo de fertilizantes NPK.....	2
Tabela 2. Dados de produção, importação e consumo de fertilizantes nitrogenados (t).	2
Tabela 3. Área plantada (milhões ha) e total de entregas (milhões t) por cultura.	3
Tabela 4. Extração e exportação média de nitrogênio por diferentes culturas.	4
Tabela 5. Extração média de nitrogênio pela cultura da cana-de-açúcar.....	4
Tabela 6. Avaliação do Risco de Volatilização.	12
Tabela 7. Análise Física do Solo.	33
Tabela 8. Análise Química do Solo.	33
Tabela 9. Produtos, fabricantes e obtenção das amostras.	34
Tabela 10. Produtos, características técnicas, concentração de N informada e granulometria.	35
Tabela 11. Determinação da capacidade de campo do solo.	39
Tabela 12. Análise de N das fontes nitrogenadas e quantidade aplicada por coluna.....	40
Tabela 13. Somatória de perdas de N-NH ₃ (kg/ha) dos fertilizantes no período de 6 dias após aplicação do fertilizante nitrogenado.	44
Tabela 14. Perda total de N-NH ₃ dos tratamentos nos 6 primeiros dias após aplicação dos fertilizantes nitrogenados.	49
Tabela 15. Perdas de N-NH ₃ (kg/ha) no período total de coleta de volatilizado.....	55
Tabela 16. Perda total de N-NH ₃ dos tratamentos nos 84 dias de experimento de volatilização.	59
Tabela 17. Perdas acumuladas de N-NH ₃ em relação ao N aplicado (%) de 1 a 6, 1 a 12, 1 a 18, 1 a 24, 1 a 30, 1 a 36, 1 a 42 e 1 a 84 dias após aplicação (DAP) do fertilizante nitrogenado e instalação do tratamento controle sem nitrogênio – testemunha.	64
Tabela 18. Perdas médias de N-NH ₄ (kg/ha) em cada coleta de lixiviado.	72
Tabela 19. Perdas médias de N-NO ₃ (kg/ha) em cada coleta de lixiviado.	73
Tabela 20. Perda total de N-NO ₃ (kg/ha) das 4 coletas de lixiviado.	75
Tabela 21. Perda total de N-NO ₃ (kg/ha) das 4 coletas de lixiviado.	77
Tabela 22. Perdas médias de N inorgânico (kg/ha) em cada coleta de lixiviado.....	78
Tabela 23. Perda total de N inorgânico (kg/ha) das 4 coletas de lixiviado.....	80
Tabela 24. Perda total de N inorgânico (kg/ha) das 4 coletas de lixiviado.....	82
Tabela 25. Quantidade média de N inorgânico (mg/kg) das 3 profundidades.....	83
Tabela 26. Quantidade média de N-NH ₄ (mg/kg) das 3 profundidades.	84
Tabela 27. Quantidade média de N-NO ₃ (mg/kg) das 3 profundidades.	85
Tabela 28. Quantidade média das formas de N inorgânico no solo (kg/ha).	86
Tabela 29. Quantidade média de N residual em função do pH (kg/ha).....	89

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1. Comparação entre preços de fertilizantes de eficiência aumentada e fertilizantes convencionais (adaptado de Trenkel, 2010).	17
Figura 2. Efeito da temperatura na taxa de liberação de N (%) do Meister (Trenkel, 2010). .	22
Figura 3. Casa de Vegetação UFRRJ.	32
Figura 4. Montagem da unidade experimental (tubo de PVC, reduções, brita e tela de nylon).	36
Figura 5. Colunas preenchidas com solo arenoso.....	37
Figura 6. Câmara coletora de NH ₃ semiaberta livre estática. Fonte: adaptado de Araújo et al. (2009).....	38
Figura 7. Câmara coletora de amônia encaixada em unidades experimentais.	38
Figura 8. Aplicação dos fertilizantes na coluna.....	39
Figura 9. Unidades experimentais e câmaras coletoras.....	41
Figura 10. Perda total de N-NH ₃ (kg/ha) nos 6 primeiros dias após aplicação dos fertilizantes nitrogenados. Onde, Fertilizantes de liberação lenta – ureia aldeído: 1 (IBDU – 32,5% N), 2 (CDU-31,1%N), 3 (Methylene 75 – 38,7%N), 4 (Ciclus NS-32,5%N), 5 (Ureia Formadeído-37,5%N); Fertilizantes de liberação lenta ou controlada – ureia recoberta por enxofre/polímero: 6 (Poly Plus Sulphur Coated Urea – 28,4%N), 12 (Producote – 39,8%N), 7 (FH Nitro Gold - 42,1%N); Fertilizantes de liberação controlada – ureia recoberta com polímero: 8 (Meister “LP coat L30” – 46,2%N), 9 (Meister “LPS30” – 44,4%N), 10 (ESN-38,9%N), 11 (Kimcoat LGU – 42,4%N); Fertilizantes estabilizados – com inibidores de volatilização ou lixiviação: 13 (Super U-46,4%N), 14 (Super N – 45,7%N); Fertilizantes Convencionais: 15 (Ureia – 45%N), 16 (Nitrato de amônio – 34,3%N), 17 (Sulfato de amônio – 21%N); Testemunha Absoluta: 18 (sem adição de fonte nitrogenada). As barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%.....	43
Figura 11. Perdas Médias de N-NH ₃ de todos os tratamentos das coletas diárias realizadas ao longo dos 6 primeiros dias após aplicação dos fertilizantes.	45
Figura 12. Perdas de N-NH ₃ dos diferentes fertilizantes em função dos dias após aplicação dos fertilizantes nitrogenados. Onde, Fertilizantes de liberação lenta – ureia aldeído: 1 (IBDU – 32,5% N), 2 (CDU-31,1%N), 3 (Methylene 75 – 38,7%N), 4 (Ciclus NS-32,5%N), 5 (Ureia Formadeído-37,5%N); Fertilizantes de liberação lenta ou controlada – ureia recoberta por enxofre/polímero: 6 (Poly Plus Sulphur Coated Urea – 28,4%N), 12 (Producote – 39,8%N), 7 (FH Nitro Gold - 42,1%N); Fertilizantes de liberação controlada – ureia recoberta com polímero: 8 (Meister “LP coat L30” – 46,2%N), 9 (Meister “LPS30” – 44,4%N), 10 (ESN-38,9%N), 11 (Kimcoat LGU – 42,4%N); Fertilizantes estabilizados – com inibidores de volatilização ou lixiviação: 13 (Super U-46,4%N), 14 (Super N – 45,7%N); Fertilizantes Convencionais: 15 (Ureia – 45%N), 16 (Nitrato de amônio – 34,3%N), 17 (Sulfato de amônio – 21%N); Testemunha Absoluta: 18 (sem adição de fonte nitrogenada).	45
Figura 13. Perda média de N-NH ₃ (kg/ha) dos diferentes fertilizantes sob 2 pHs durante os 6 primeiros dias após aplicação dos fertilizantes. Onde pH1 em água é 5,7 e pH2 em água é 6,6. As barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%.	46

- Figura 14.** Perda total de N-NH₃ dos diferentes fertilizantes em função do pH nos 6 primeiros dias após aplicação dos fertilizantes nitrogenados. Onde, pH1 é 5,7 e pH2 é 6,6. Fertilizantes de liberação lenta – ureia aldeído: 1 (IBDU – 32,5% N), 2 (CDU-31,1%N), 3 (Methylene 75 – 38,7%N), 4 (Ciclus NS-32,5%N), 5 (Ureia Formadeído-37,5%N); Fertilizantes de liberação lenta ou controlada – ureia recoberta por enxofre/polímero: 6 (Poly Plus Sulphur Coated Urea – 28,4%N), 12 (Producote – 39,8%N), 7 (FH Nitro Gold – 42,1%N); Fertilizantes de liberação controlada – ureia recoberta com polímero: 8 (Meister “LP coat L30” – 46,2%N), 9 (Meister “LPS30” – 44,4%N), 10 (ESN-38,9%N), 11 (Kimcoat LGU – 42,4%N); Fertilizantes estabilizados – com inibidores de volatilização ou lixiviação: 13 (Super U-46,4%N), 14 (Super N – 45,7%N); Fertilizantes Convencionais: 15 (Ureia – 45%N), 16 (Nitrato de amônio – 34,3%N), 17 (Sulfato de amônio – 21%N); Testemunha Absoluta: 18 (sem adição de fonte nitrogenada). As barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%..... 47
- Figura 15.** Perdas médias de N-NH₃ (kg/ha) dos diferentes fertilizantes sob 2 pHs nos 6 primeiros dias após aplicação dos fertilizantes. Onde pH1 em água é 5,7 e pH2 em água é 6,6. 48
- Figura 16.** Perda total de N-NH₃ dos fertilizantes de liberação lenta – ureia aldeído em comparação com fertilizantes convencionais e testemunha nos 6 primeiros dias após aplicação dos fertilizantes nitrogenados. Onde, pH1 é 5,7 e pH2 é 6,6. Fertilizantes de liberação lenta – ureia aldeído: 1 (IBDU – 32,5% N), 2 (CDU-31,1%N), 3 (Methylene 75 – 38,7%N), 4 (Ciclus NS-32,5%N), 5 (Ureia Formadeído-37,5%N); Fertilizantes Convencionais: 15 (Ureia – 45%N), 16 (Nitrato de amônio – 34,3%N), 17 (Sulfato de amônio – 21%N); Testemunha Absoluta: 18 (sem adição de fonte nitrogenada). 50
- Figura 17.** Perda total de N-NH₃ dos fertilizantes de liberação lenta ou controlada – ureia recoberta com enxofre/polímero em comparação com fertilizantes convencionais e testemunha nos 6 primeiros dias após aplicação dos fertilizantes nitrogenados. Onde, pH1 é 5,7 e pH2 é 6,6. Fertilizantes de liberação lenta – ureia recoberta por enxofre: 6 (Poly Plus Sulphur Coated Urea – 28,4%N), 7 (FH Nitro Gold-42,1%N), 12 (Producote – 39,8%N); Fertilizantes Convencionais: 15 (Ureia – 45%N), 16 (Nitrato de amônio – 34,3%N), 17 (Sulfato de amônio – 21%N); Testemunha Absoluta: 18 (sem adição de fonte nitrogenada). 50
- Figura 18.** Perda total de N-NH₃ dos fertilizantes de liberação controlada – ureia recoberta com polímero em comparação com fertilizantes convencionais e testemunha nos 6 primeiros dias após aplicação dos fertilizantes nitrogenados. Onde, pH1 é 5,7 e pH2 é 6,6. Fertilizantes de liberação controlada – ureia recoberta com polímero: 8 (Meister “LP coat L30” – 46,2%N), 9 (Meister “LPS30” – 44,4%N), 10 (ESN-38,9%N), 11 (Kimcoat LGU – 42,4%N); Fertilizantes Convencionais: 15 (Ureia – 45%N), 16 (Nitrato de amônio – 34,3%N), 17 (Sulfato de amônio – 21%N); Testemunha Absoluta: 18 (sem adição de fonte nitrogenada)..... 51
- Figura 19.** Perda total de N-NH₃ dos fertilizantes estabilizados em comparação com fertilizantes convencionais e testemunha nos 6 primeiros dias após aplicação dos fertilizantes nitrogenados. Onde, pH1 é 5,7 e pH2 é 6,6. Fertilizantes estabilizados – com inibidores de volatilização ou lixiviação: 13 (Super U-46,4%N), 14 (Super N – 45,7%N); Fertilizantes Convencionais: 15 (Ureia – 45%N), 16 (Nitrato de amônio – 34,3%N), 17 (Sulfato de amônio – 21%N); Testemunha Absoluta: 18 (sem adição de fonte nitrogenada). 51

Figura 20. Perda total de N-NH₃ (kg/ha) nos 84 dias de coleta de volatilizados. Onde, Fertilizantes de liberação lenta – ureia aldeído: 1 (IBDU – 32,5% N), 2 (CDU-31,1%N), 3 (Methylene 75 – 38,7%N), 4 (Ciclus NS-32,5%N), 5 (Ureia Formadeído-37,5%N); Fertilizantes de liberação lenta ou controlada – ureia recoberta por enxofre/polímero: 6 (Poly Plus Sulphur Coated Urea – 28,4%N), 7 (FH Nitro Gold-42,1%N), 12 (Producote – 39,8%N); Fertilizantes de liberação controlada – ureia recoberta com polímero: 8 (Meister “LP coat L30” – 46,2%N), 9 (Meister “LPS30” – 44,4%N), 10 (ESN-38,9%N), 11 (Kimcoat LGU – 42,4%N); Fertilizantes estabilizados – com inibidores de volatilização ou lixiviação: 13 (Super U-46,4%N), 14 (Super N – 45,7%N); Fertilizantes Convencionais: 15 (Ureia – 45%N), 16 (Nitrato de amônio – 34,3%N), 17 (Sulfato de amônio – 21%N); Testemunha Absoluta: 18 (sem adição de fonte nitrogenada). As barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%..... 54

Figura 21. Perdas médias de N-NH₃ (kg/ha) dos diferentes tratamentos em função das coletas (6 em 6 dias). 56

Figura 22. Perdas N-NH₃ (kg/ha) dos diferentes fertilizantes em função das coletas (6 em 6 dias). Onde, Fertilizantes de liberação lenta – ureia aldeído: 1 (IBDU – 32,5% N), 2 (CDU-31,1%N), 3 (Methylene 75 – 38,7%N), 4 (Ciclus NS-32,5%N), 5 (Ureia Formadeído-37,5%N); Fertilizantes de liberação lenta ou controlada – ureia recoberta por enxofre/polímero: 6 (Poly Plus Sulphur Coated Urea – 28,4%N), 12 (Producote – 39,8%N), 7 (FH Nitro Gold-42,1%N); Fertilizantes de liberação controlada – ureia recoberta com polímero: 8 (Meister “LP coat L30” – 46,2%N), 9 (Meister “LPS30” – 44,4%N), 10 (ESN-38,9%N), 11 (Kimcoat LGU – 42,4%N); Fertilizantes estabilizados – com inibidores de volatilização ou lixiviação: 13 (Super U-46,4%N), 14 (Super N – 45,7%N); Fertilizantes Convencionais: 15 (Ureia – 45%N), 16 (Nitrato de amônio – 34,3%N), 17 (Sulfato de amônio – 21%N); Testemunha Absoluta: 18 (sem adição de fonte nitrogenada). 57

Figura 23. Perdas médias de N-NH₃ (kg/ha) dos diferentes fertilizantes sob 2 pHs durante 84 dias após aplicação dos fertilizantes. Onde pH1 em água é 5,7 e pH2 em água é 6,6. As barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%..... 57

Figura 24. Perdas de N-NH₃ (kg/ha) dos diferentes fertilizantes sob 2 pHs durante 84 dias após aplicação dos fertilizantes Onde, pH1 é 5,7 e pH2 é 6,6. Fertilizantes de liberação lenta – ureia aldeído: 1 (IBDU – 32,5% N), 2 (CDU-31,1%N), 3 (Methylene 75 – 38,7%N), 4 (Ciclus NS-32,5%N), 5 (Ureia Formadeído-37,5%N); Fertilizantes de liberação lenta ou controlada – ureia recoberta por enxofre/polímero: 6 (Poly Plus Sulphur Coated Urea – 28,4%N), 12 (Producote – 39,8%N), 7 (FH Nitro Gold-42,1%N); Fertilizantes de liberação controlada – ureia recoberta com polímero: 8 (Meister “LP coat L30” – 46,2%N), 9 (Meister “LPS30” – 44,4%N), 10 (ESN-38,9%N), 11 (Kimcoat LGU – 42,4%N); Fertilizantes estabilizados – com inibidores de volatilização ou lixiviação: 13 (Super U-46,4%N), 14 (Super N – 45,7%N); Fertilizantes Convencionais: 15 (Ureia – 45%N), 16 (Nitrato de amônio – 34,3%N), 17 (Sulfato de amônio – 21%N); Testemunha Absoluta: 18 (sem adição de fonte nitrogenada). As barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%..... 58

Figura 25. Perda total de N-NH₃ dos fertilizantes de liberação lenta – ureia aldeído em comparação com fertilizantes convencionais e testemunha nos 84 dias de experimento de volatilização. Onde, pH1 é 5,7 e pH2 é 6,6. Fertilizantes de liberação lenta – ureia aldeído: 1 (IBDU – 32,5% N), 2 (CDU-31,1%N), 3 (Methylene 75 – 38,7%N), 4 (Ciclus NS-32,5%N), 5 (Ureia Formadeído-37,5%N); Fertilizantes Convencionais: 15

- (Ureia – 45%N), 16 (Nitrato de amônio – 34,3%N), 17 (Sulfato de amônio – 21%N); Testemunha Absoluta: 18 (sem adição de fonte nitrogenada). 60
- Figura 26.** Perda total de N-NH₃ dos fertilizantes de liberação lenta ou controlada – ureia recoberta com enxofre/polímero em comparação com fertilizantes convencionais e testemunha nos 84 dias de experimento de volatilização. Onde, pH1 é 5,7 e pH2 é 6,6. Fertilizantes de liberação lenta – ureia recoberta por enxofre: 6 (Poly Plus Sulphur Coated Urea – 28,4%N), 12 (Producote – 39,8%N), 7 (FH Nitro Gold-42,1%N); Fertilizantes Convencionais: 15 (Ureia – 45%N), 16 (Nitrato de amônio – 34,3%N), 17 (Sulfato de amônio – 21%N); Testemunha Absoluta: 18 (sem adição de fonte nitrogenada). 61
- Figura 27.** Perda total de N-NH₃ dos fertilizantes de liberação controlada – ureia recoberta com polímero em comparação com fertilizantes convencionais e testemunha nos 84 dias de experimento de volatilização. Onde, pH1 é 5,7 e pH2 é 6,6. Fertilizantes de liberação controlada – ureia recoberta com polímero: 8 (Meister “LP coat L30” – 46,2%N), 9 (Meister “LPS30” – 44,4%N), 10 (ESN-38,9%N), 11 (Kimcoat LGU – 42,4%N); Fertilizantes Convencionais: 15 (Ureia – 45%N), 16 (Nitrato de amônio – 34,3%N), 17 (Sulfato de amônio – 21%N); Testemunha Absoluta: 18 (sem adição de fonte nitrogenada). 61
- Figura 28.** Perda total de N-NH₃ dos fertilizantes estabilizados em comparação com fertilizantes convencionais e testemunha nos 84 dias de experimento de volatilização. Onde, pH1 é 5,7 e pH2 é 6,6. Fertilizantes estabilizados – com inibidores de volatilização ou lixiviação: 13 (Super U-46,4%N), 14 (Super N – 45,7%N); Fertilizantes Convencionais: 15 (Ureia – 45%N), 16 (Nitrato de amônio – 34,3%N), 17 (Sulfato de amônio – 21%N); Testemunha Absoluta: 18 (sem adição de fonte nitrogenada). 62
- Figura 29.** Perdas acumuladas de N-NH₃ em % N aplicado no período 0 a 84 dias após aplicação (DAP) dos fertilizantes de liberação lenta – ureia aldeído. Onde, pH1 é 5,7 e pH2 é 6,6, 1 (IBDU – 32,5% N), 2 (CDU-31,1%N), 3 (Methylene 75 – 38,7%N), 4 (Ciclus NS-32,5%N), 5 (Ureia Formadeído-37,5%N)..... 66
- Figura 30.** Perdas acumuladas de N-NH₃ em % N aplicado no período 0 a 84 dias após aplicação (DAP) dos fertilizantes de liberação lenta ou controlada – ureia recoberta com enxofre/polímero. Onde, pH1 é 5,7 e pH2 é 6,6, 6 (Poly Plus Sulphur Coated Urea – 28,4%N), 7 (FH Nitro Gold-42,1%N), 12 (Producote – 39,8%N). 67
- Figura 31.** Perdas acumuladas de N-NH₃ em % N aplicado no período 0 a 84 dias após aplicação (DAP) dos fertilizantes de liberação controlada – ureia recoberta com polímero. Onde, pH1 é 5,7 e pH2 é 6,6, 8 (Meister “LP coat L30” – 46,2%N), 9 (Meister “LPS30” – 44,4%N), 10 (ESN-38,9%N), 11 (Kimcoat LGU – 42,4%N)..... 68
- Figura 32.** Perdas acumuladas de N-NH₃ em % N aplicado no período 0 a 84 dias após aplicação (DAP) dos fertilizantes estabilizados com inibidores de volatilização e/ou lixiviação. Onde, pH1 é 5,7 e pH2 é 6,6; 13 (Super U-46,4%N), 14 (Super N – 45,7%N)..... 69
- Figura 33.** Perdas acumuladas de N-NH₃ em % N aplicado no período 0 a 84 dias após aplicação (DAP) dos fertilizantes convencionais e testemunha. Onde, pH1 é 5,7 e pH2 é 6,6; 15 (Ureia – 45%N), 16 (Nitrato de amônio – 34,3%N), 17 (Sulfato de amônio – 21%N); Testemunha Absoluta: 18 (sem adição de fonte nitrogenada). 69
- Figura 34.** Perdas médias de N-NH₄ (kg/ha) dos diferentes tratamentos em função das coletas, onde as barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%. 72

- Figura 35.** Perdas médias de N-NO₃ (kg/ha) dos diferentes tratamentos em função das coletas, onde as barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%. 73
- Figura 36.** Perdas de N-NO₃ (kg/ha) das 4 coletas de lixiviado em função dos fertilizantes. Onde, Fertilizantes de liberação lenta – ureia aldeído: 1 (IBDU – 32,5% N), 2 (CDU-31,1%N), 3 (Methylene 75 – 38,7%N), 4 (Ciclus NS-32,5%N), 5 (Ureia Formadeído-37,5%N); Fertilizantes de liberação lenta ou controlada – ureia recoberta por enxofre/polímero: 6 (Poly Plus Sulphur Coated Urea – 28,4%N), 12 (Producote – 39,8%N), 7 (FH Nitro Gold-42,1%N); Fertilizantes de liberação controlada – ureia recoberta com polímero: 8 (Meister “LP coat L30” – 46,2%N), 9 (Meister “LPS30” – 44,4%N), 10 (ESN-38,9%N), 11 (Kimcoat LGU – 42,4%N); Fertilizantes estabilizados – com inibidores de volatilização ou lixiviação: 13 (Super U-46,4%N), 14 (Super N – 45,7%N); Fertilizantes Convencionais: 15 (Ureia – 45%N), 16 (Nitrato de amônio – 34,3%N), 17 (Sulfato de amônio – 21%N); Testemunha Absoluta: 18 (sem adição de fonte nitrogenada). As barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%. 74
- Figura 37.** Perdas médias de N-NO₃ (kg/ha) dos tratamentos (soma das 4 coletas) em função do pH. Onde pH1 em água é 5,7 e pH2 em água é 6,6. As barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%. 76
- Figura 38.** Perdas médias de N-NO₃ (kg/ha) dos diferentes fertilizantes em função de coletas e pH. Onde pH1 em água é 5,7 e pH2 em água é 6,6. As barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%. 76
- Figura 39.** Perdas médias de N inorgânico (kg/ha) dos diferentes tratamentos em função das coletas. As barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%. 78
- Figura 40.** Perdas totais de N inorgânico (kg/ha) das 4 coletas de lixiviado em função dos fertilizantes. Onde, Fertilizantes de liberação lenta – ureia aldeído: 1 (IBDU – 32,5% N), 2 (CDU-31,1%N), 3 (Methylene 75 – 38,7%N), 4 (Ciclus NS-32,5%N), 5 (Ureia Formadeído-37,5%N); Fertilizantes de liberação lenta ou controlada – ureia recoberta por enxofre/polímero: 6 (Poly Plus Sulphur Coated Urea – 28,4%N), 12 (Producote – 39,8%N), 7 (FH Nitro Gold-42,1%N); Fertilizantes de liberação controlada – ureia recoberta com polímero: 8 (Meister “LP coat L30” – 46,2%N), 9 (Meister “LPS30” – 44,4%N), 10 (ESN-38,9%N), 11 (Kimcoat LGU – 42,4%N); Fertilizantes estabilizados – com inibidores de volatilização ou lixiviação: 13 (Super U-46,4%N), 14 (Super N – 45,7%N); Fertilizantes Convencionais: 15 (Ureia – 45%N), 16 (Nitrato de amônio – 34,3%N), 17 (Sulfato de amônio – 21%N); Testemunha Absoluta: 18 (sem adição de fonte nitrogenada). As barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%. 79
- Figura 41.** Perda total média de N inorgânico (kg/ha) dos tratamentos em função do pH. Onde pH1 em água é 5,7 e pH2 em água é 6,6. As barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%. 81
- Figura 42.** Perdas médias de N inorgânico (kg/ha) dos diferentes fertilizantes em função de coletas e pH. Onde pH1 em água é 5,7 e pH2 em água é 6,6. As barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%. 81
- Figura 43.** Quantidade média de N inorgânico (mg/kg) em função das profundidades de coleta da coluna. Onde, 1 corresponde de 0-10 cm, 2 de 10-30 cm e 3 de 30 à base da coluna. As barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%. 83

- Figura 44.** Quantidade média de $N-NH_4$ (mg/kg) em função das profundidades de coleta da coluna. Onde, 1 corresponde de 0-10 cm, 2 de 10-30 cm e 3 de 30 à base da coluna. As barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%. 84
- Figura 45.** Quantidade média de $N-NO_3$ (mg/kg) em função das profundidades de coleta da coluna. Onde, 1 corresponde de 0-10 cm, 2 de 10-30 cm e 3 de 30 à base da coluna. As barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%. 85
- Figura 46.** Quantidade média das formas de N inorgânico no solo (kg/ha). As barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%. 86
- Figura 47.** Quantidade de N residual (kg/ha) em função dos fertilizantes. Onde, Fertilizantes de liberação lenta – ureia aldeído: 1 (IBDU – 32,5% N), 2 (CDU-31,1%N), 3 (Methylene 75 – 38,7%N), 4 (Ciclus NS-32,5%N), 5 (Ureia Formadeído-37,5%N); Fertilizantes de liberação lenta ou controlada – ureia recoberta por enxofre/polímero: 6 (Poly Plus Sulphur Coated Urea – 28,4%N), 12 (Producote – 39,8%N), 7 (FH Nitro Gold-42,1%N); Fertilizantes de liberação controlada – ureia recoberta com polímero: 8 (Meister “LP coat L30” – 46,2%N), 9 (Meister “LPS30” – 44,4%N), 10 (ESN-38,9%N), 11 (Kimcoat LGU – 42,4%N); Fertilizantes estabilizados – com inibidores de volatilização ou lixiviação: 13 (Super U-46,4%N), 14 (Super N – 45,7%N); Fertilizantes Convencionais: 15 (Ureia – 45%N), 16 (Nitrato de amônio – 34,3%N), 17 (Sulfato de amônio – 21%N). As barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%. 87
- Figura 48.** Quantidade de N residual (kg/ha) em função dos fertilizantes e pH. Onde, pH1 é 5,7 e pH2 é 6,6, Fertilizantes de liberação lenta – ureia aldeído: 1 (IBDU – 32,5% N), 2 (CDU-31,1%N), 3 (Methylene 75 – 38,7%N), 4 (Ciclus NS-32,5%N), 5 (Ureia Formadeído-37,5%N); Fertilizantes de liberação lenta ou controlada – ureia recoberta por enxofre/polímero: 6 (Poly Plus Sulphur Coated Urea – 28,4%N), 12 (Producote – 39,8%N), 7 (FH Nitro Gold-42,1%N); Fertilizantes de liberação controlada – ureia recoberta com polímero: 8 (Meister “LP coat L30” – 46,2%N), 9 (Meister “LPS30” – 44,4%N), 10 (ESN-38,9%N), 11 (Kimcoat LGU – 42,4%N); Fertilizantes estabilizados – com inibidores de volatilização ou lixiviação: 13 (Super U-46,4%N), 14 (Super N – 45,7%N); Fertilizantes Convencionais: 15 (Ureia – 45%N), 16 (Nitrato de amônio – 34,3%N), 17 (Sulfato de amônio – 21%N). As barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%. 88
- Figura 49.** Quantidade média de N residual (kg/ha) dos tratamentos em função do pH. Onde pH1 em água é 5,7 e pH2 em água é 6,6. As barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%. 88

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	2
2.1. Importância do Nitrogênio	2
2.1.1. Funções do nitrogênio na planta.....	3
2.1.2. Exigências e marcha de absorção do nitrogênio.....	4
2.1.3. Dinâmica do nitrogênio no solo e o meio ambiente.....	5
2.1.4. Absorção de nitrogênio pela planta.....	8
2.2. Fontes Nitrogenadas Convencionais	9
2.3. Eficiência de Aproveitamento de Fertilizantes Nitrogenados.....	10
2.4. Fertilizantes de Eficiência Aumentada.....	14
2.4.1. Fertilizantes de liberação lenta e controlada	18
2.4.2. Fertilizantes estabilizados	23
2.4.3. Limitações dos fertilizantes de eficiência aumentada	29
3. MATERIAL E MÉTODOS	32
3.1. Obtenção das Amostras e Caracterização dos Produtos.....	32
3.2. Análises de Volatilização e Lixiviação em Casa de Vegetação	36
3.3. Nitrogênio Residual.....	42
3.4. Análise Estatística	42
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	43
4.1. Volatilização - Análise Primeiro Período (6 dias)	43
4.2. Volatilização – Análise Período Total (84 dias)	53
4.3. Lixiviação - Amônio	71
4.4. Lixiviação - Nitrato	72
4.5. Lixiviação - Nitrogênio Inorgânico	77
4.6. Nitrogênio Residual.....	82
5. CONCLUSÕES	90
6. CONSIDERAÇÕES FINAIS	91
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	92
8. ANEXOS	96

1. INTRODUÇÃO

Dentre os macronutrientes (nitrogênio, potássio, fósforo, cálcio, magnésio e enxofre), o nitrogênio (N) é o elemento exigido pelas culturas, em geral, em maior quantidade, sendo constituinte das proteínas de todas as plantas (Malavolta, 1996).

Salvo para culturas eficientes na fixação biológica de nitrogênio, haverá sempre a necessidade de adições deste elemento, seja via mineral ou orgânica, para que possa atingir produtividades economicamente viáveis. Essas adubações nitrogenadas devem considerar a quantidade extraída e exportada de nitrogênio pela cultura.

A escolha da fonte de nitrogênio é determinada por diversos fatores como: disponibilidade, preço, cultura, época e métodos de aplicação, sistemas de manejo, entre outros (Malavolta, 1996).

Na agricultura, a ureia é o fertilizante nitrogenado mundialmente mais usado, do total de 100,9 milhões de toneladas utilizados na safra 2007/2008, cerca de 53,9 milhões de toneladas (aproximadamente 53,4%) são de ureia (Trenkel, 2010). No Brasil, segundo Cantarella (2007), os fertilizantes nitrogenados mais utilizados são: ureia (44-46% N, forma amídica), nitrato de amônio (33% N, metade forma nítrica e metade amoniacal) e sulfato de amônio (21%N, forma amoniacal).

Segundo Mortvedt et al. (1999), a eficiência no aproveitamento do fertilizante nitrogenado adicionado ao solo, em particular nas regiões tropicais, está em torno de 50-70%, fazendo com que parte do investimento em adubação não tenha o retorno esperado.

As perdas de nitrogênio ocorrem por lixiviação, volatilização e desnitrificação e podem ser minimizadas através do manejo da adubação, adequando-se a aplicação do fertilizante nitrogenado às necessidades da cultura, levando em conta as características do produto usado, época e modo de aplicação (Cantarella e Marcelino, 2008).

Segundo Cantarella (2007), reduções nas perdas por volatilização de amônia (NH_3) de ureia aplicada ao solo têm sido conseguidas com a adição de compostos acidificantes (ácido fosfórico, ácido bórico, cloreto de amônio, nitrato de amônio) e com adubos de ureia (ureia fosfato, ureia nitrato, ureia sulfato, ureia nitrato de cálcio, ureia sulfato de cálcio).

Outra maneira de aumentar a eficiência de aproveitamento dos fertilizantes nitrogenados é o uso de fertilizantes de liberação lenta ou controlada ou com inibidores para evitar a rápida transformação do nitrogênio dos fertilizantes em formas menos estáveis em determinados ambientes (Cantarella, 2007).

Este trabalho teve como objetivo comparar fertilizantes nitrogenados, à base de ureia, de eficiência aumentada (fertilizantes de liberação lenta, de liberação controlada e estabilizados) quanto à volatilização de amônia, lixiviação de nitrogênio inorgânico e nitrogênio mineral residual. Assumindo-se como hipótese que as ureias de eficiência aumentada disponíveis no mercado nacional e internacional reduzem a volatilização do nitrogênio na forma de amônia. Esse estudo comparativo pode auxiliar no manejo da adubação nitrogenada, principalmente de culturas extensivas, onde muitas vezes a incorporação da cobertura nitrogenada torna-se pouco viável por motivos operacionais e/ou econômicos.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Importância do Nitrogênio

Em 2010, em valor, o nitrogênio foi o mais importante nutriente comercializado globalmente: 59,38%, seguido pelo fósforo (P_2O_5), com 23,42% e potássio (K_2O), com 17,21%. Na América do Sul, o Brasil domina amplamente, com 73,34% do valor do mercado de fertilizantes, cabendo à Argentina 10,05%, ao Chile 5,77% e aos demais países, em conjunto, 10,84%. Nessa região, o nitrogênio é, também, o principal nutriente comercializado, com 46,8% em valor, seguido pelo potássio, com 28,6%, e fosfato com 24,6% (Datamonitor, 2011).

O Brasil é o quarto maior consumidor mundial de fertilizantes (NPK), correspondendo a 6% do consumo mundial de 171 milhões de toneladas de nutrientes em 2010 (IFA, 2010). Em termos de nitrogênio, o país é o sexto maior consumidor, com 3% de participação no consumo mundial de 104 milhões de toneladas de nitrogênio (Tabela 1).

Tabela 1 - Posição/participação dos países no consumo de fertilizantes NPK.

Países	Part. NPK (%)	Países	Part. N (%)	Países	Part. P (%)	Países	Part. P (%)
1. China	30	1. China	33	1. China	29	1. China	19
2. Índia	16	2. Índia	16	2. Índia	20	2. EUA	16
3. EUA	12	3. EUA	11	3. EUA	10	3. Brasil	14
4. Brasil	6	4. Indonésia	3	4. Brasil	9	4. Índia	14
5. Indonésia	3	5. Paquistão	3	5. Paquistão	2	5. Indonésia	4
6. Paquistão	2	6. Brasil	3	6. Austrália	2	6. Malásia	4
171 milhões t		104 milhões t		40 milhões t		27 milhões t	

Fonte: Adaptado de IFA (2010).

A tabela 2 apresenta dados sobre produção, importação e consumo do ano de 2010 dos principais fertilizantes nitrogenados utilizados no Brasil (ureia, sulfato de amônio e nitratos).

Tabela 2. Dados de produção, importação e consumo de fertilizantes nitrogenados (t).

Fertilizantes	Produção	Importação	Consumo
Sulfato de Amônio	264.000	1.538.000	1.960.616
Uréia	815.000	2.517.000	3.111.343
Nitratos	251.000	1.085.000	1.322.709

Fonte: ANDA (2010).

Grande parte do nitrogênio utilizando no Brasil é importado, dados de 2010 apontam 78% do nitrogênio e no caso da ureia, a importação corresponde a 80, 1% (ANDA, 2010). Em 2006 a participação da ureia na matriz de nitrogenados tanto no Brasil quanto no mundo atingiu 52%, dentro da faixa de 50-55% comum nos últimos anos (Franco e Saraiva Neto, 2007).

Dados de entrega de fertilizantes no Brasil de 2008 a 2010 mostram que as culturas do milho, café e cana representam cerca de 70% do consumo de ureia (ANDA, 2010). Na tabela 3 encontram-se as principais culturas brasileiras no uso de fertilizantes, onde se destaca a soja, como maior consumidora de fertilizantes, seguida da cultura do milho, cana-de-açúcar, café e

algodão, arroz e feijão. Como a soja apresenta como principal fonte de nitrogênio a fixação biológica pelo rizóbio, não é grande consumidora do fertilizante nitrogenado mineral.

Tabela 3. Área plantada (milhões ha) e total de entregas (milhões t) por cultura.

Culturas	Área plantada (milhões ha)			Total de entregas (milhões t)		
	2008	2009	2010	2008	2009	2010
Soja	21,5	23	23,7	7,5	7,9	8,5
Milho	14,4	13,3	13,2	4,4	3,7	3,8
Cana-de-Açúcar	9,4	9,8	10	2,9	3,2	3,7
Café	2,4	2,3	2,4	1,3	1,5	1,5
Algodão herbáceo	0,9	0,8	1,2	0,9	0,8	1,3
Arroz	2,9	2,8	2,8	0,8	0,7	0,7
Feijão	4,3	4,2	4	0,6	0,5	0,6
Outros	16,6	17,1	17,9	4,1	4,3	4,4
Total	72,5	73,4	75	22,4	22,5	24,5

Fonte: ANDA (2010).

O manejo da fertilidade do solo e o uso eficiente de corretivos e fertilizantes são responsáveis, dentre os diversos fatores de produção, por cerca de 50% do aumento de produção e produtividade das culturas, considerando-se os últimos 40 anos (ANDA, 2010). Como a produção de alimentos deverá aumentar pelo menos 70% até 2050 para atender a demanda gerada pelo crescimento da população mundial, utilizando menos área, menos água e sem poluir o meio ambiente, o uso eficiente de fertilizantes torna-se essencial (informação verbal)¹.

2.1.1. Funções do nitrogênio na planta

O nitrogênio (N) faz parte de compostos de carbono, sendo constituinte de aminoácidos, amidas, proteínas, ácidos nucleicos, nucleotídeos, coenzimas, hexoaminas, etc (Taiz e Zeiger, 2009).

Este nutriente fazendo parte de diversos componentes da célula vegetal, em condições de deficiência, rapidamente inibe o crescimento da planta. Se a deficiência persiste, a maioria das espécies apresenta clorose (amarelecimento) das folhas, principalmente nas mais velhas e em caso de deficiência severa, as folhas tornam-se completamente amarelas ou castanhas e caem da planta. Esses sintomas visuais predominam nas folhas mais velhas porque o nitrogênio é mobilizado das folhas mais velhas para as mais novas, de modo que inicialmente as folhas mais jovens podem não mostrar sintomas de deficiência. Com o acúmulo de carboidratos não utilizados no metabolismo do nitrogênio (síntese de aminoácidos e outros compostos nitrogenados), o caule pode ficar mais lenhoso e antocianina pode ser sintetizada e acumulada, levando a coloração arroxeada de folhas, pecíolos e caules de algumas plantas deficientes em nitrogênio, como tomate e algumas variedades de milho (*Zea mays*) (Taiz e Zeiger, 2009).

¹ Notícia fornecida por Amit Roy no Nitrogen Fertilizer Production Technology Workshop, na Espanha, em outubro de 2011.

2.1.2. Exigências e marcha de absorção do nitrogênio

Sistemas agrícolas de uso intensivo e contínuo podem resultar em sérias restrições na manutenção da capacidade produtiva dos solos, caso não haja uma reposição adequada de nutrientes através de correções (calagem, gessagem) e adubações.

O nitrogênio juntamente com os demais macronutrientes (fósforo, potássio, cálcio, magnésio e enxofre) são requeridos pelas plantas em grandes quantidades. Considerando-se as principais culturas brasileiras (algodão, arroz, amendoim, café, cacau, cana-de-açúcar, essências florestais, feijão, hortaliças, laranja, mandioca, milho, trigo e pastagens), de modo geral as necessidades de macronutrientes seguem a ordem decrescente: N>K>Ca>P=Mg=S (Malavolta, 2006).

Na sequência apresenta-se a Tabela 4 com informações de extração e exportação média de nitrogênio pelas principais culturas produtoras de grãos do país e a Tabela 5 com dados de extração média de nitrogênio pela cultura da cana-de-açúcar.

A extração corresponde à quantidade de nutrientes absorvidos pela planta para seu desenvolvimento e a exportação à quantidade de nutrientes exportados com a colheita. Tais dados são importantes para manejo da fertilidade do solo e recomendação de adubação das culturas.

Tabela 4. Extração e exportação média de nitrogênio por diferentes culturas.

Culturas	Extração Média	Exportação Média	Exportação/Extração
	kg/t de grão		%
Feijão	71	35,1	49,4
Soja	79,4	59,2	74
Milho	24,9	15,8	63
Trigo (sequeiro)	28	20,1	72
Trigo irrigado	49	31,9	65
Arroz irrigado	19,3	12,6	65
Arroz (irrigado intermitente)	46,4	28,3	61

Fonte: Adaptado de Pauletti (2004).

Tabela 5. Extração média de nitrogênio pela cultura da cana-de-açúcar.

Elemento	Extração Média (kg/100 t de cana-de-açúcar)		
	Colmos	Folhas	Colmos + Folhas
N	83	60	143

Fonte: Orlando Filho et al., 1980, citado por Vitti (1997).

É importante lembrar que as quantidades de nutrientes extraídas podem variar com a idade e estágio de desenvolvimento da planta, tipo de solo, adubação, entre outros (Werner et al, 1997).

A marcha de absorção dos nutrientes, em geral, acompanha o acúmulo de matéria seca das plantas, apresentando-se como uma curva sigmóide. Desse modo, no início e final do ciclo (quando a fase de maior crescimento termina), as quantidades de elementos absorvidas são relativamente pequenas, enquanto no período intermediário, de maior crescimento, as quantidades extraídas são muito maiores.

2.1.3. Dinâmica do nitrogênio no solo e o meio ambiente

O nitrogênio está presente em muitas formas na biosfera. Aproximadamente 78% da atmosfera em volume é composta por N₂ (nitrogênio molecular, onde os 2 átomos de nitrogênio são ligados por uma tripla ligação covalente de grande estabilidade), assim para produzir nitrato (NO₃⁻) ou amônia (NH₃) essa ligação precisa ser quebrada por reações chamadas de fixação do nitrogênio, seja por processo industrial (Haber-Bosch) ou por processo natural (relâmpagos – 8%, reações fotoquímicas – 2%, fixação biológica de nitrogênio – 90%). Uma vez fixado em amônio ou nitrato, o nitrogênio entra no ciclo biogeoquímico, passando por várias formas orgânicas ou inorgânicas antes de finalmente retornar à forma de nitrogênio molecular (Taiz & Zeiger, 2009).

Considerando o sistema solo-planta, a maior fração do nitrogênio no solo está na forma orgânica, cerca de 98% do nitrogênio total, presente na matéria orgânica e em organismos vivos, e somente 2% em forma mineral (inorgânica) (Stevenson, 1969). O nitrogênio mineral é formado principalmente pelas frações NH₄⁺ e NO₃⁻, mas pequenas concentrações de NO₂⁻ podem ocorrer. Também estão presentes no solo as formas gasosas: óxidos de nitrogênio (NO_x) e N₂ na atmosfera e na solução do solo (Malavolta, 2006).

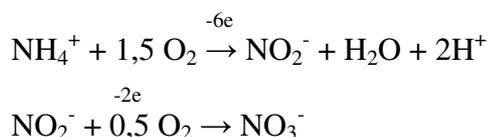
As transformações do nitrogênio no solo estão associadas aos seguintes processos (Malavolta, 2006):

- Amonificação – transformação do nitrogênio orgânico em amoniacal (NH₄⁺);
- Nitrificação – oxidação do amônio a nitrito e deste a nitrato;
- Mineralização do nitrogênio – corresponde às reações de amonificação e nitrificação;
- Imobilização – conversão do nitrogênio mineral em orgânico por microrganismos do solo ou por vegetais (assimilação);
- Desnitrificação – produção de formas gasosas de nitrogênio (N₂ e óxidos) a partir de nitrito e nitrato;
- Fixação de nitrogênio – conversão de nitrogênio gasoso (N₂) em forma combinada.

O ciclo do nitrogênio é controlado por fatores físicos, químicos e biológicos e afetado por condições climáticas, desta forma dependendo da umidade, temperatura, manejo, solo, pH, entre outros, o nitrogênio pode ser conservado e se tornar disponível para as plantas ou ser perdido, sendo os principais mecanismos de perdas a lixiviação e a volatilização (Cantarella, 2007). As perdas também podem ocorrer pela exportação de nitrogênio pela colheita, pela erosão do solo e por desnitrificação (Malavolta, 2006).

A mineralização da matéria orgânica é realizada por microrganismos do solo e, em geral, admite-se que 1 a 4% do total do nitrogênio orgânico possa ser mineralizado e fornecido à cultura durante o seu ciclo anual (Malavolta, 2006).

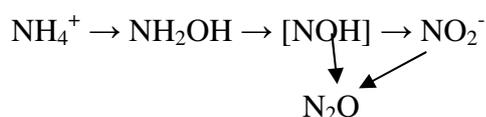
A nitrificação corresponde à oxidação do nitrogênio amoniacal a nitrato por bactérias quimioautotróficas. Ela ocorre em duas etapas. Na primeira, o amônio (NH₄⁺) é convertido em nitrito (NO₂⁻), principalmente por bactérias do gênero *Nitrosomonas* e na segunda etapa, o NO₂⁻ é oxidado a nitrato (NO₃⁻) por bactérias do gênero *Nitrobacter* e *Nitrosolobus* (Cantarella, 2007):



Com a liberação de 2 mols de H⁺ para cada mol de NH₄⁺ oxidado, ocorre a acidificação do solo, de modo que o uso de fertilizantes nitrogenados amoniacais contribuem muito para acidificação dos solos agrícolas (Cantarella, 2007).

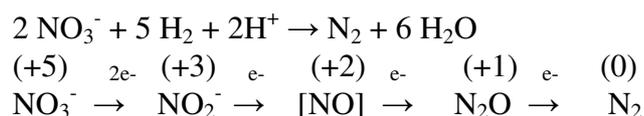
A nitrificação é otimizada a temperaturas entre 25 °C e 40 °C, umidade entre 50% e 70% da capacidade de retenção de água e pH em torno de 6,5 (Keeney; Bremner, 1967; Dancer; Peterson; Chesters, 1973, citados por Cantarella e Montezano, 2010).

Em condições que favorecem a presença de amônia livre (pH elevado, baixa CTC, solos com adubação localizada com ureia, aquamônia ou amônia anidra) pode haver acúmulo de nitrito pois as *Nitrobacter* são sensíveis a amônia (Firestone, 1982, citado por Cantarella, 2007). Durante a oxidação de amônio a nitrito pode haver formação de óxido nitroso (N₂O) em pequena quantidade por dismutação química nitroxil (NOH) ou por ação da redutase do nitrito (Schmidt, 1982; Bremner, 1997, citados por Cantarella, 2007):



O N₂O também é produzido no solo em condições anaeróbicas pelo processo de desnitrificação. Em solos que permanecem inundados durante parte ou todo o ciclo da cultura, fertilizantes com N na forma nítrica sofrem desnitrificação, produzindo N₂ ou N₂O que são perdidos por volatilização (Raij et al, 1997). O óxido nitroso (N₂O) é um gás de efeito estufa com potencial de aquecimento 296 vezes maior que o gás carbônico. Mesmo em solos arejados, podem ocorrer microsítios em condições de anaerobiose, onde a desnitrificação pode ocorrer. A desnitrificação é o principal processo biológico pelo qual o N reativo retorna à atmosfera na forma de N₂. Esse processo é realizado por vários microrganismos, destacando-se os heterotróficos (Malavolta, 2006).

A desnitrificação ao consumir prótons, alcaliniza o solo, revertendo parte da acidez produzida durante a nitrificação (Cantarella, 2007):



Bremner (1997), citado por Cantarella (2007), concluiu em seus experimentos que as perdas de N₂O em solos aeróbios adubados com fontes amoniacais, como ureia, provém da nitrificação, durante a oxidação do NH₄⁺ a NO₂⁻, pois a produção de óxido nitroso (N₂O) é fortemente reduzida por inibidores de nitrificação.

Segundo Trenkel (2010) alguma perda de óxido nitroso do solo é inevitável devido às transformações de nitrogênio por microrganismos. Fertilizações orgânicas com esterco sólido ou líquido são significantes para emissão de longo prazo de óxido nitroso e emissões de curto prazo são influenciadas pelo uso de fertilizante nitrogenado mineral (Trenkel, 2010).

No solo a maior parte do nitrogênio amídico ou amoniacal, em poucas semanas, passa para a forma nítrica, pouco retida no complexo de troca, sendo sujeita a perdas por lixiviação (Raij et al, 1997), de modo que adubações pesadas com fertilizantes nitrogenados aumentam as perdas de nitrato por lixiviação, principalmente quando estas altas doses são aplicadas antes do plantio (Brady, 1989). A presença de nitrogênio residual no solo na ausência de desenvolvimento ativo da cultura é o principal fator de risco para lixiviação do nitrato (De Jong et al, 2009, citado por Grant, 2010), podendo ocorrer inclusive lixiviação do nitrogênio da matéria orgânica do solo no início do desenvolvimento da cultura em sistemas

convencionais pelas plantas terem poucas raízes para absorção do nitrogênio mineralizado antes do plantio (Cantarella, 2007).

O nitrato pela sua grande mobilidade no solo pode chegar às águas superficiais e ao lençol freático, contaminando o ambiente. Os maiores contribuidores para o acúmulo de nitrato em águas subterrâneas são os sistemas agrícolas (Grant, 2010).

Segundo a Organização Mundial de Saúde a concentração máxima tolerável de nitrato na água potável é de 50 mg/l. A toxicidade de nitrato a humanos é atribuída principalmente a sua redução a nitrito. E o maior efeito biológico do nitrito está em seu envolvimento na oxidação da hemoglobina normal a metahemoglobina, que fica incapaz de transportar o oxigênio para os tecidos. O nitrito também pode reagir com compostos nitrosantes no estômago humano para formar compostos nitrosos, que são cancerígenos para todas as espécies animais testadas, sendo provavelmente também para os humanos, mas estudos ainda estão sendo realizados para confirmação desta suspeita (WHO, 2007).

No Brasil há poucos estudos sobre impactos do uso excessivo de nitrogênio no ambiente e de modo geral, as doses de nitrogênio utilizadas são pequenas e o lençol freático profundo, ocorrendo apenas casos pontuais de contaminação de águas subterrâneas em áreas cultivadas com hortaliças ou outras culturas que recebem adubações minerais ou orgânicas em grande quantidade (Cantarella, 2007).

A presença de nitrato em águas superficiais causa a eutrofização, ou seja, o aumento da atividade biológica em águas superficiais, lagos e estuários, proliferando-se algas e plantas aquáticas pela elevação do suprimento de nutrientes e trazendo efeitos prejudiciais como: alteração na distribuição das espécies nos ambientes aquáticos, aumento de algas tóxicas e decréscimo da concentração de oxigênio dissolvido pela decomposição da matéria orgânica produzida.

Em solos com pH acima de 7, adubos contendo nitrogênio na forma amoniacal (sulfato de amônio, nitrato de amônio e fosfato diamônio), aplicados na superfície do solo, estão sujeitos a perdas de nitrogênio por volatilização de amônia. Já a ureia, quando aplicada em superfície, mesmo em solos ácidos, está sujeita a perdas de amônia, devido à hidrólise da ureia promover a elevação do pH do solo (Raj et al, 1997).

As perdas por volatilização de amônia não representam apenas prejuízos econômicos aos produtores rurais, mas também prejuízos ambientais, já que a amônia perdida será depositada pela chuva no solo e na água, causando acidificação e eutrofização (Trenkel, 2010).

Como as perdas de nitrogênio, seja por lixiviação ou emissões gasosas não contribuem para produção agrícola, são prejudiciais ao meio ambiente e representam uma considerável perda econômica para os produtores rurais, estratégias de adubação precisam ser adotadas para redução destas perdas (Trenkel, 2010).

O fertilizante inorgânico representa a maior entrada no ciclo global de nitrogênio e o impacto de seu uso é reduzido por todas as medidas que aumentam sua eficiência (Trenkel, 2010).

A eficiência no aproveitamento do fertilizante nitrogenado adicionado ao solo, em particular nas regiões tropicais, está em torno de 50-70% (Mortvedt *et al.*, 1999). Sem um aumento na eficiência de uso do nitrogênio, o aumento da aplicação de nitrogênio pode levar a impactos negativos ao meio ambiente, já que o nitrogênio pode sair do sistema solo-planta e ser perdido para o ar e água (Trenkel, 2010).

Um dos mais importantes desafios da humanidade de hoje é aumentar a produção de alimentos para atendimento da demanda mundial gerada pelo aumento da população e mudanças de hábitos alimentares, sem degradar o ambiente. Esse aumento de produção requer um adequado suprimento de nitrogênio disponível para planta, já que a fertilização

nitrogenada tem um papel crítico no aumento da produtividade, na qualidade nutricional dos produtos e conseqüentemente na garantia da segurança alimentar (informação verbal)¹.

2.1.4. Absorção de nitrogênio pela planta

As principais formas do nitrogênio são: nitrato (NO_3^-), amônia (NH_3), amônio (NH_4^+), nitrogênio orgânico (nitrogênio presente na matéria orgânica) e N gasoso (N_2 - gás) (Jones et al, 2007).

As espécies vegetais diferem em sua preferência pela absorção das diferentes formas de nitrogênio existentes no solo, mas este nutriente é absorvido principalmente sob as formas inorgânicas nitrato e amônio (Souza e Fernandes, 2006).

Os íons amônio ou nitrato, provenientes da fixação biológica de nitrogênio, da decomposição da matéria orgânica do solo e/ou da aplicação de fertilizantes minerais, são absorvidos pelas plantas e pelos microrganismos, de modo que as plantas desenvolveram mecanismos para rápida absorção destes íons. As plantas assimilam o amônio próximo da região de absorção ou produção e rapidamente armazenam todo excesso nos vacúolos para evitar os efeitos tóxicos do amônio livre, que afeta o gradiente de prótons transmembrana necessário para o transporte de elétrons na fotossíntese e na respiração, assim como para captura de metabólitos nos vacúolos. Já o nitrato pode ser acumulado em níveis altos nas plantas ou ser translocado pelos tecidos sem efeitos deletérios (Taiz & Zeiger, 2009).

O amônio (NH_4^+) é transportado para dentro da célula via uniporte por transportadores de íons na plasmalema e o nitrato (NO_3^-) é co-transportado na membrana plasmática via sistema de transporte simporte ($2\text{H}^+/\text{NO}_3^-$). No tonoplasto, o NO_3^- é transportado para dentro do vacúolo por canal iônico e sai do mesmo via simporte (NO_3^-/H^+) para que seja utilizado no metabolismo do nitrogênio, com isso o vacúolo funciona como um compartimento de reserva de nitrogênio nas plantas (Souza e Fernandes, 2006).

Após absorção via sistema radicular os nutrientes podem entrar no metabolismo celular ou ser deslocados para os vasos condutores via simplástica. O NO_3^- e o K^+ são transportados juntos no xilema. O NO_3^- não se desloca no floema, o nitrogênio é geralmente movimentado no floema como aminoácidos ou amidas. Após o deslocamento no floema, sempre no sentido fonte-dreno, os nutrientes podem seguir via simplástica para frutos ou sementes ou para células em crescimento, nas raízes. Ocorre então a última etapa de efluxo (para o apoplasma) e nova absorção, desta vez para as células do destino final (Fernandes e Souza, 2006).

Na assimilação do nitrato (NO_3^-) este é convertido a nitrito (NO_2^-) no citossol, tendo como catalisador a nitrato redutase e deste para amônio (NH_4^+), nos cloroplastos e plastídios, através da enzima nitrito redutase, e finalmente para nitrogênio-amida da glutamina, consumindo 12 ATPs para cada nitrogênio (Bloom et al., 1992 citado por Taiz & Zeiger, 2009). O nitrito (NO_2^-) é um íon altamente reativo e potencialmente tóxico, de forma que o nitrito formado pela redução do nitrato é rapidamente transportado para os cloroplastos das folhas e plastídios das raízes, onde é reduzido pela nitrito redutase a amônio (Taiz & Zeiger, 2009). As células vegetais evitam a toxicidade do amônio pela rápida conversão do amônio em aminoácidos a partir de duas enzimas a glutamina sintetase (GS) e a glutamato sintase (GOGAT). A GS combina o amônio com o glutamato formando glutamina, por sua vez os níveis elevados de glutamina nos plastídios estimulam a atividade da GOGAT, enzima que

¹ Notícia fornecida por Amit Roy no Nitrogen Fertilizer Production Technology Workshop, na Espanha, em outubro de 2011.

transfere o grupo amida da glutamina para o 2-oxoglutarato, produzindo 2 moléculas de glutamato. Uma rota alternativa para assimilação do amônio ocorre através da glutamato desidrogenase (GDH), que catalisa uma reação reversível que sintetiza ou desamina o glutamato (Taiz & Zeiger, 2009). O nitrogênio assimilado na forma de glutamina e glutamato é incorporado a outros aminoácidos por reações de transaminação, que são catalisadas por aminotransferases encontradas nos cloroplastos, nas mitocôndrias, nos glioxissomos e nos peroxissomos (Taiz & Zeiger, 2009).

Portanto, a assimilação do nitrogênio requer uma série de reações bioquímicas, que por sua vez demandam muita energia. O amônio exige menor gasto de energia para sua assimilação que o nitrato, porque já está reduzido, sendo a fonte preferencial de nitrogênio dos tecidos meristemáticos, que possuem limitada disponibilidade de carboidratos (Taiz & Zeiger, 2009). O amônio exige baixo consumo de energia para sua absorção, de modo que mesmo em baixas temperaturas na zona radicular, há aumento da absorção de nitrogênio nesta forma. A nutrição com amônio também aumenta a síntese de fitohormônios como citocinina e uma grande faixa de poliaminas. Já a nutrição via nitrato traz como vantagens, o nitrato ter baixa energia contida, é a forma de nitrogênio armazenada na planta de menor reatividade; funcionar como um controle osmótico das células; traz vantagens para o balanço elétrico das células, o nitrato age como um carregador de cátions. Em todo caso a produtividade das plantas é maior com uma nutrição mista de nitrato e amônio, pois gera sinergia e porque ambos nitrato e amônio tem vantagens e desvantagens específicas (Wissemeier, 2008, citado por Trenkel, 2010).

2.2. Fontes Nitrogenadas Convencionais

A escolha da fonte de nitrogênio é determinada por diversos fatores como: disponibilidade, preço, cultura, época e métodos de aplicação, sistemas de manejo, entre outros (Malavolta, 1996).

Os principais fertilizantes nitrogenados comercializados no Brasil são: ureia, sulfato de amônio, nitrato de amônio, nitrocálcio, DAP, MAP, amônia anidra, salitre potássico, nitrato de potássio (Raij et al, 1997). Segundo Cantarella (2007), no Brasil, os três fertilizantes nitrogenados mais utilizados são: ureia (44-46% N, forma amídica), nitrato de amônio (33% N, metade forma nítrica e metade amoniacal) e sulfato de amônio (21%N, forma amoniacal), sendo a ureia, o fertilizante mais utilizado.

A ureia reúne uma série de vantagens em termos de custos, manipulação e aplicação (Trenkel, 2010). Tem o mais alto teor de nitrogênio dentre os fertilizantes nitrogenados sólidos usualmente utilizados e o menor custo de produção industrial em relação a outras fontes deste nutriente, apresentando o menor custo por unidade de nitrogênio, e consequentemente o mais baixo custo de transporte e armazenagem por unidade de nitrogênio contido (Franco e Saraiva Neto, 2007). Permite a produção de fertilizantes na forma de pérolas, grânulos, em solução e de fertilizantes recobertos, gerando praticidade de aplicação. Além disso, é não inflamável e não explosivo. Entretanto por ter solubilidade alta, também apresenta alto grau de higroscopicidade. Mas a maior desvantagem da ureia são as perdas de nitrogênio por volatilização de amônia que podem ocorrer dependendo das condições de aplicação (Trenkel, 2010).

O nitrato de amônio é o fertilizante mais empregado em diversos países no norte da Europa e o segundo no Brasil. Seu uso tende a ser decrescente no Brasil e no mundo devido à possibilidade de ser empregado como explosivo, levando a restrições e controle da produção (Franco e Saraiva Neto, 2007).

O sulfato de amônio possui maior preço por unidade de nitrogênio do que ureia e nitrato de amônio e também há pouca disponibilidade no mercado (Franco e Saraiva Neto, 2007).

No solo a maior parte do nitrogênio amídico ou amoniacal, em poucas semanas, passa para a forma de nitrato, pouco retido no complexo de troca do solo, estando sujeito à lixiviação. Em solos com pH acima de 7, adubos contendo nitrogênio na forma amoniacal, aplicados na superfície do solo, estão sujeitos a perdas de nitrogênio por volatilização de amônia. Já a ureia, quando aplicada em superfície, mesmo em solos ácidos, está sujeita a perdas de amônia. As perdas a campo são variáveis, mas estima-se que possam chegar a 20% ou mais do nitrogênio aplicado se condições favorecerem a volatilização (Raij et al, 1997).

Em solos que permanecem inundados durante parte ou todo o ciclo da cultura não devem ser utilizados fertilizantes com nitrogênio na forma nítrica, pois as condições redutoras do solo provocam rápida desnitrificação, que resulta na produção de N₂ ou N₂O que são perdidos por volatilização (Raij et al, 1997).

2.3. Eficiência de Aproveitamento de Fertilizantes Nitrogenados

A eficiência de uso do nutriente pode ser definida como a quantidade de nutriente absorvida do solo pelas plantas e culturas em um determinado período de tempo comparado com a quantidade de nutrientes disponíveis no solo ou aplicadas durante o mesmo período de tempo (Trenkel, 2010).

Como o sistema radicular da maioria das plantas cultivadas explora apenas 20-25% do volume de solo disponível em um ano, a quantidade de nutriente disponível para planta no solo, não depende apenas do seu estágio de desenvolvimento e da sua demanda por nutrientes, mas também da taxa de entrega de nutrientes para raiz por fluxo de massa e difusão (Trenkel, 2010).

Qualquer excesso de nutrientes de plantas no solo não absorvidos pelas plantas pode sofrer três tipos de processos/reações que reduzem sua disponibilidade para as plantas (Shaviv, 2005): microbiológicos (nitrificação, desnitrificação e imobilização), químicos (trocas, fixação, precipitação e hidrólise) e físicos (lixiviação, erosão, volatilização). Assim boas práticas de manejo de fertilizantes devem sempre evitar excesso de nutrientes, para aumentar a eficiência de uso do nutriente e minimizar efeitos desfavoráveis ao meio ambiente.

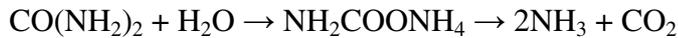
A aplicação de fertilizantes nitrogenados convencionais, especialmente quando aplicados em uma única parcela, resultam numa grande quantidade de nutriente no início do desenvolvimento das plantas e numa pequena quantidade nos estádios de desenvolvimento subsequentes. Esta situação em culturas anuais, cuja absorção de macronutrientes, em geral, é sigmoidal (forma de S), gera uma falta de sincronismo entre a disponibilidade de nutrientes e absorção pelas plantas. Neste caso, o nitrogênio mineral quando em excesso no sistema pode ser perdido por lixiviação e desnitrificação. Assim o fertilizante ideal deveria liberar os nutrientes em um modelo sigmoidal para uma ótima nutrição das plantas e redução das perdas (Trenkel, 2010).

A perda de nitrogênio por volatilização da amônia (composto gasoso) também pode levar a um baixo grau de eficiência dos fertilizantes nitrogenados, notadamente em meio alcalino, e quando esses são aplicados superficialmente.

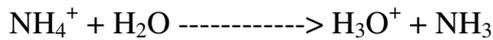
A principal ocorrência da volatilização de amônia (NH₃) é com a ureia, que se decompõe segundo a equação:



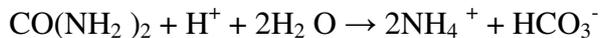
A equação completa, mostrando que primeiro a ureia é transformada em carbamato de amônio, para depois ser transformada em amônia está descrita abaixo:



Perdas por volatilização de amônia ocorrem, também, com fertilizantes nitrogenados amoniacais (sulfato de amônio, nitrato de amônio e fosfato diamônio), quando aplicados na superfície de solos alcalinos (pH acima de 7), o que é explicado pela equação:



A ureia, quando aplicada em superfície, mesmo em solos ácidos, está sujeita a perdas de amônia, devido à hidrólise da ureia promover a elevação do pH do solo (Raij et al, 1997). A hidrólise da ureia eleva o pH por remover íons H^+ da solução do solo:



A ureia não é o único fertilizante que eleva o pH, a aquamônia (hidróxido de amônio), a amônia anidra e o UAN (solução de ureia e nitrato de amônio) também elevam o pH do solo ao seu redor. O aumento de pH resultante da hidrólise da ureia é temporário, porque a conversão de amônio em nitrato (nitrificação) libera íons H^+ , mesmo assim este aumento temporário de pH pode resultar em perdas de amônia por volatilização em solos com pH inicial baixo (Jones et al, 2007).

Assim, embora todos os fertilizantes baseados em amônio e/ou amônia tenham potencial de perdas por volatilização, a ureia é uma das fontes nitrogenadas com maior propensão a perdas de nitrogênio por volatilização da amônia, sendo que as perdas mais significantes, em geral, ocorrem num período de 2 a 3 semanas após a aplicação, nas situações em que não há incorporação da ureia por equipamentos agrícolas, irrigação ou chuva (Jones et al, 2007). As perdas a campo são variáveis, mas estima-se que possam chegar a 20% ou mais do nitrogênio aplicado se as condições favorecerem a volatilização (Raij et al, 1997). As perdas são maiores se a ureia for aplicada em solo úmido, seguido de vários dias de sol, quando a evaporação de água é favorecida, ou se a ureia for colocada sobre resíduos de plantas, tais como palhada formada em plantio direto. A ureia aplicada sobre solo seco não se hidrolisa e portanto, não perde amônia, até que condições de umidade permitam a hidrólise (Raij et al, 1997). Segundo Cabezas et al (1997), as perdas de ureia chegam a quase 80% com a aplicação superficial no plantio direto e 30% no plantio convencional.

A incorporação adequada dos fertilizantes nitrogenados amoniacais ou amídicos, nas aplicações de plantio e cobertura, é fundamental para se evitarem as perdas por volatilização de amônia, principalmente em solos alcalinos, calcários ou em áreas que foram calcariadas em excesso (Lopes e Guilherme, 2000). Recomenda-se a incorporação destes fertilizantes à profundidade de 5 cm (Raij et al, 1997). Quando a incorporação do fertilizante nitrogenado aplicado em cobertura não é possível de ser feita, as perdas por volatilização de amônia podem ser minimizadas, misturando-se o fertilizante com a camada superficial do solo (Lopes e Guilherme, 2000). Lâminas de água (chuva ou irrigação) entre 10 a 20 mm, em geral, também são suficientes para levar a ureia para o interior do solo, reduzindo as perdas por volatilização (Raij et al, 1997).

A taxa de volatilização da amônia depende da taxa de hidrólise da ureia (conversão da ureia em amônio), condições ambientais e propriedades do solo, como pH (Jones et al, 2007), conforme Tabela 6.

Tabela 6. Avaliação do Risco de Volatilização.

Condições de Alto Risco de Volatilização	Condições de Baixo Risco de Volatilização
Alta temperatura do solo (>21,1°C)	Baixa temperatura do solo (<10°C)
Umidade do solo ou orvalho pesado	Solo seco
pH alto do solo (>7,0)	pH baixo do solo (<6,0)
Baixa capacidade de troca de cátions (arenoso)	Alta capacidade de troca de cátions (dominância de silte ou argila)
Resíduos de safra, pastagens perenes, camada de cinzas de queimada recente	Solo descoberto

Fonte: Jones et al (2007).

Segundo Jones et al. (2007), a temperatura é o fator de risco mais importante. Altas temperaturas e alto pH causam elevadas taxas de volatilização de amônia, porque aumentam a concentração de amônia dissolvida em água do solo, além da taxa de hidrólise da ureia ser maior em altas temperaturas, como também gases são mais voláteis em altas temperaturas (Jones et al, 2007). A taxa de hidrólise é maior em altas temperaturas porque a atividade da urease aumenta com o aumento da temperatura: a hidrólise da ureia é completa em 10 dias à temperatura de 5 °C e em 2 dias à 30 °C (Trenkel, 2010).

A hidrólise também é altamente correlacionada com matéria orgânica, de modo que alta concentração de matéria orgânica e resíduos de cultura aumentam a taxa de hidrólise da ureia e a volatilização, porque a enzima urease, que é necessária para hidrólise da ureia é produzida por microrganismos que são mais ativos na presença de material orgânico (Trenkel, 2010). Resíduos também podem evitar que a ureia e o amônio sejam incorporados ao solo, como resultado, pastagens perenes e sistema plantio direto apresentam maior taxa de hidrólise na superfície que solos descobertos e em sistema convencional (Jones et al, 2007).

Segundo Jones et al (2007), devido ao largo efeito do pH na volatilização da amônia, as propriedades do solo de resistência a mudanças no pH reduzem a volatilização de amônia da ureia. Isto inclui alta porcentagem de argila, matéria orgânica e teor de bicarbonato. A alta capacidade de troca de cátions (CTC) reduz a concentração de amônio na solução, reduzindo o amônio disponível para conversão em amônia e conseqüentemente reduzindo a volatilização. Por exemplo, a volatilização de ureia foi quase 3 vezes maior em solos arenosos com CTC de 7 meq/100g do que solo argiloso com CTC de 12 meq/100g.

A hidrólise da ureia em solos com altos níveis de cálcio trocável (Ca^{+2}) precipita o carbonato de cálcio e o pH não aumenta:



Não somente esta reação minimiza o aumento de pH, mas também abre 2 sítios nas partículas de argila para NH_4^+ se ligar, reduzindo sua quantidade em solução e o potencial de volatilização de amônia (Jones et al, 2007).

A volatilização da ureia aumenta linearmente com o aumento da umidade superficial do solo até o ponto de saturação (Jones et al, 2007).

Já as perdas por volatilização decrescem à medida que a ureia é levada para baixo da superfície do solo, seja através da incorporação ou movimento pela chuva e irrigação (Jones et al, 2007).

A absorção de nitrogênio pelas plantas, a imobilização do nitrogênio, a adsorção iônica e a nitrificação reduzem o potencial de volatilização pelo decréscimo da quantidade de amônio livre na solução do solo (Jones et al, 2007).

No solo a maior parte do nitrogênio amídico ou amoniacal, em poucas semanas, passa para a forma nítrica, pouco retida no complexo de troca, sendo sujeita a perdas por lixiviação (Raij et al, 1997). Os nitratos tendo cargas negativas movimentam-se livremente para baixo no perfil do solo com a água, já que não ficam adsorvidos pelos colóides do solo de carga negativas predominantes na superfície (Brady, 1989). Os montantes de nitrogênio perdidos sob a forma de nitrato na água de drenagem do solo variam com o clima e condições agrícolas (Brady, 1989). As perdas são reduzidas em regiões áridas e semi-áridas não irrigadas e elevadas em regiões úmidas e em áreas irrigadas (Brady, 1989). Se o solo estiver seco, parte da água ficará retida na matriz do solo, como também poderá ocorrer ascensão capilar da água do solo das camadas do subsolo às camadas superficiais, gerando efeito inverso à lixiviação (Cantarella, 2007). Segundo esse mesmo autor, a lixiviação do nitrato é diretamente relacionada ao volume de água que percola no perfil do solo (água de chuva ou de irrigação) e ao reunir diversos resultados de lixiviação obteve taxas de lixiviação variando de 0,5 mm/mm de chuva a 5 mm/mm de chuva, onde as taxas de lixiviação maiores ocorreram em solos arenosos, pois a textura do solo influencia na lixiviação, sendo maior em solos arenosos, com menor microporosidade e movimentação mais rápida da água no sentido descendente. Isso ocorre porque a maior parte da água percolada não flui através dos agregados do solo, mas ao redor deles, ou seja, a água ao redor dos agregados possui maior mobilidade do que aquela no interior dos mesmos. A lixiviação também aumenta com a taxa de difusão do nitrato do interior do agregado para solução externa, que é maior em solos arenosos com pouca agregação e menor em solos argilosos ou com agregados de maior tamanho.

Desta forma, quando a maior parte do nitrato está ou é produzida no interior dos agregados, como é o caso do nitrogênio mineralizado da matéria orgânica ou do nitrogênio do fertilizante que esteve em contato com o solo por período suficiente para migração para dentro do agregado, a lixiviação será maior em solos arenosos. Ocorrendo uma chuva de intensidade média ou alta com o nitrato em altas concentrações na solução do solo (exemplo: região adubada), o nitrato descera pelas fissuras e ao redor dos agregados do solo rapidamente. Além das interações físicas, há interações químicas entre água, solo e nitrato, de modo que o movimento não é uniforme (Cantarella, 2007).

Em solos que permanecem inundados durante parte ou todo o ciclo da cultura não devem ser utilizados fertilizantes com nitrogênio na forma nítrica, pois as condições redutoras do solo provocam rápida desnitrificação, que resulta na produção de N_2 ou N_2O que são perdidos por volatilização. Nestas situações de solos inundados recomendam-se adubos contendo nitrogênio amoniacal ou amídico (Raij et al, 1997).

As perdas de nitrogênio por lixiviação, volatilização e desnitrificação podem ser minimizadas através do manejo da adubação, adequando-se a aplicação do fertilizante nitrogenado às necessidades da cultura, levando em conta as características do produto usado, época e modo de aplicação (Marcelino e Cantarella, 2008):

- Parcelamento da adubação nitrogenada, de forma que o nitrogênio seja fornecido nos períodos que antecedem a maior demanda nutricional e as plantas já tenham sistema radicular desenvolvido para absorção do nutriente, implicando na redução das perdas por lixiviação.

- Incorporação da ureia a uma profundidade mínima de 3 a 5 cm por meio mecânico ou irrigação, diminuindo as perdas por volatilização de amônia.

O uso eficiente de nutrientes pode ser resumido como uso da fonte certa, na dose correta, aplicado em época e local adequados. Portanto, além do manejo da adubação em termos de época e modo de aplicação, as fontes nitrogenadas podem contribuir para o uso eficiente do nitrogênio. Segundo Cantarella (2007), reduções nas perdas por volatilização de amônia (NH₃) de ureia aplicada ao solo têm sido conseguidas com a adição de compostos acidificantes (ácido fosfórico, ácido bórico, cloreto de amônio, nitrato de amônio) e com adutos de ureia (ureia fosfato, ureia nitrato, ureia sulfato, ureia nitrato de cálcio, ureia sulfato de cálcio).

A ureia fosfato (UP) apresenta 17,7 % de N e 19,6 % de P e é produzida a partir da combinação de 1 mol de H₃PO₄ e 1 mol de ureia. Destaca-se por ser um fertilizante sólido de manipulação segura, onde ureia e ácido fosfórico mantêm suas composições químicas originais e dissolvidos em água dissociam-se prontamente. A UP pode ser co-granulada com ureia em diferentes proporções dando origem a UUP – ureia-ureia fosfato – com relações de N:P de 0,9:1 até 7:1 (Cantarella, 2007).

As ureias supergrânulos (grânulos de 1 a 4 gramas) também contribuem para o aumento da eficiência da adubação nitrogenada (Cantarella e Marcelino, 2008).

Os fertilizantes de eficiência aumentada (fertilizantes de liberação lenta ou controlada e fertilizantes estabilizados) também são ferramentas importantes no manejo da adubação para alta produtividade e conservação do meio ambiente (Trenkel, 2010). Neste grupo encontram-se as ureias encapsuladas por vários “coatings”, sendo o objetivo destes recobrimentos reduzir a taxa de dissolução dos grânulos e conseqüentemente reduzir as perdas de nitrogênio, esses fertilizantes são chamados de fertilizantes de liberação lenta ou controlada. E a ureia tratada com químicos para inibir as transformações que resultam em perdas de nitrogênio, denominados fertilizantes estabilizados (Jones et al, 2007).

2.4. Fertilizantes de Eficiência Aumentada

A Associação Americana de Agentes para o Controle de Nutrientes de Plantas (AAPFCO) define como fertilizantes de eficiência aumentada: fertilizantes de liberação lenta ou controlada e fertilizantes estabilizados (Trenkel, 2010).

Fertilizante de liberação lenta ou controlada é um fertilizante que retarda a disponibilidade do nutriente para absorção pela planta, seja para uso posterior à aplicação ou para estender a disponibilidade do nutriente. A liberação é mais lenta em comparação a uma fonte de fertilizante de disponibilidade rápida de referência como nitrato de amônio ou ureia (Trenkel, 2010).

O retardo na disponibilidade do nutriente ou a ampliação do tempo de liberação do nutriente pode ocorrer por diversos mecanismos, como controle da solubilidade pela água através de “coatings” (coberturas) de materiais semi-permeáveis, oclusão, materiais protéicos, ou outras formas químicas, pela hidrólise lenta de compostos de alto peso molecular de baixa solubilidade em água ou por outros meios não conhecidos (Trenkel, 2010).

Não há uma diferenciação oficial entre fertilizantes de liberação lenta e controlada, a AAPFCO utiliza os dois termos juntos, mas usualmente consideram-se como fertilizantes de liberação lenta, produtos nitrogenados decompostos microbiologicamente, como compostos de condensação da ureia e ureia-aldeído e fertilizantes de liberação controlada os produtos encapsulados ou recobertos (Trenkel, 1997).

De acordo com Shaviv (2005) pode-se diferenciar fertilizantes de liberação controlada e lenta pela taxa de liberação dos nutrientes. Os fertilizantes de liberação controlada

apresentam fatores, que dominam a taxa, o padrão e a duração da liberação, bem conhecidos e controlados durante a fase de fabricação do fertilizante, permitindo uma maior previsibilidade de liberação. Já os fertilizantes de liberação lenta, não possuem estes fatores bem controlados, a liberação do nutriente pode ser fortemente afetada pelas condições de manuseio do produto (estocagem, transporte e distribuição no campo) e pelas condições do solo (pH, atividade biológica) e climáticas (temperatura, pluviosidade), dificultando a previsibilidade de liberação do nutriente.

A classificação dos fertilizantes recobertos por enxofre (Sulphur Coated Urea – SCU) é objeto de debate, já que o modelo de liberação de nutriente pode variar consideravelmente com o lote do fertilizante, pois dependendo da porcentagem de danos na cobertura dos grânulos a liberação pode seguir um modelo diferente. Desta forma os fertilizantes recobertos por enxofre devem ser classificados como fertilizantes de liberação lenta (Trenkel, 2010).

A sincronização da liberação de nutrientes de fertilizantes de liberação lenta ou controlada com a absorção pela planta aumenta a eficiência de uso dos nutrientes, pois sobra menos nitrogênio no solo (menor risco de perdas para o meio ambiente) e pode gerar aumentos de produtividade. Assim para um bom manejo do fertilizante nitrogenado no solo, informações detalhadas sobre o padrão de liberação do nutriente na água e no solo são necessárias (Trenkel, 2010).

Zhang (2007), citado por Trenkel (2010) em diversos experimentos obteve aumento de produtividade com o uso de fertilizantes de liberação controlada comparado aos convencionais, mesmo com redução nas doses destes fertilizantes de 30 a 50%. Com o aumento da eficiência de uso do nitrogênio, as perdas por volatilização e lixiviação foram consideravelmente reduzidas. Também obteve melhoria na qualidade da safra e dos produtos alimentícios. De modo que em regiões em que há excesso de aplicação de fertilizantes convencionais os ganhos ambientais com o uso de fertilizantes de liberação controlada são consideráveis. Diversos experimentos mostraram que os fertilizantes de liberação controlada, apresentam em geral, maior eficiência na recuperação do nitrogênio, em relação a fertilizantes convencionais, de modo que diversas culturas tiveram suas taxas de aplicação de fertilizantes reduzidas com o emprego desta nova tecnologia (Trenkel, 2010).

Os fertilizantes nitrogenados estabilizados são fertilizantes que recebem aditivos para estender o tempo que o componente nitrogenado do fertilizante permanece no solo na forma de ureia ou na forma amoniacal. Desta forma, têm-se inibidores de nitrificação, substância que inibe a oxidação biológica da amônia a nitrato e inibidores de urease, substância que inibe a hidrólise da ureia pela enzima urease (Trenkel, 2010).

Inibidores de nitrificação podem contribuir para melhorar a eficiência de uso do nitrogênio ao reduzir as perdas de nitrogênio por desnitrificação e lixiviação (Prasad e Power, 1995). Enquanto inibidores de urease podem contribuir para melhoria da eficiência de uso do nitrogênio pela redução da volatilização de amônia. Brenner (1991), citado por Trenkel (2010), verificou em experimentos de campo de 1977 a 1990 que a eficiência de uso do nutriente de fertilizantes nitrogenados estabilizados foi 20 a 30% maior que dos fertilizantes nitrogenados convencionais, sugerindo que a quantidade de nitrogênio aplicada pode ser reduzida de 20 a 30% sem risco de perda de produtividade. Os diversos experimentos relatados por Trenkel (2010) mostraram além de resultados de aumento de eficiência de uso do nitrogênio, ganhos de produtividade.

Shoji et al (2001), realizaram experimentos com ureia recoberta com poliolefina e com inibidor de nitrificação (dicianodiamida) comparada à ureia pura. Em cevada as reduções de emissões de N₂O com uréia recoberta e com inibidor de nitrificação foram de 35% e 81%, respectivamente. Em milho e batata, os resultados de emissões de óxido nitroso foram quase três vezes maiores nas parcelas de ureia pura quando comparadas às parcelas com fertilizantes

de liberação controlada (ureia recoberta com poliolefina) e a recuperação do nitrogênio foi quase duas vezes maior com o fertilizante de liberação controlada. Os mesmos autores concluíram que a contribuição dos fertilizantes de liberação controlada e inibidores de nitrificação para conservação da qualidade do ar e da água resulta da maior eficiência de uso do nutriente e da redução das taxas de aplicação de fertilizantes.

Segundo Lin et al (2007) para aumento da eficiência de uso do nitrogênio deve-se reduzir a quantidade de nitrogênio aplicada por hectare (tomando como exemplo campos de arroz na China em que o nitrogênio é aplicado em excesso), adequando-se a dose econômica de nitrogênio com a necessária para alta produtividade do arroz, pois seus resultados mostram que quanto mais elevadas as doses, maiores são as perdas, havendo necessidade de se utilizar inibidores de urease e fertilizantes de liberação controlada para aumento de eficiência de uso do nitrogênio.

O aumento da eficiência de uso do nitrogênio reduz as perdas para o ambiente, de modo que mesmo que não haja aumento de produtividade, os benefícios ambientais devem ser considerados (Trenkel, 2010).

Em geral, os fertilizantes de liberação lenta e controlada custam 2,4 a 10 vezes mais por unidade de nitrogênio em comparação com uma fonte nitrogenada convencional, tendo sido empregados apenas em nichos de mercado, como viveiros de mudas, campos de golfe e jardinagem (Cantarella, 2007).

Os preços relativamente mais altos dos fertilizantes de liberação lenta e controlada em relação aos fertilizantes convencionais variam conforme os produtos/tecnologias (Trenkel, 2010). A diferença de preço é mínima do fertilizante convencional com o SCU e PSCU, geralmente 2 para 1. Aumenta para produtos de ureia formaldeído, 3 a 5 vezes maior por unidade de nitrogênio. E é muito grande para fertilizantes de liberação controlada recobertos por polímeros, cuja faixa está entre 4 a 8 vezes maior que fertilizantes convencionais correspondentes, pelo custo do próprio material de recobrimento, que pode ser 10 a 30 vezes maior que o custo do fertilizante.

Os preços dos fertilizantes de liberação controlada e estabilizados variam localmente e sazonalmente, mas em geral são substancialmente maiores que o dos fertilizantes convencionais (Figura 1), mas com o aumento do custo do nutriente, a diferença de preço torna-se menor considerando-se o aumento da eficiência de uso do nutriente. A escassez e aumento do custo de mão-de-obra no campo também podem impulsionar o uso de fertilizantes de liberação lenta ou controlada. Aspectos ambientais, como redução da lixiviação e/ou emissões de gases e/ou dose de aplicação também devem ser considerados para tomada de decisão de adoção destas tecnologias (Trenkel, 2010).

Esses altos preços fazem com que a adoção destes fertilizantes de eficiência aumentada ocorra mais facilmente para produtos agrícolas de alto valor agregado (Trenkel, 2010). Segundo o mesmo autor, somente a partir do final da década de 90 que seu uso tem se expandido para commodities ou culturas da agricultura convencional, como milho, arroz, trigo de inverno, batata, árvores frutíferas (maçã, laranja), vegetais (tomate) e culturas forrageiras. Essa expansão do mercado ocorreu devido ao aumento de escala de produção e ao trabalho de consultoria técnica e divulgação destes produtos realizado pelos fabricantes, destacando-se Agrium, Hanfeng e Kingenta (Trenkel, 2010).

No Japão o uso de ureia recoberta com polímeros na cultura do arroz é realizado na maioria das vezes em misturas com fertilizantes convencionais na taxa de 10:90 a 30:70 para reduzir o custo total dos fertilizantes (Trenkel, 2010).

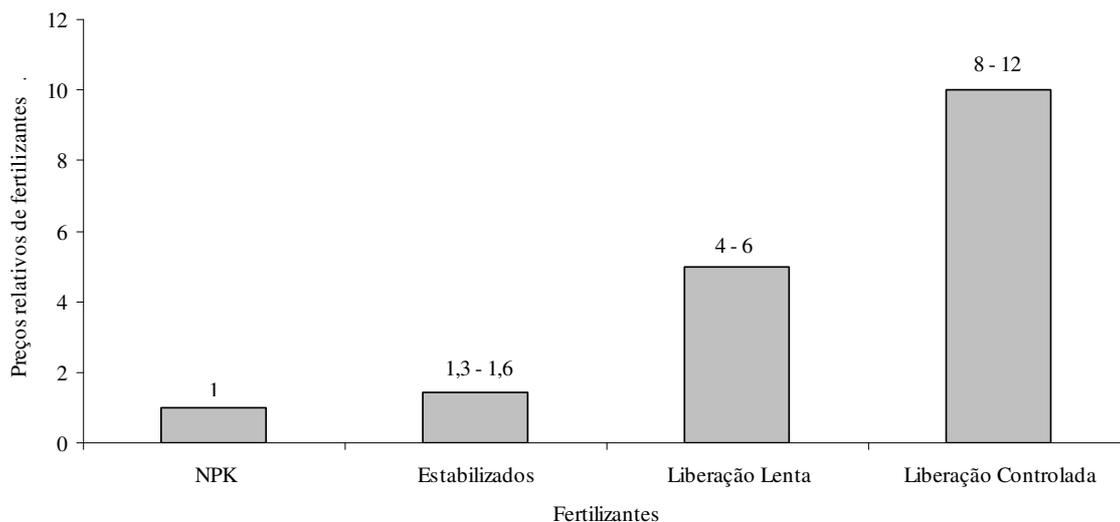


Figura 1. Comparação entre preços de fertilizantes de eficiência aumentada e fertilizantes convencionais (adaptado de Trenkel, 2010).

Segundo Cantarella (2007), atualmente vem crescendo a participação dos fertilizantes recobertos, sendo que dentre os fertilizantes de liberação controlada por meio de recobrimentos ou encapsulamentos, os mais comuns são recobertos com polímeros orgânicos termoplásticos ou resinas, ou com materiais inorgânicos, como o enxofre (S) elementar. A indústria de fertilizantes está à procura de tecnologias e ou produtos para recobrimento de baixo custo que permitam o uso de fertilizantes recobertos em culturas extensivas, de menor valor (Cantarella e Marcelino, 2008).

Um indicador econômico para o produtor determinar a lucratividade usando os fertilizantes de eficiência aumentada é a relação entre valor incremental (aumento de receita com o uso destes fertilizantes) e custo incremental, mas infelizmente faltam dados experimentais confiáveis para este cálculo. Essa relação é fixada, em geral, em pelo menos 2, para tomada de decisão de aplicação dos fertilizantes de liberação lenta e controlada, mas em regiões tropicais e subtropicais, deve ser de pelo menos 3. Já no caso de fertilizantes estabilizados deve-se calcular a lucratividade de sua aplicação pela diferença entre receita incremental e custo incremental, sendo que estes valores variam com custo do fertilizante, preço do produto agrícola e aumento de produtividade proporcionado pelo uso desta tecnologia (Trenkel, 2010).

O consumo mundial de fertilizantes de liberação lenta e controlada aumentou 45% no período de 1995/1996 a 2004/2005, sendo o consumo estimado na safra de 2004/2005 de 786.000 toneladas, baseado na capacidade de produção (Trenkel, 2010). Ou seja, menos de 0,20% de participação no mercado total de fertilizantes desta mesma safra, cujo consumo mundial de fertilizantes em milhões de toneladas de nutrientes foi de 155,6 milhões de toneladas, aproximadamente 420 milhões de toneladas de fertilizantes em produto (IFA, 2011). Embora a participação de mercado atual seja pequena há um grande potencial de crescimento, baseado nas vantagens operacionais, aumento de eficiência no uso de nitrogênio, redução nas taxas de aplicação de fertilizantes, aumento de produtividade e redução de impactos ambientais negativos. Inclusive alguns países, como Japão incentivam o uso destes fertilizantes em substituição aos convencionais com o objetivo de redução das taxas de aplicação de fertilizantes (Trenkel, 2010).

2.4.1. Fertilizantes de liberação lenta e controlada

Fertilizantes de liberação lenta ou controlada podem conter apenas N ou K, NP ou NK, NPK, NPK mais macronutrientes secundários ou micronutrientes. A longevidade destes produtos varia de 20 dias a 18 meses (Shoji e Gandeza, 1992, citados por Trenkel, 2010).

Shaviv (2005) propõe a seguinte classificação para fertilizantes de liberação lenta e controlada:

- Compostos de nitrogênio orgânico de baixa solubilidade, com uma estrutura química de alto peso molecular ou complexas que podem ser divididos em compostos de decomposição biológica (microbiana) – baseados em produtos da condensação da ureia-aldeído, como ureia formaldeído (UF) e compostos quimicamente decomponíveis como isobutilidene-diurea (IBDU).
- Fertilizantes em que uma barreira física controla a liberação do nutriente – o fertilizante pode ser como tablete ou grânulo recoberto por polímeros hidrofóbicos ou como matrizes em que o material solúvel ativo é disperso em um contínuo que restringe a dissolução do fertilizante. Os fertilizantes recobertos podem ser divididos em recobertos com polímeros orgânicos (termoplásticos ou resinas) e com cobertura de material inorgânico como enxofre ou coberturas à base de minerais. O material usado para preparação de matrizes pode também ser subdividido dentro de materiais hidrofóbicos como as poliolefinas, borracha, etc e polímeros em forma de gel (“hidrogels”), que são hidrofílicos por natureza e reduzem a dissolução do fertilizante solúvel pela sua alta retenção de água.
- Compostos inorgânicos de baixa solubilidade – fertilizantes tais como fosfatos de amônio (exemplo: fosfato de amônio de magnésio) e fosfatos de rocha parcialmente acidulados.

Trenkel (2010), além dos produtos acima inclui mais uma categoria dentro de fertilizantes de liberação lenta ou controlada:

- Fertilizantes que liberam os nutrientes lentamente devido a uma pequena superfície em relação ao volume (supergrânulos, briquetes, tabletes, etc).

Os dois grupos mais importantes dentre os fertilizantes de liberação lenta ou controlada, de acordo com seu processo de produção são: produtos de condensação da ureia-aldeído (fertilizantes de liberação lenta) e fertilizantes recobertos ou encapsulados (fertilizantes de liberação controlada) (Trenkel, 2010).

Os supergrânulos são fertilizantes convencionais solúveis formulados numa forma compacta, com uma superfície específica relativamente pequena, resultando numa liberação lenta ou relativamente lenta dos nutrientes para solução do solo. Algumas destas formulações especiais podem conter UF ou IBDU. No oeste europeu supergrânulos como briquetes, tabletes, barras são utilizados principalmente para adubação de árvores e arbustos, vasos de plantas e alguns vegetais. Na região tropical é usado principalmente na cultura do arroz irrigado (Trenkel, 2010).

Dentre os produtos de condensação de ureia e ureia formaldeído, ou ureia metileno têm participação importante no mercado: ureia formaldeído (UF), ureia isobutilaldeído/isobutilidene diurea (IBDU) e ureia crotonaldeído/ureia-acetaldeído/ciclo diurea (CDU). Eles são usados principalmente em gramados profissionais, viveiros, casa de vegetação, para jardins e paisagismo (Trenkel, 2010). A solubilidade desta classe de fertilizantes depende do tamanho da cadeia e da natureza do composto. Os produtos comerciais são misturas de polímeros com frações solúveis em água fria, em água quente e

insolúveis em água, de modo que no solo sofrem degradação química e biológica, liberando o nitrogênio gradualmente às plantas. Assim o desafio na fabricação da UF é produzir uma mistura de polímeros na proporção desejada para liberar nitrogênio conforme necessidade da cultura e da condição de solo para a qual o adubo é direcionado, já que a atividade microbiana aumenta com o aumento da temperatura e umidade (Cantarella, 2007).

Ureia formaldeído (UF) apresenta 38% de nitrogênio, foi o primeiro grupo de fertilizantes nitrogenados de liberação lenta a ser desenvolvido (patente BASF, 1965, na Alemanha). Nos Estados Unidos foi patenteado em 1947 e sua produção comercial teve início em 1955. Diversos tipos de UF são fabricados como sólidos, líquidos, soluções e suspensões em água (Trenkel, 2010).

A UF é formada pela reação de formaldeído com ureia em excesso sob condições controladas, pH, temperatura, proporção entre moléculas, tempo de reação, etc, resultando numa mistura de ureia metileno com diferentes polímeros de cadeia longa. A eficiência da UF é determinada por três frações (Trenkel, 2010):

- Fração I - solúvel em água fria a 25 °C – lentamente disponível, dependendo da temperatura do solo (residual de ureia, metilene diureia – MDU, dimetilene triureia – DMTU e outros produtos solúveis da reação).
- Fração II - solúvel em água quente a 100 °C - ação lenta (ureias metileno de comprimentos de cadeia intermediários).
- Fração III - insolúvel em água quente – ação extremamente lenta ou não disponível (ureias metileno de cadeias mais longas).

A partir destas frações define-se um Índice de Atividade (IA), que consiste na relação entre a fração I sobre as frações II e III, ou seja, determina a insolubilidade do fertilizante em água fria. A AAPFCO tem como IA mínimo 40 com pelo menos 60% do nitrogênio insolúvel em água fria (Trenkel, 2010).

O modelo de liberação de UF é dividido em várias etapas – dissolução e decomposição. Em geral, uma porção do nitrogênio é liberada lentamente (Fração I) e esta é seguida por uma liberação mais gradual por um período de 3-4 meses (Fração II) dependendo do tipo de produto, entretanto a liberação do nutriente também é influenciada pela temperatura, umidade, como também pelos organismos do solo e sua atividade. Sendo mais efetivo em temperaturas altas, é largamente utilizado em climas mais quentes, Europa Mediterrânea, Sul dos EUA, podendo ser utilizado em diversas culturas (Trenkel, 2010).

O Isobutilidene diurea (IBDU) com 32% de N, é um oligômero formado como um produto da condensação pela reação isobutialdeído com ureia. Para a AAPFCO o IBDU deve ter no mínimo 30% de N, dos quais 90% insolúveis em água inicialmente. O mecanismo de liberação funciona pela hidrólise gradual do IBDU levemente insolúvel em água à ureia, que é transformada por bactérias do solo inicialmente em amônio e depois em nitrito e nitrato. A taxa de liberação do N é função do tamanho da partícula (quanto menor, mais rápida a liberação), umidade, temperatura e pH. O IBDU é bom para gramados, mas algumas vezes pode causar fitotoxidez em culturas em casa de vegetação, sendo preferível aplicá-lo em temperaturas mais baixas (Trenkel, 2010).

O ciclo diureia (CDU), com 32,5% de N, teve sua primeira patente em 1959, sendo fabricado no Japão a partir da reação de acetaldeído e ureia, mas na Alemanha por crotonaldeído e ureia. O CDU é decomposto por hidrólise e processos microbiológicos, de modo que a temperatura, a umidade do solo e a atividade microbiológica afetam sua taxa de liberação. A sua degradação é mais lenta que a do IBDU, mesmo em solos mais ácidos. Como

no IBDU o tamanho da partícula tem grande influência na taxa de liberação do nutriente e sua performance agrônômica é semelhante a do IBDU. No Japão e Europa é utilizado em gramados e em culturas específicas. Na Europa, também há fertilizantes específicos com CDU para vasos (Trenkel, 2010).

No passado, UF, IBDU e CDU, tinham a liderança de mercado dentre os produtos de liberação lenta, entretanto os produtos recobertos com polímeros ou com enxofre e polímero vem tomando seu lugar, principalmente devido ao aumento da capacidade de produção pela Kingenta (China) e Agrium/Hanfeng (Canadá/China).

Com fertilizantes de liberação controlada, o principal método de fabricação é através da cobertura de um fertilizante solúvel convencional com uma cobertura protetora (encapsulamento) de um material insolúvel em água, semi-permeável ou impermeável com poros. O ideal é que o controle da penetração de água e consequente dissolução do fertilizante e liberação do nutriente sejam sincronizados com as necessidades da planta (Trenkel, 2010).

Há três principais grupos de fertilizantes recobertos ou encapsulados, baseado no material de cobertura: enxofre; enxofre mais polímeros, incluindo material de resina polimérica; e material polimérico/poliolefinas. Os principais materiais utilizados para cobertura são: enxofre, polímeros (copolímero de cloreto de vinila e vinilideno - PVDC, polímeros formadores de gel, poliolefinas, polietilenos, acetato de vinil etileno, poliésteres, resina de ureia-formaldeído, resinas poliuretanas, resinas alquídicas, etc), sais de ácidos graxos (ex.: estearato de cálcio), látex, borracha, agentes anti-aglomerantes derivados do petróleo, cera, fosfatos de magnésio e cálcio, óxido de magnésio, fosfato de amônio magnésiano e fosfato de potássio magnésiano, fosfogesso, rocha fosfática, argila atapulgita, turfa, extrato ou torta de Nim. Sendo que o material utilizado por cada fabricante depende das propriedades químicas e físicas dos produtos, custo, disponibilidade e da existência ou não de patente. Em comparação com produtos de reação da ureia, os fertilizantes recobertos, principalmente os recobertos com enxofre e material polimérico, são muito favoráveis economicamente. Como também estes fertilizantes podem ser misturados aos fertilizantes convencionais, em taxa variável com o estágio de desenvolvimento da cultura, gerando misturas mais baratas (Trenkel, 2010).

Dentre os fertilizantes recobertos, o mais velho e comum recobrimento é o de enxofre (S), desenvolvido em 1961 no Alabama. A cobertura de enxofre pode ser considerada como uma membrana impermeável que é degradada lentamente através de processos microbiológicos, químicos e físicos. De modo que a concentração do nitrogênio e sua taxa de liberação variam com a espessura da camada em relação ao tamanho do grão ou pérola, como também são influenciadas pela pureza da ureia usada (Trenkel, 2010).

A fabricação do SCU (Sulphur Coated Urea – ureia recoberta por enxofre) consiste no pré-aquecimento dos grânulos de ureia (71-82 °C) que receberão spray de enxofre derretido (143 °C) em um tambor rotativo para cobrir cada grânulo. Qualquer poro ou fenda nesta cobertura é fechado pela adição de uma cera selante ou óleo de parafina polimérica (2-3% do peso total). Por último o grão recebe uma última camada de um condicionador (2-3% do peso total), para melhorar as condições de manuseio e armazenamento do produto (maior fluidez e menos poeira), geralmente atapulgita (Trenkel, 2010). Segundo Cantarella (2007) a ureia recoberta com enxofre (SCU) apresenta 30 à 42% de nitrogênio (N) e de 6 à 30% enxofre (S), sendo comercializado com diferentes graus de velocidade de liberação de nitrogênio.

A vantagem do SCU é ter como principal recobrimento o S, nutriente de plantas de baixo custo, tornando o SCU o fertilizante de liberação lenta mais barato do mercado, onde o custo do nitrogênio é cerca de duas a três vezes o do nitrogênio da ureia (Cantarella, 2007). Como vantagens ambientais reduz as perdas de ureia por lixiviação e/ou perdas de amônia por

volatilização e reduz as emissões de enxofre para atmosfera e sua conseqüente deposição no solo (Trenkel, 2010).

Uma vez aplicado o SCU, bactérias do solo oxidam o S, permitindo que o grânulo se dissolva e permita a hidrólise. A liberação da ureia recoberta com S depende da umidade e temperatura do solo e por esta razão é algo imprevisível. Grande parte do nitrogênio pode não ser liberada até o final do ciclo da cultura, criando problemas em culturas que demandam alta quantidade de nitrogênio como batata e beterraba (Jones et al, 2007).

Geralmente, os fertilizantes SCU tem valores de dissolução de cerca de 40 a 60%. SCU-30 designa um produto com liberação de 30% do nitrogênio em 7 dias em determinadas condições, com uma taxa de dissolução rápida, espera-se um efeito inicial rápido na cultura (Wilson, 1988, citado por Trenkel, 2010).

A liberação da ureia recoberta por enxofre (SCU – sulphur-coated urea), usualmente segue um padrão parabólico, entretanto havendo rachaduras no recobrimento, a liberação de uma terça parte ou mais é imediata em contato com água, denominado “burst” (explosão) e uma terça parte pode ser liberada em longo período depois, efeito “lock-off”. Isso ocorre porque podem ocorrer três tipos de coberturas: danificadas com fendas, danificadas com fendas e seladas por cera e cobertura perfeita; e o fertilizante SCU pode conter mais de um terço dos grânulos com cobertura danificada e cerca de um terço de grânulos perfeitamente cobertos. Para melhorar a resistência ao atrito do SCU, é recomendável uma cobertura dupla com enxofre e polímero – termoplástico ou resina, formando o PSCU – ureia recoberta com enxofre e polímero (Yang et al, 2006).

O PSCU contém cerca de 38,5 a 42% de N e 11 a 15% de S menos que 2% de polímero selante. Embora tenha melhores características de liberação que o SCU, também pode propiciar uma certa liberação rápida inicial, seguida de uma posterior liberação lenta. Como exemplo de produto de cobertura híbrida temos: Lesco Poly Plus PSCU 39 N, Agrium (Pursell) TriKote PSCU 39-42N e Scott Poly-S PSCU 38,5-40N (Trenkel, 2010).

As coberturas de polímeros também controlam a liberação do nitrogênio, mas usam um mecanismo diferente do enxofre. Polímeros agem como membranas semi-permeáveis que permitem o movimento da água através do recobrimento e a saída da ureia dissolvida. A permeabilidade dos polímeros de cobertura depende primeiramente da temperatura do solo. A variedade de polímeros de cobertura disponíveis com taxas de liberação variáveis visa atender necessidades específicas de nitrogênio em cada cultura. O desenvolvimento e a pesquisa em polímeros para recobrimento da ureia estão sendo contínuos e mais informações estarão disponíveis num futuro próximo. No passado, o custo da ureia recoberta limitava seu uso a culturas manejo intensivo, como horticultura e gramados para paisagismo e recreação). Nos últimos 10 anos, novas tecnologias mais baratas têm surgido. Por exemplo, os polímeros de cobertura atuais podem adicionar 20% ao custo da ureia fertilizante, enquanto a menos de 10 anos este custo era de 100% ou mais, em conseqüência, a ureia recoberta tem atingido culturas de mais baixo valor de mercado e situações ambientalmente mais sensíveis (Jones et al, 2007).

Os fertilizantes recobertos com materiais hidrofóbicos, especialmente por polímeros, provém um bom/razoável controle da taxa de liberação do nutriente, pois são menos sensíveis às condições do solo (pH, salinidade, textura, atividade microbológica, potencial redox, forças iônicas), por outro lado são afetados pela temperatura e umidade de permeabilidade do polímero. O padrão temporal de liberação destes nutrientes pode ser parabólico, linear ou sigmoidal, sendo que os padrões de liberação lineares e sigmoidais sincronizam melhor com a absorção de nutrientes pelas plantas que o padrão parabólico (Shaviv, 2005).

Exemplos de formulações com liberação linear dos nutrientes são Meister: 20, 30, 40, 50, 70, 100 (Meister 15), 140, 180 e 270 e formulações com liberação sigmoidal: S30, S40, S60, S80, S100, S120, S160, S200 e SS100 dias em que 80% dos nutrientes são liberados a 25

Graus Celsius. Por exemplo, Meister 7 apresenta uma liberação linear que requer 70 dias para liberação de 80% do nutriente em água a 20 Graus Celsius, enquanto Meister S7, tem um período de retardo de 35 dias e precisa de 35 dias para liberar 80% do nutriente em água a 20 Graus Celsius (Fujita e Shoji, 1999, citados por Trenkel, 2010). Uma liberação sigmoidal, indica que a liberação do nutriente somente ocorrerá depois de um determinado período de tempo após sua aplicação, por exemplo SS100 tem um período de atraso de liberação de 70 dias, maior que S100, com período de 45 dias (Trenkel, 2010). Assim os produtores rurais precisam ter informações sobre o modelo de liberação de nutrientes por estas formulações para aplicação destes produtos em suas culturas. No Japão, os produtores de fertilizantes, cooperativas agrícolas e institutos de pesquisas agrícolas fornecem estas informações aos agricultores (Trenkel, 2010).

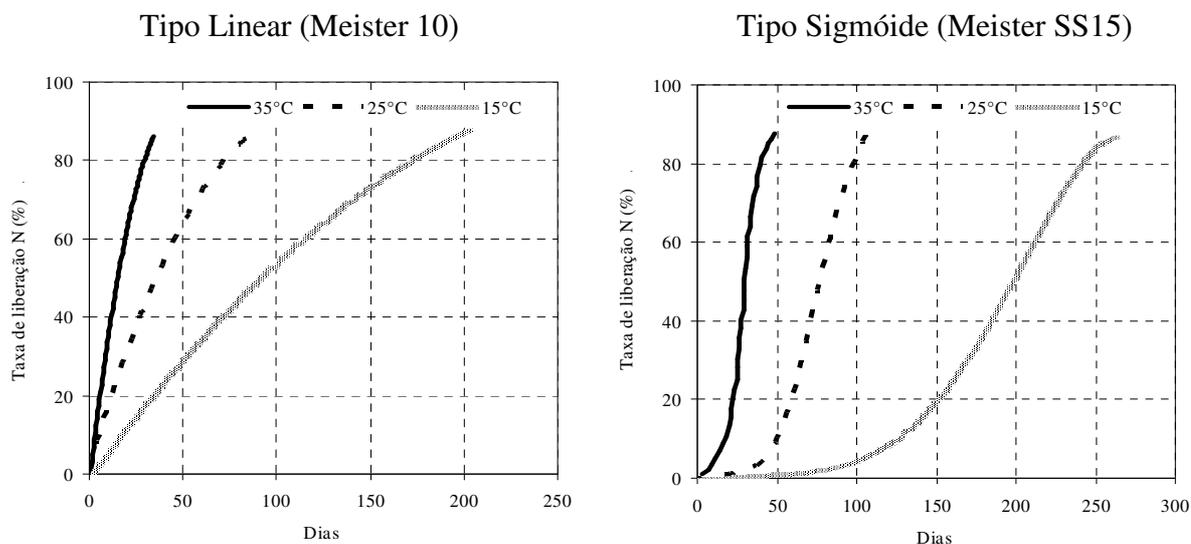


Figura 2. Efeito da temperatura na taxa de liberação de N (%) do Meister (Trenkel, 2010).

Fujita et al (1983) mostram que variadas taxas e períodos de liberação de nutrientes do Meister podem ser obtidos variando-se a relação de acetato vinil etileno (EVA) e polietileno (PE) na resina de cobertura do fertilizante. Por exemplo, se o Meister for recoberto 100% por PE, precisará de 1300 dias para liberar 80% nos nutrientes em água a 25 Graus Celsius, enquanto numa proporção de 50% de PE e 50% de EVA o período é de 98 dias.

Ou seja, a taxa de liberação do nutriente de um fertilizante recoberto por polímero pode ser controlada variando-se o tipo e a espessura do polímero, como também modificando-se a relação entre os diferentes materiais de cobertura. Tecnologias de fertilizantes recobertos com polímeros variam largamente entre produtores dependendo da escolha do material de cobertura e do processo de recobrimento. Exemplo: Polyon usa poliuretano e Meister, usa polietileno. A quantidade de cobertura usada sobre o fertilizante convencional solúvel depende de parâmetros geométricos do material central base (tamanho de superfície do grânulo, redondeza, etc) e da longevidade que se quer atingir (quanto mais longa a necessidade suprimento de nutrientes, menor a quantidade de nutrientes liberada por unidade de tempo – 70, 140, até 400 dias de liberação). Em geral os materiais de cobertura representam de 3-4% a 15% do peso total final do produto. A cobertura do Meister, por exemplo, tem uma espessura de 50 a 60 μm e representa aproximadamente 10% do peso total do fertilizante (Trenkel, 2010).

Para garantia de longevidade de liberação do nutriente do fertilizante recoberto com polímero, a cobertura não deve ser facilmente biodegradável, quimicamente degradável ou ser

destruída mecanicamente durante o período de liberação do nutriente, somente após cessar a liberação do nutriente a “cápsula” deve ser destruída mecanicamente ou atacada por microrganismos (Trenkel, 2010). Alguns produtos recobertos com polímeros sintéticos apresentam problemas pela persistência no solo do material utilizado para cobertura, já o ESN, produzido pela Agrium desde 2000 e utilizado principalmente para milho, trigo e forrageiras, tem um polímero que se degrada em CO₂, amônia e água (Trenkel, 2010).

Fertilizantes de liberação controlada em uma matriz implicam na incorporação de partículas de fertilizantes na matriz de suporte, mas para obter o efeito de liberação lenta desejado, é necessária uma grande quantidade deste material “carregador” (acima de 40%), conseqüentemente as formulações ficam menos concentradas. Em geral o material “carregador” é um misto de ceras fundidas, surfactantes e polietileno glicóis (Trenkel, 2010).

Uma predição razoavelmente boa da liberação de nutrientes ao longo do tempo pode ser feita para alguns fertilizantes de liberação controlada através do desenvolvimento de programas de softwares que consideram as variáveis: cultura, tipo de solo e condições de desenvolvimento (Trenkel, 2010).

O uso de fertilizantes de liberação controlada reduz as perdas de nutrientes, particularmente por lixiviação do nitrato e por volatilização da amônia, com isso aumenta a eficiência de uso dos nutrientes, de modo que uma redução na taxa de aplicação de 20 a 30% é possível quando se usa estes fertilizantes, mantendo-se a mesma produtividade (Trenkel, 2010). A aplicação de fertilizantes de liberação controlada também pode reduzir a toxicidade, particularmente para plântulas, já que a aplicação de fontes solúveis convencionais de nitrogenados pode causar danos às plantas devido à alta concentração de íons, que pode conduzir ao estresse osmótico. Então os fertilizantes de liberação controlada, especialmente aqueles com liberação de nutrientes no padrão sigmoidal, contribuem para aumento da segurança agrônômica, permitindo aplicação *co-situs*. Alguns fertilizantes de eficiência aumentada como os recobertos por enxofre podem aumentar a acidez do solo, entretanto esta pode ser favorável à absorção de fósforo e ferro (Trenkel, 2010).

Fertilizantes de liberação controlada possibilitam atendimento da demanda nutricional da planta de acordo com seu desenvolvimento e em muitas situações possibilita uma aplicação única. A possível redução da fitotoxidez e do sal contido no substrato, permite aumento das quantidades aplicadas de fertilizantes e redução na freqüência de aplicação. Estes resultados são muito convenientes no uso de fertilizantes e significam economia de trabalho, tempo e energia, além da redução dos riscos de poluição ambiental. Eles dão a possibilidade de ganhos de qualidade e produtividade do produto colhido (Trenkel, 2010).

A taxa de liberação de nutrientes de fertilizantes de liberação controlada é mais rápida em regiões tropicais, havendo menor longevidade de liberação em solos com temperaturas superiores a 30 °C. Em contrapartida os benefícios pelo seu uso podem ser grandes mesmo nas regiões tropicais, em condições de solo arenoso com excesso de chuva ou irrigação, já que nestas condições as perdas de nitrogênio de fontes convencionais podem ser altas (Trenkel, 2010).

2.4.2. Fertilizantes estabilizados

Os fertilizantes estabilizados contêm aditivos (inibidores) visando à redução das perdas de nitrogênio por volatilização e/ou lixiviação e desnitrificação.

Inibidores são substâncias químicas que podem ser adicionadas à ureia fertilizante para inibição das transformações de nitrogênio. No mercado há inibidores de nitrificação (2-cloro-6-triclorometil piridina – nitrapirina - NP, dicianodiamida - DCD, fosfato de 3,4 dimetil pirazole – DMPP, Triazol, 3-MP e 2-amino-4-cloro-6-metil-pirimidina - AM e outros) e

inibidores de urease (fenil-fosforodiamidato - PPD e tiofosfato de N-n-butiltriamida – NBPT) - compostos de maior sucesso até o momento, entre milhares de misturas (Cantarella e Marcelino, 2008; Trenkel, 2010).

Atualmente os fertilizantes contendo inibidores de nitrificação e inibidores de urease são usados em culturas agrícolas, em vegetais com longo período de desenvolvimento e em pomares e vinhedos. Entretanto, há grande potencial para o uso de inibidores de urease já que metade de todo fertilizante nitrogenado utilizado na agricultura é ureia, e uma grande porção desta ureia é aplicada na superfície do solo ou usada em arroz inundado (Trenkel, 2010).

Os fertilizantes estabilizados possuem maior importância no mercado de fertilizantes usados na cultura do milho em relação aos de liberação lenta ou controlada, pois possibilitam a redução das perdas de nitrogênio por lixiviação e volatilização, pela liberação gradual do nitrogênio às plantas, reduzindo a necessidade de parcelar a aplicação. Mas o custo alto destes produtos continua inviabilizando seu uso em larga escala (Cantarella e Marcelino, 2008).

Os inibidores de nitrificação diminuem a formação de NO_3^- no solo ao interferirem na atividade das bactérias do gênero *Nitrosomonas*, que oxidam NH_4^+ a NO_2^- . Dessa forma o nitrogênio permanece na forma amoniacal por mais tempo e evita indesejáveis altos níveis de nitrato em plantas usadas para nutrição animal e humana. Enquanto o nitrato tem carga negativa e não fica adsorvido ao complexo de troca do solo, o amônio tem carga positiva e fica adsorvido às partículas do solo, sendo menos sujeito à lixiviação que o nitrato. Como as perdas por lixiviação dependem da alta concentração de nitrato no solo, com inibidores de nitrificação, reduz-se a concentração deste íon na solução do solo e minimizam-se as perdas por lixiviação e desnitrificação. Assim o objetivo de usar inibidores de nitrificação é controlar as perdas por lixiviação ou a produção de óxido nitroso (N_2O) por desnitrificação da superfície do solo, pela manutenção de nitrogênio na forma amoniacal por mais tempo, consequentemente aumentando a eficiência de uso do nitrogênio. Várias pesquisas também mostram que o uso de inibidores de nitrificação também suprime as emissões de metano (Trenkel, 2010).

O nitrato lixiviado pode chegar às águas superficiais e subterrâneas, podendo causar efeitos maléficos à saúde humana e animal, além da eutrofização das águas. Em condições anaeróbicas, o nitrato pode ainda ser submetido a processos de desnitrificação produzindo gases (NO , N_2O , N_2) que são perdidos para atmosfera e podem ocasionar chuvas ácidas e aumento do efeito estufa (Cantarella e Marcelino, 2008).

Como o amônio também é disponível para absorção pelas plantas, os inibidores de nitrificação favorecem a nutrição parcial de plantas com amônio, o que é benéfico para o balanço energético da planta, já que as plantas gastam energia para incorporação de amônio em aminoácidos, mas gastam mais energia quando primeiro reduzem o nitrato a amônio. O uso direto de amônio no metabolismo de proteínas, também traz efeitos positivos na síntese de poliaminas, citocininas e giberelinas. Além disso, a nutrição com amônio também favorece a absorção de fósforo e alguns micronutrientes, já que na absorção de amônio para manutenção do equilíbrio de cargas dentro da célula, esta excreta H^+ , gerando redução do pH na rizosfera de até 2 unidades, aumentando a mobilidade/disponibilidade destes nutrientes nesta região (Amberger, 2008, citado por Trenkel, 2010).

Segundo Cantarella e Marcelino (2008), um bom inibidor de nitrificação deve ser móvel (de forma que se mova junto com o fertilizante), persistente (atuando no período que a cultura exigir), economicamente viável, atóxico aos organismos do solo, seres humanos e animais. Dentre os inibidores de nitrificação mais efetivos e disponíveis no mercado destacam-se a nitrapirina, dicianodiamida (DCD) e o 3,4-dimetilpirazole-fosfato (DMPP - recentemente desenvolvido).

A nitrapirina (NP – 2-cloro-6 – tiorometil piridina), pertencente ao grupo dos compostos clorados, é produzida nos EUA exclusivamente pela Dow Chemical e distribuída com a marca N-Serve. Foi registrada em 1974 e foi o primeiro inibidor de nitrificação aprovado pela EPA (Agência Americana de Proteção do Meio Ambiente), tendo registro para as culturas do milho, sorgo e trigo. Apresenta efeito muito seletivo para *Nitrossomonas*, mas tem algum efeito bactericida (Trenkel, 2010).

A nitrapirina é o inibidor comercializado há mais tempo nos EUA e é recomendado para fertilizantes amoniacais, como: amônia anidra, ureia, sulfato de amônio, uran, nitrato de amônio e esterco animais (Cantarella e Marcelino, 2008). A nitrapirina pode ser incorporada aos fertilizantes convencionais ou injetada no solo diretamente sobre o fertilizante aplicado. Sua taxa de aplicação varia de 1,4-5,6 l/ha do produto comercial e seu efeito inibidor se manifesta por seis a oito semanas, mas pode se alongar por 30 semanas ou mais em solos frios. A decomposição da nitrapirina no solo e plantas ocorre por processos químicos e biológicos, ocorrendo em 30 dias em solos quentes e sendo muito lenta em solos frios (Trenkel, 2010). Como desvantagem apresenta pressão de vapor relativamente alta, tendendo a volatilizar, recomendando-se a incorporação do produto ao solo logo após aplicação. Seu uso tem se restringido aos EUA onde é comum o uso de amônia anidra, sendo a cultura do milho responsável pela maior parte do consumo de nitrapirina (Cantarella e Marcelino, 2008).

A dicianodiamida (DCD), $H_4C_2N_4$, é produzida a partir de cianamida cálcica por diversos fabricantes na China, Alemanha, Japão e Noruega, e seu uso agrícola foi testado desde 1917, mas inicialmente como fertilizante nitrogenado em comparação com cianamida cálcica. Ela é produzida na forma de cristal não volátil, branco ou transparente, de cianamida cálcica, água e dióxido de carbono. Tem uma grande variedade de usos industriais, é solúvel em água e apresenta pelo menos 65% de N, podendo ser incorporado em qualquer fertilizante contendo amônio, seja sólido, líquido ou suspensão, tais como ureia, sulfato de amônio (AS), uran (ou UAN). Para incorporação de DCD em amônia anidra é necessário um equipamento de alta pressão. A desvantagem do DCD encontra-se no menor poder de inibição quando comparado à nitrapirina, havendo necessidade de uso de doses maiores para obtenção de boas taxas de inibição, 5-10% de DCC (Cantarella e Marcelino, 2008; Trenkel, 2010). Visando reduzir a taxa de aplicação do DCD sem afetar sua atividade, combinações de DCD com outros inibidores de nitrificação têm sido feitas: DCD + 3-MP (3-methyl pyrazole), DCD+TZ, relação 10:1 em peso (1H-1,2,4-triazole) (Weber et al, 2004).

A decomposição do DCD é parte abiótica e parte biótica por enzimas específicas, sendo convertido via guanilureia e guanidine em ureia e depois em amônia e gás carbônico, sendo mineralizado mais rapidamente que DMPP (Trenkel, 2010). No solo apresenta efeito bacteriostático sobre as *Nitrossomonas*, ou seja, as bactérias não morrem, apenas tem sua atividade inibida ou reduzida por certo período de tempo. Dependendo da quantidade de nitrogênio aplicada, da umidade e temperatura do solo, o fertilizante nitrogenado amoniacal ou esterco líquidos/urinas são estabilizados por várias semanas (4 a 10) através da inibição da nitrificação pelo DCD (Trenkel, 2010).

Devido à alta solubilidade do DCD ele pode estar sujeito a perdas por lixiviação, devendo ser melhor estudado para solos de textura leve. Apresenta como vantagem seu menor custo de produção, ser solúvel em água, ser pouco volátil (pode ser armazenado em condições secas indefinidamente), possuir efeito bacteriostático e não bactericida no solo (efeito específico para bactérias nitrificadoras) e ser também um fertilizante nitrogenado de liberação lenta (cerca de 66,7% de N), já que o DCD se decompõe no solo completamente em NH_4^+ e CO_2 em algumas semanas (Cantarella e Marcelino, 2008).

Vários experimentos conduzidos nos Estados Unidos comparando o uso de DCD e de NP em relação ao adubo nitrogenado mostraram que as maiores respostas ao uso de inibidores

de nitrificação podem ser obtidas em solos arenosos. Pesquisas comparando-se DCD e nitrapirina adicionadas à ureia e ao uran mostraram maior eficiência de DCD (Cantarella e Marcelino, 2008).

Segundo Moir et al (2007), o uso de DCD em sistemas de criação de gado a pasto além de reduzir as perdas de nitrogênio por lixiviação e desnitrificação, aumentam a produtividade das pastagens.

O DMPP (fosfato de 3,4 dimetil pirazole) é o inibidor desenvolvido recentemente, em 1995 pela BASF, comercializado desde 1999 pela Compo, com a marca Entec, está registrado em diversos países da Europa, América do Sul, Austrália e Nova Zelândia (Trenkel, 2010). Já é comercializado no Brasil.

O DMPP é produzido em pó, com coloração de branco a acinzentado e pode ser aplicado em fertilizantes sólidos ou líquidos, como também em esterco líquido (Trenkel, 2010). Apresenta baixa toxidez (tolerado pelas plantas), é compatível fisicamente com fertilizantes granulados e bastante eficiente para inibir a nitrificação, mesmo aplicado em doses baixas (0,5 a 1,5 kg/ha dependendo da quantidade de nitrogênio aplicado) inibe a nitrificação por um período de 4 a 10 semanas em clima temperado. Em geral, recomenda-se a dose de 1% em relação à quantidade de $N-NH_4^+$ ou N-Amida dos fertilizantes (Cantarella e Marcelino, 2008).

Comparado com os outros inibidores o DMPP, tem duas características específicas, que se destacam: sua taxa de aplicação ser significativamente menor que a dos outros inibidores, como por exemplo, DCD e sua mobilidade no solo ser baixa, comparada com a do amônio. Várias pesquisas também evidenciaram que mesmo em altas temperaturas do solo (25 °C) continua com eficiência satisfatória (Trenkel, 2010).

Os inibidores de nitrificação permitem aplicação de grandes quantidades de nitrogênio no início do desenvolvimento da cultura, em menor número de parcelas, reduzindo os custos de aplicação e gerando maior flexibilidade operacional. Ao mesmo tempo, experimentos mostram aumento de produtividade e redução dos riscos de perdas de nitrato (Trenkel, 2010).

Os inibidores de nitrificação retardam a nitrificação e indiretamente a desnitrificação do amônio da matéria orgânica do solo e dos fertilizantes minerais, reduzindo as emissões de óxidos de nitrogênio e de óxido nitroso. Aumentando a eficiência de uso do nitrogênio possibilita a redução na quantidade aplicada de nitrogênio, sem perda de produtividade ou manter a quantidade de nitrogênio aplicada e obter ganhos de produtividade. Implicando numa economia importante para manejo da propriedade agrícola, produção agrícola e proteção do meio ambiente (Trenkel, 2010).

A facilidade de absorção de inibidores de nitrificação pelas partículas do solo afeta sua habilidade de inibir a nitrificação da amônia. Pesquisas são necessárias para avaliar quais propriedades do solo são efetivas para poder prever o período de efeito inibitório dos inibidores de nitrificação (Trenkel, 2010).

Dentre os fertilizantes “estabilizados” destacam-se os fertilizantes com inibidores de urease, que evitam a conversão de ureia em amônio, eles podem retardar a hidrólise da ureia por 2 a 10 semanas. Em geral, a longevidade dos inibidores de urease decresce com o aumento da temperatura e umidade dos solos (Cantarella e Marcelino, 2008). Experimentos de Watson (2005) mostraram que a aplicação de inibidores de urease em ureia e em fertilizantes contendo ureia, evita ou retarda a transformação de N-amídico em N-amoniaco por 7 a 14 dias.

Reduzindo a taxa de hidrólise da ureia no solo, as perdas de amônia para o ar (volatilização) também são reduzidas ou evitadas (Trenkel, 2010). A inibição da hidrólise por determinado período propicia a possibilidade de precipitações incorporarem a ureia no solo, cessando as possíveis perdas de nitrogênio (Cantarella e Marcelino, 2008). Ou seja, o sucesso destes produtos depende da água da chuva ou irrigação para incorporação da ureia antes que a

hidrólise se inicie e similar aos “coatings” podem retardar a disponibilidade de nitrogênio para as culturas (Jones et al, 2007).

O uso de inibidores de urease é particularmente benéfico em solos quando as perdas de amônia provém de grande quantidade de ureia aplicada, quando a incorporação da ureia não é possível ou é difícil, quando a ureia não é incorporada ao solo pela água da chuva, devido à seca, e em sistema de cultivo mínimo ou plantio direto, onde a matéria orgânica é acumulada (Trenkel, 2010). Um importante e relativamente novo mercado de aplicação de inibidores de urease são fazendas de gado de corte e leite, onde as excretas do gado são a principal fonte de emissões de amônia (Trenkel, 2010).

O uso de inibidores de urease além de reduzir as perdas de amônia por volatilização, aumentando a eficiência dos fertilizantes, também reduz a toxicidade da ureia próxima à semente (Trenkel, 2010). Uma vez que amônia e nitrito podem causar severos danos à germinação e à plântula, quando são aplicadas grandes quantidades de ureia no sulco de plantio, pois o acúmulo de amônia aumenta o pH do solo, podendo a ureia danificar plântulas/culturas em emergência, inibir a germinação e causar a queima das extremidades das folhas (Trenkel, 2010).

O uso de inibidores de urease proporciona aos produtores rurais flexibilidade no manejo de aplicação da ureia/UAN, minimizando as perdas por volatilização, oferece maior flexibilidade na época de aplicação e conservação de sistemas de cultivo (Trenkel, 2010).

Com o uso de inibidores de urease é aumentada a disponibilidade de ureia por período maior e a absorção direta de ureia pela planta pode tornar-se importante, pois pode conduzir a um aumento da quantidade amônio na planta. Este aumento de amônio na planta pode levar a uma maior formação de aminoácidos básicos, preferencialmente arginina, um precursor das poliaminas, também chamados de “mensageiros secundários”, que desempenham um papel especial no estímulo ao crescimento da planta (Amberger, 2008, citado por Trenkel, 2010).

Os inibidores de urease mais efetivos na atualidade são os análogos de ureia, tais como fosforodiamidatos e fosfortriamidatos, pois têm mostrado forte ação inibidora em concentrações muito baixas, é o caso do PPD (fenil-fosforodiamidato) e principalmente do NBPT - N-(n-butil) triamida trifosfórica (Cantarella e Marcelino, 2008). Segundo Trenkel (2010), atualmente o único inibidor de urease disponível no mercado é o Agrotain, na forma líquida e seco, comercializado pela Agrotain International e com registro em diversos países: Canadá, EUA, Brasil, Austrália, Reino Unido e União Européia. Tem como parceiro licenciado no Brasil, a Fertipar Fertilizantes do Paraná.

O NBPT - N-(n-butil) triamida tiossulfúrica é um normal butil, derivado de triamida ssulfúrica, que apresenta características de solubilidade e difusividade similares à da ureia e vem apresentando os melhores resultados entre os inibidores de urease. Este composto não é um inibidor direto da urease, mas sim o seu análogo de oxigênio (fosfato de N-n-butiltriamida) – NBPTO. A conversão de NBPT para NBPTO é rápida em solos bem arejados (minutos ou horas), mas pode levar vários dias em condições de solos inundados. Não tem mostrado efeito sobre as propriedades biológicas do solo (Cantarella e Marcelino, 2008). Retardando a transformação de ureia a amônio, se minimizam as perdas de amônia e possibilita tempo para absorção e dissipação das formas de nitrogênio no solo (Trenkel, 2010). A redução das perdas por volatilização de amônia podem atingir a variação de 55 à 99%, mas nem sempre refletem em ganhos de produtividade, principalmente em solos ricos em nitrogênio, permanecendo apenas os benefícios ambientais (Watson et al, 1994). No Brasil a redução de volatilização da amônia variou de 30 a 90% com a adição de NBPT à ureia (Cantarella et al., 2005).

A quantidade de Agrotain aplicada está na faixa de 400 a 1100 ppm NBPT, esta quantidade é ajustada de acordo com as práticas culturais de cada cultura e das condições

locais, não interferindo a quantidade da ureia aplicada. No caso de blends, a ureia precisa ser pré-tratada antes da introdução dos outros fertilizantes (Trenkel, 2010).

O NBPT não oferece riscos de segurança ao meio ambiente e às pessoas, não necessitando precauções ou advertências ao usuário final, além dos procedimentos básicos de segurança para manejo e uso de fertilizantes. O NBPT atinge uma enzima que existe independente dos organismos do solo e não produz efeito tóxico e estático nos microrganismos. O NBPT degrada em seus elementos constituintes: N, P, S, C e H e não há evidência de qualquer efeito adverso em longo prazo na produção de gramíneas com repetidas aplicações de ureia tratada com NBPT, também não há indicação de redução de eficiência causada pelo uso repetido num mesmo solo (Watson, 2005).

O Agrotain (NBPT) é uma formulação líquida, não aquosa, que pode ser injetada diretamente na ureia “melt” (fundida) antes do acabamento (granulação/perolagem) para dar uma distribuição homogênea completa por todo grânulo da ureia sólida. O NBPT também pode ser aplicado na superfície de grânulos e pérolas antes ou durante uma operação de mistura em batelada ou contínua, onde o atrito dos grânulos de ureia durante a operação de mistura é suficiente para distribuir o NBPT na ureia sólida (Trenkel, 2010). A formulação líquida do Agrotain não contém água, assim as propriedades de manuseio e estocagem da ureia não são degradadas pelo tratamento. Não há diferença na performance do NBPT quando dispersado dentro ou aplicado na superfície dos grânulos de ureia, entretanto o tratamento da ureia “melt” gera um produto mais homogêneo e estável comparado ao produto recoberto (Watson et al, 2008). Na maioria dos casos o Agrotain é aplicado como um tratamento da superfície do grânulo ou pérola de ureia logo antes da aplicação da ureia (Trenkel, 2010).

Para formulações líquidas de ureia, como UAN, o NBPT é simplesmente adicionado à solução de UAN antes de sua aplicação. A estocagem por diversos dias do UAN tratado não é recomendada porque o produto pode começar a degradar se estocado na presença de água (Trenkel, 2010). NBPT não é capaz de controlar completamente as perdas de NH_3 que acontecem quando a ureia é aplicada na superfície de solos, tendo em vista que sua ação depende de condições ambientais e das características físico-químicas do solo. Sua estabilidade é de 3 a 15 dias, dependendo da temperatura e da umidade do solo. A ocorrência de chuvas suficientes para incorporar a ureia ao solo em um intervalo de 3 a 7 dias após a adubação é a condição que mais favorece a eficiência do NBPT em reduzir as perdas por volatilização de NH_3 (Cantarella e Marcelino, 2008).

Ureia estabilizada com NBPT pode ser aplicada direto na forma sólida ou líquida, não é necessária incorporação mesmo em solos alcalinos, e pode também ser usada para coberturas em culturas em solos leves arenosos e em pastagens na estação de desenvolvimento. Em estudos, a eficiência do NBPT em reduzir a volatilização foi maior em solos com alto pH e baixa capacidade de troca de cátions, condições mais propícias à volatilização. Outro fator a ser considerado é que o NBPT decompõe mais rápido em solos ácidos (Trenkel, 2010).

A redução nas perdas de nitrogênio e a redução na toxicidade da amônia livre resultam numa maior produtividade e melhor qualidade da colheita, de modo que onde os produtores aplicam uma quantidade maior do fertilizante nitrogenado para compensar perdas por volatilização, é possível reduzir as taxas de aplicação de nitrogênio (Trenkel, 2010).

Produtos da Agrotain Internacional para uso agrícola são: Agrotain (líquido, não aquoso), Agrotain Dry (concentrado seco), Agrotain Plus (concentrado seco, que contém NBPT e DCD) e Super U (ureia granulada com Agrotain Plus incorporado) (Trenkel, 2010).

Segundo Cantarella e Marcelino (2008), o uso combinado de inibidores de nitrificação e de urease, como exemplo NBPT e DCD, leva à redução de perdas por lixiviação ao retardar a formação de NO_3^- , mas ao manter no solo altas concentrações de NH_4^+ pode fazer com que a

taxa de volatilização de amônia aumente em relação aos tratamentos que recebem apenas NBPT. A combinação de inibidores precisa ser melhor avaliada, pois a reação de nitrificação no solo, que provoca a redução do pH e consome NH_4^+ , reduzindo as chances de perdas de NH_3 , em geral, ocorre em um prazo maior do que o do período de maior inibição do NBPT (3-5 dias em solos com altas temperaturas no Brasil).

O PPD mostrou resultados inconsistentes a campo, decompõe-se rapidamente no solo, produzindo o fenol (inibidor de urease relativamente fraco), decompõe-se também em estado sólido em misturas com ureia, perdendo sua ação inibidora em curto espaço de tempo (Cantarella e Marcelino, 2008).

Além do NBPT e do PPD, Trenkel (2010) também cita em sua revisão a existência de dois outros inibidores de urease: 2-NPT (triamida N-fenilfosfórica) e HQ (hidroquinona). O 2-NPT está sob procedimento de registro na União Européia e experimentos mencionam efeitos na absorção, eficiência de recuperação e eficiência de uso do nitrogênio, aumento de proteína bruta e produtividade e possível indicação indireta de redução de perdas de amônia, utilizando-se pequenas concentrações do produto (0,05-0,10% com base em N e 0,023-0,046% com base no produto ureia). A Hidroquinona (HQ) – 1,4 dihidroxibenzol é conhecida como inibidor de urease desde 1933, mas tem como desvantagem sua aparente toxicidade e classificação como mutagênico e carcinogênico, como também seu efeito negativo sob a germinação. A ureia tratada com hidroquinona, não apresentou efeito significativo para produtividade, absorção e eficiência de uso do nitrogênio, além de ser um composto fotossensível.

Sob altas temperaturas nitrificação, desnitrificação e amonificação do nitrogênio amida a amônio ocorrem rapidamente, mas a eficiência dos inibidores de nitrificação e urease decrescem com o aumento da temperatura, de modo que mais pesquisas em solos tropicais em diferentes condições ambientais precisam ser conduzidas com estes inibidores para comprovar sua eficiência em reduzir perdas de nitrogênio e aumentar a produtividade (Trenkel, 2010).

2.4.3. Limitações dos fertilizantes de eficiência aumentada

Ainda não há métodos padronizados para determinação segura do padrão de liberação de nutrientes dos fertilizantes de liberação lenta ou controlada, parece haver uma falta de correlação entre os dados de laboratório disponibilizados aos consumidores e o modelo de liberação de nutrientes que ocorre no campo (Shaviv, 2005).

Quando testam o padrão de liberação dos nutrientes, principalmente dos fertilizantes recobertos com polímeros ou encapsulados, muitos fabricantes determinam a duração de liberação de 80% do nutriente a 25 °C. Entretanto testes de 75 ou 80% de liberação indicam ao usuário que cerca de três quartos dos nutrientes podem ser liberados durante certo período, ignorando-se a possível existência de “burst”, liberação rápida de nutriente, logo no início de sua aplicação, que podem causar severas implicações agronômicas e ao meio ambiente, quando esta liberação inicial é muito grande. Essa liberação inicial é grande nos casos do SCU e UF ou fertilizantes recobertos com polímeros com grande proporção de grânulos danificados. Como também alguns produtos de reação química, como UF, parecem ter a liberação de nitrogênio nas formas disponíveis para planta de forma muito lenta (Trenkel, 2010).

Fertilizantes recobertos com enxofre, com padrão de liberação de nutrientes parabólico, com ou sem “burst”, podem liberar inicialmente nutrientes tão rapidamente, que podem causar danos a cultura, e a liberação final do nitrogênio para formas disponíveis para planta pode ser muito lenta ou mesmo incompleta. O custo dos fertilizantes recobertos com enxofre, com uma rápida liberação inicial de nutrientes mesmo sem causar danos ao

desenvolvimento das plantas, é maior comparando-se a quantidade equivalente de nitrogênio de fertilizantes solúveis convencionais (Trenkel, 2010). A aplicação de fertilizantes recobertos pode aumentar a acidez do solo, isso acontece quando uma grande quantidade de ureia recoberta com enxofre é aplicada, já que o S e ureia contribuem para aumento da acidez do solo. O que, por outro lado, pode favorecer a absorção de P e Fe (Trenkel, 2010). Fertilizantes de liberação controlada recobertos por polímeros ou encapsulados podem levar ao acúmulo de resíduos indesejáveis no solo, já que certos tipos de polímeros utilizados para recobrimento dos fertilizantes convencionais decompõem-se lentamente ou parcialmente no solo. De acordo com Shaviv (2005), a cobertura de poliolefina apresenta uma taxa de degradação menor que a de resinas alquílicas e resinas tipo poliuretano, os três principais utilizados na prática. Pesquisas buscam coberturas poliméricas degradáveis, entretanto sua decomposição não pode ser imediatamente após aplicação (Trenkel, 2010).

Muitas vezes as vantagens dos fertilizantes de liberação lenta ou controlada são comparadas com o uso de fertilizantes convencionais sem o emprego das boas práticas de manejo da adubação (Trenkel, 2010). Na agricultura moderna intensiva a quantidade ótima de fertilizante nitrogenado mineral segue monitoramento contínuo das condições de desenvolvimento da cultura e os produtores rurais preferem adaptar as aplicações nitrogenadas ao desenvolvimento da cultura e a produtividade almejada. Isso é incompatível com a prática de aplicação única de um fertilizante nitrogenado recoberto ou encapsulado na base ou no início do desenvolvimento da cultura, sem possibilidade de correção, caso seja aplicado em excesso (Trenkel, 2010).

O custo de produção da maior parte dos fertilizantes de liberação controlada é ainda consideravelmente maior que o dos fertilizantes minerais convencionais, impedindo seu largo uso (Trenkel, 2010). Segundo este mesmo autor os altos custos de produção decorrem de:

- Alguns fertilizantes terem que passar por processos complexos de produção.
- Separação por peneiras do material bruto em busca de melhor cobertura dos grânulos.
- O “coating” muitas vezes apresentar preço superior ao fertilizante a ser recoberto.
- Pequena escala de plantas de fertilizantes de liberação lenta ou controlada, em geral.
- Fertilizantes de liberação lenta ou controlada requerem um trabalho de abertura de mercado através de consultoria e assistência técnica especializadas.

No caso de fertilizantes estabilizados com adição de inibidores de nitrificação, estes podem favorecer o aumento da volatilização de amônia, se não forem incorporados ao solo imediatamente ou logo após aplicação (Trenkel, 2010). Dependendo do tipo de inibidor de nitrificação, a atividade da bactéria pode ser interrompida por um certo período de tempo, e algumas bactérias do solo podem ser mortas pela ação bactericida. Uma ação indesejável, mesmo que restrita ao local de aplicação do produto (Trenkel, 2010).

Experimentos mostram que a reposta ao uso do DCD, em termos de aumento produtividade da cultura, apenas ocorre em condições que predispõem a perdas de nitrogênio por lixiviação ou desnitrificação e quando estas perdas resultam em deficiência de nitrogênio. Entretanto, inibidores de nitrificação podem trazer benefícios ambientais para produção agrícola, mesmo sem gerar aumento de produtividade (Trenkel, 2010).

Segundo Gutser (1999), citado por Trenkel (2010) íons amônio estabilizados com inibidores de nitrificação e não absorvidos pelas plantas podem ser armazenados no solo e ficarem disponíveis para cultura subsequente, reduzindo a quantidade de nitrogênio requerida.

O aumento de produtividade é pequeno quando ureia tratada com inibidor de urease é aplicado em solos que são muito ricos em nitrogênio e alguns efeitos fitotóxicos passageiros podem ser observados, como queima das bordas das folhas, com o uso destes inibidores, havendo incertezas quanto às causas destes sintomas, se são efeitos diretos ou indiretos da

ureia, se é passageiro, e se somente ocorre em situações em que grandes quantidades de ureia e inibidores são utilizadas. Entretanto, os benefícios do NBPT de redução de amônia e aumento de produtividade, pareceram mais relevantes que a necrose na extremidade das folhas observada temporariamente (Watson e Miller, 1996).

Se os inibidores de nitrificação e urease estivessem disponíveis no mercado em diferentes formulações (líquida, suspensão, grânulos), seu uso poderia ser estimulado em pastagens de fazendas de gado (Trenkel, 2010).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Obtenção das Amostras e Caracterização dos Produtos

Foi realizado levantamento bibliográfico e pesquisa sobre fertilizantes nitrogenados sólidos a base de ureia com eficiência aumentada presentes no mercado nacional e internacional. Estes fertilizantes foram separados em categorias e selecionados dentro de cada grupo para aquisição. Foram adquiridos no comércio nacional e internacional, de forma aleatória, sem preocupação com lotes ou garantias mínimas exigidas em cada país de origem, em quantidades suficientes para montagem do experimento proposto.

Estes produtos foram analisados quanto ao teor de N total para dosagem dos fertilizantes nas parcelas experimentais.

O trabalho foi conduzido em casa de vegetação da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro (UFRRJ) – Figura 3, em Seropédica-RJ, no ano de 2011.



Figura 3. Casa de Vegetação UFRRJ.

Foi utilizado material de solo de textura arenosa, horizonte A (20 primeiros centímetros) de um Planossolo Háptico. Este foi coletado em área plana, em pousio coberta por gramíneas de regeneração natural (capim colonião) próxima ao Setor de Bovinocultura de Leite da UFRRJ (antiga rodovia RJ-SP, km47). Aproximadamente 2 meses antes da aplicação das fontes nitrogenadas, elevou-se o pH em água de parte do solo de 5,7 a 6,6 pela aplicação de calcário dolomítico, adotando-se doses e período de incubação previamente determinados para este solo por Stafanato (2009). Definindo-se para o fator pH dois tratamentos: pH natural do solo de 5,7 e pH após calagem de 6,6. Nas tabelas 7 e 8 apresentam-se os resultados das análises físicas e químicas dos solos, respectivamente, já se separando os solos em pH1 não calcariado e pH2, cujo pH foi elevado.

Tabela 7. Análise física do solo.

Identificação	Argila (%)		Areia (%)			Silte (%)	Grau de Floculação (%)	Classificação Sistema Brasileiro – SBCS	
	Natural	Total	Total	Fina	Grossa			Detalhada	Geral
pH1	3	6	86	16	70	7	54	Areia-franca	Arenosa
pH2	3	5	87	15	71	9	36	Areia-franca	Arenosa

Tabela 8. Análise química do solo.

Identificação	Na	Ca	Mg	K	$\frac{H^+}{Al}$	Al	S	T	V	m	pH	C _{org}	P	K
	cmol _c /dm ³					%					H ₂ O	%	mg/l	
pH1	0,075	1,4	0,6	0,14	1,2	0	2,21	3,37	66	0	5,7	0,72	21	54
pH2	0,052	2,5	1,2	0,16	0,7	0	3,91	4,57	86	0	6,6	0,88	31	62

Os fertilizantes nitrogenados pesquisados no mercado nacional e internacional foram agrupados do seguinte modo: fontes convencionais (ureia, sulfato de amônio, nitrato de amônio), ureia recoberta com polímeros (ESN, Polyon-PCU Polymer coated urea, Meister, Kimcoat LGU, Duration Urea, PCU – Kingenta, SurfCote-N, XRT, Poly Plus Sulphur Coated Urea, Producote), ureia com inibidores de volatilização e/ou lixiviação (Super N, Super U, Umax, Uflexx), ureia aldeído (Nitroform, IBDU, CDU, Sazolene UF60 Granular, UF, Nutralene, Sazolene MU80, Smart Nitrogen™, Nitro-30 SRN, Nitamin Nfusion, Methylene 75, Ciclus NS, ureia formadeído) e ureia recoberta com enxofre (SCU, XCU, FH Nitro Gold, Poly Plus Sulphur Coated Urea, Producote). Em seguida os produtos foram selecionados dentro de cada grupo, tendo como critérios: diferenças de tecnologia entre os produtos (diferentes polímeros, diferentes inibidores, diferentes compostos aldeídos, diferentes recobrimentos) e facilidade de aquisição, priorizando empresas nacionais (sem necessidade de importação). Desta forma foram definidos 17 produtos comerciais para o experimento:

- fontes convencionais (ureia, sulfato de amônio, nitrato de amônio).
- ureia recoberta com polímeros (ESN, Meister LP coat L30, Meister LPS30, Kimcoat LGU).
- ureia com inibidores de volatilização e/ou lixiviação (Super N e Super U).
- ureia aldeído (Ureia Formaldeído, Methylene 75, Ciclus NS, IBDU, CDU).
- ureia recoberta com enxofre (Poly Plus Sulphur Coated Urea, Producote, FH Nitro Gold).

Nas tabelas 9 e 10 caracterizam-se os produtos utilizados no experimento.

Tabela 9. Produtos, fabricantes e obtenção das amostras.

Produto	Fabricante	Obtenção das amostras
IBDU	JCAM Agri Co. Ltd. (Japão)	Doação fabricante
CDU	JCAM Agri Co. Ltd. (Japão)	Doação fabricante
Methylene 75	Sadepan Chimica (Itália)	Semiarid Prairie Agricultural Research Centre via distribuidor canadense
Ciclus NS	Café Brasil Fertilizantes (Brasil)	Doação fabricante
Ureia Formaldeído*	Café Brasil Fertilizantes (Brasil)	Doação fabricante
Poly Plus Sulphur Coated Urea "29-00-00 Lesco"	Lesco (USA)	Semiarid Prairie Agricultural Research Centre via distribuidor canadense
Producote	Produquímica (Brasil)	Doação fabricante
FH Nitro Gold	Heringer (Brasil)	Embrapa Solos
Meister "LP coat L30"	JCAM Agri Co. Ltd. (Japão)	Doação fabricante
Meister - "LPS 30"	JCAM Agri Co. Ltd. (Japão)	Doação fabricante
ESN	Agrium (Canadá)	Semiarid Prairie Agricultural Research Centre via distribuidor canadense
Kimcoat LGU	Kimberlit (Brasil)	Doação fabricante
Super U	Agrotain International (Argentina)	Doação fabricante
Super N	Fertipar Bandeirantes (Brasil)	Doação fabricante
Ureia	Não identificado (Brasil)	UFRRJ
Nitrato de Amônio	Não identificado (Brasil)	UFRRJ
Sulfato de Amônio	Não identificado (Brasil)	UFRRJ

* produto não comercial – matéria-prima para fabricação do Ciclus NS.

Tabela 10. Produtos, características técnicas, concentração de N informada e granulometria.

Produto	Características técnicas	Concent. N informada	Granulometria
IBDU	Isobutilidene diurea - produto da condensação de ureia e isobutialdeído	32%	2-4mm
CDU	Crotonilidene diureia - produto da condensação da uréia e acetaldeído	31%	2-4mm
Methylene 75	Ureia formaldeído (metileno ureia) - produto da condensação de uréia e formaldeído	39%	1-2mm
Ciclus NS	Uréia formaldeído (metileno ureia) + sulfato de amônio (7%S)	30%	< 1mm
Ureia Formaldeído*	Uréia formaldeído (metileno ureia)	35%	< 1mm
Poly Plus Sulphur Coated Urea	Uréia revestida com enxofre (22%S) e polímero	29%	<1,4mm
Producote	Uréia revestida com enxofre (11% de S) e polímero orgânico	39%	2-4mm
FH Nitro Gold	Uréia revestida com enxofre (16% S)	37%	2-4mm
Meister - "LP coat L30"	Uréia revestida com polímero (resina de acetato vinil etileno e polietileno) - liberação linear	42%	2-4mm
Meister - "LPS 30"	Uréia revestida com polímero (resina de acetato vinil etileno e polietileno) - liberação sigmoidal	40%	2-4mm
ESN	Uréia revestida com polímero	39	2-4mm
Kimcoat LGU	Uréia revestida com polímero biodegradável	41	2-4mm
Super U	Uréia com 0,07% NBPT e 0,85% DCD	46	2-4mm
Super N	Uréia com 2,5 l NBPT /t	45	2-4mm
Ureia	Ureia	45	1-2 mm
Nitrato de Amônio	Nitrato de Amônio P.A.	34,3	1-2 mm
Sulfato de Amônio	Sulfato de Amônio	21	<1mm

* produto não comercial – matéria-prima para fabricação do Ciclus NS.

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado em arranjo fatorial de 18 x 2, sendo os fatores: (1) fertilizantes nitrogenados + testemunha absoluta (tratamento controle – sem N) e (2) pHs; com 4 repetições, totalizando 144 parcelas experimentais.

Os tratamentos consistiram em aplicações da mesma quantidade de nitrogênio (N) de cada fertilizante nitrogenado, a dose correspondeu a 120 kg N/ha. As aplicações foram em superfície em solo arenoso sob 2 pHs (5,7 e 6,6).

3.2. Análises de Volatilização e Lixiviação em Casa de Vegetação

As unidades experimentais foram construídas utilizando tubos de PVC de 100 mm de diâmetro e altura de 0,6 m, tendo na parte inferior duas reduções de 100 x 50 mm e de 50 x 40 mm. A primeira redução (100 x 50 mm) foi preenchida com brita número 01 (granulometria de cerca de 19 mm), descontaminada, de modo que a altura média de brita foi de 25 mm. As extremidades inferiores e superiores foram revestidas com material filtrante, constituído por uma tela de nylon, para evitar perda de solo ou turvamento das amostras do material a ser coletado nos ensaios de lixiviação, em potes coletores. A base dos tubos foi aquecida e as reduções fixadas. Os tubos e as reduções foram vedados com silicone (Figura 4).



Figura 4. Montagem da unidade experimental (tubo de PVC, reduções, brita e tela de nylon).

A brita foi descontaminada com água corrente e permaneceu em repouso por 48 h em uma solução de ácido clorídrico a 5%. Ao final dessa etapa, a brita foi enxaguada com água deionizada por 3 vezes e colocada para secar, antes de serem utilizadas nas colunas de solo.

O preenchimento das colunas (Figura 5), iniciado pela base, foi feito com terra fina seca ao ar (TFSA), devidamente homogeneizada, a qual foi submetida a uma leve compactação com um Becker, para evitar diferença na acomodação do substrato. Na parte superior de cada coluna foram deixados 4 cm sem solo para possibilitar a adição da solução de percolação, simulando precipitações.

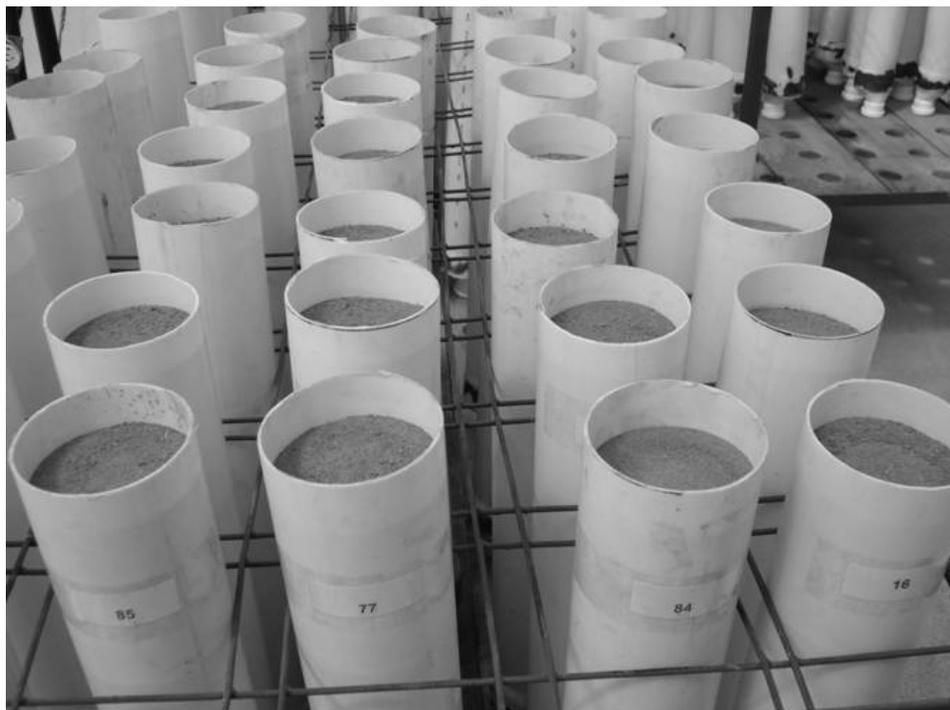


Figura 5. Colunas preenchidas com solo arenoso.

A câmara coletora de amônia utilizada foi a proposta por Araújo et al (2009). Esta câmara semi-aberta livre estática (Figura 6) é confeccionada a partir de frasco plástico transparente tipo garrafa PET de 2 l sem a base, com diâmetro de 0,1 m, abrangendo 0,008 m² de área. No seu interior é fixado com auxílio de arame galvanizado revestido e elástico um frasco plástico aberto de 50 ml contendo 10 ml de solução de H₂SO₄ 1 mol + glicerina 2% (v/v), de modo que o frasco fique acima da superfície do solo, cerca de 15 mm. Uma lâmina de espuma de poliuretano com 3 mm de espessura, 25 mm de largura e 250 mm de comprimento umedecida na solução do frasco fica esticada dentro da câmara, presa pela parte superior pelo mesmo arame galvanizado revestido de PVC responsável pela suspensão do frasco e sua base fica mergulhada no frasco de 50 ml com solução de ácido sulfúrico e glicerina. A amônia volatilizada é capturada por essa lâmina na forma de (NH₄)₂SO₄, de forma que a cada coleta frasco com solução e espuma é retirado e tampado para posterior quantificação da amônia em laboratório, sendo substituído por novo frasco, com solução e espuma nova para coleta subsequente.

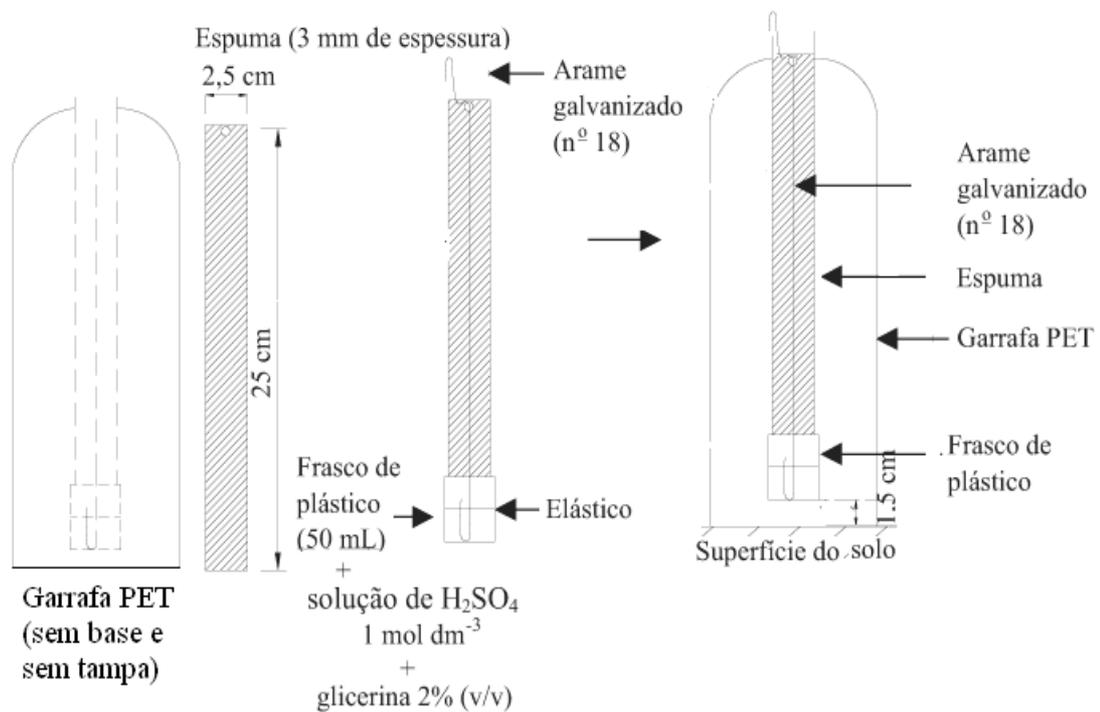


Figura 6. Câmara coletora de NH_3 semiaberta livre estática. Fonte: adaptado de Araújo et al. (2009).

A câmara coletora de amônia foi encaixada nas unidades experimentais (tubos de PVC) conforme Figura 7.



Figura 7. Câmara coletora de amônia encaixada em unidades experimentais.

A umidade do substrato contido nas colunas foi mantida entre 50 e 70% da capacidade de campo. A capacidade de campo deste solo foi determinada a partir da saturação do solo, seguida de sua drenagem, para tanto se utilizou uma quantidade conhecida de solo em copos plásticos (3 repetições) adicionou-se água e furou-se a base dos copos para drenagem da água (Tabela 11).

Tabela 11. Determinação da capacidade de campo do solo.

Repetição	Peso solo (TFSA) (g)	Peso do copo (g)	Peso (após drenagem) (g)	Água retida (g)	CC % estimada
c1	100,00	2,42	125,97	23,55	23,55
c2	100,00	2,47	128,45	25,98	25,98
c3	100,00	2,48	126,50	24,02	24,02
Capacidade de Campo Média (%)					24,52

Após a primeira irrigação (19 de setembro de 2011 - 770 milímetros de água) instalaram-se as câmaras coletoras de N-NH₃, realizando-se a primeira coleta (coleta zero) dois dias após irrigação. A umidade do solo continuou sendo monitorada até o final do experimento, através da pesagem de três colunas controle e realizaram-se irrigações periódicas de 20 mililitros por coluna (equivalente a uma lâmina de irrigação de 2,5 milímetros) de 6 em 6 dias visando à manutenção da umidade do solo na capacidade de campo. Essas irrigações foram feitas com auxílio de funil e chuveirinho plásticos para uniformizar a distribuição da lâmina de água e reduzir a incorporação do fertilizante.

Após a coleta zero, os fertilizantes foram aplicados na superfície do solo das colunas (0,10 m de diâmetro) na dose equivalente a 120 kg N ha⁻¹ (96 mg de N, por coluna, considerando-se a área aproximada de aplicação de 0,008 m²), conforme Figura 8.



Figura 8. Aplicação dos fertilizantes na coluna.

Para cálculos da quantidade de fertilizante a ser aplicada de cada fonte consideraram-se os resultados das análises de N total presente em cada fonte da Tabela 12.

Tabela 12. Análise de N das fontes nitrogenadas e quantidade aplicada por coluna.

Categorias	Produtos (Nome Comercial)	% analisada de N	Quantidade aplicada/coluna (mg)
Fertilizantes de liberação lenta - Ureia aldeído	IBDU - "Super IB'	32,5	295
	CDU - 6-8 Mesh (2.4 - 3.3 mm)	31,1	309
	Methylene 75	38,7	248
	Ciclus NS	32,5	295
	Ureia Formaldeído	37,5	256
Fertilizantes de liberação lenta ou controlada - Ureia revestida com enxofre/polímero	Poly Plus Sulphur Coated Urea "29-00-00 Lesco"	28,4	338
	Producote	39,8	241
	FH Nitro Gold	42,1	228
Fertilizantes de liberação controlada - Ureia revestida com polímero	Meister - "LP coat L30"	46,2	208
	Meister - "LPS 30"	44,4	216
	ESN	38,9	247
	Kimcoat LGU	42,4	226
Fertilizantes estabilizados - com inibidores volatilização e/ou lixiviação	Super U	46,4	207
	Super N	45,7	210
Fertilizantes Convencionais	Uréia	45,0	213
	Nitrato de Amônio	34,3	280
	Sulfato de Amônio	21,0	457

Os fertilizantes de eficiência aumentada que foram utilizados no experimento foram inicialmente analisados a partir do método da liga de Raney, um dos métodos indicados pela AOAC (Association of Official Analytical Chemists), mas não foram obtidos resultados satisfatórios, por dificuldades na digestão destes fertilizantes. Assim optou-se por um método não tradicional da ASTM (American Society for Testing and Materials), utilizado para determinação de C, H e N em produtos do petróleo e lubrificantes. Este método consistiu no preparo de 7 gramas de amostra, a partir de trituração e posterior análise automática em equipamento ThermoFinnigan FLASH A1112, sendo o resultado (média de três determinações) apresentado na Tabela 12. Neste equipamento a amostra sofre combustão para conversão do material em dióxido de carbono, vapor d'água e nitrogênio elementar, que são separados por eluição em uma coluna de carbono ativo para posterior quantificação do N através de um detector de condutividade térmica. Para validação desta metodologia para fertilizantes nitrogenados utilizou-se como padrão uma amostra de referência internacional

BCR 179 com 46,54 % N, com variação de 0,08% para cima ou para baixo, obtendo-se resultado de 46,6% N.

Imediatamente, após a adição do fertilizante, foram instaladas as câmaras coletoras de N-NH₃, uma em cada unidade experimental (coluna - tubo de PVC). Na Figura 9 apresenta-se uma visão geral das unidades experimentais com as câmaras coletoras de amônia.



Figura 9. Unidades experimentais e câmaras coletoras.

No ensaio de volatilização as coletas do volatilizado foram realizadas até o octagésimo quarto dia após aplicação dos fertilizantes, de maneira intercalada, da seguinte forma: em intervalos de 24 horas até o sexto dia; e após, as determinações foram realizadas em intervalos de 144 horas, ou seja, de seis em seis dias, no décimo segundo dia, décimo oitavo, vigésimo quarto, trigésimo, trigésimo sexto, quadragésimo segundo, quadragésimo oitavo, quinquagésimo quarto e sexagésimo, sexagésimo sexto, septuagésimo segundo, septuagésimo oitavo e octagésimo quarto dia após aplicação dos fertilizantes, totalizando 19 coletas. O intervalo entre coletas das espumas pode variar de um a seis dias, conforme Araújo et al (2009), sem comprometimento da eficiência do sistema.

Assim, o experimento de volatilização consistiu de 144 unidades experimentais (considerando os 17 produtos testados e testemunha sem aplicação de N sob 2 pHs). Onde a cada coleta foram obtidas 144 amostras do N volatilizado, totalizando ao final de 20 coletas 2880 análises de N-NH₃ volatilizada.

As amostras de N-NH₃ volatilizada capturadas pelas lâminas de espuma foram conservadas nos frascos plásticos fechados ao abrigo da luz e calor excessivos e posteriormente foram analisadas.

A determinação do N-NH₃ retido na espuma foi realizada por destilação e titulação. Aos frascos contendo as lâminas de espuma adicionaram-se 10 ml de água destilada, em seguida os mesmos foram levados a um agitador horizontal a 220 rpm por 20 min. Eles foram pesados e descontou-se o peso do frasco vazio e da espuma, para quantificação do volume total da solução, considerando-se densidade desta de 1 g/cm³. Uma alíquota de 5 ml foi

analisada a partir de destilação por vapor com adição de NaOH a 40% e posterior titulação com H₂SO₄, para a quantificação do N amoniacal conforme Alves et al. (1994).

Como este tipo de coletor (câmara estática semiaberta) subestima a volatilização de NH₃, foi utilizado fator de correção para casa de vegetação de 1,48 para estimar a taxa real de volatilização de amônia do solo, de acordo com eficiência de recuperação de N-NH₃ do solo de cerca de 67% obtida em experimento em casa de vegetação com circulação de ar interna de Araújo et al (2009).

Após o octagésimo quarto dia, ou seja, após as avaliações de volatilização, foram simuladas quatro precipitações. No primeiro dia a lâmina aplicada foi de 200 milímetros e nos demais dias de 100 milímetros. As coletas das soluções lixiviadas foram realizadas diariamente.

As amostras de lixiviados foram conservadas em freezer e, posteriormente, analisadas para determinação de amônio e de nitrato/nitrito, através da destilação da amostra com MgO e liga de Devarda, respectivamente, em destilador de arraste por vapor, como descrito por Tedesco et al, (1995). Logo foram realizadas 576 análises de amônio e 576 análises de nitrato/nitrito.

3.3. Nitrogênio Residual

Objetivando determinar o nitrogênio residual do fertilizante no solo após o período de avaliação das perdas deste nutriente por volatilização (84 dias) e lixiviação (4 dias), coletaram-se amostras de solo para determinação do nitrogênio mineral do solo (nitrogênio inorgânico).

Logo após a lixiviação, amostras de solo foram retiradas das colunas em 3 profundidades: 0-10 cm, 10-30 cm e 30 à base da coluna. As amostras foram congeladas e depois analisadas segundo metodologia descrita por Tedesco et al (1995). Realizando-se primeiro o procedimento de extração, a partir de 5 gramas de solo úmido colocados em frascos erlenmeyer com capacidade de 125 ml com adição de 50 ml de solução de KCl 1 mol L⁻¹, sob agitação a 220 rpm, por 30 minutos. O extrato foi filtrado e a solução do solo extraída. Esta solução foi armazenada em freezer e, posteriormente analisada para determinação de amônio e nitrato/nitrito pela metodologia descrita por Tedesco et al (1995).

Desta forma foram realizadas 432 análises de amônio e 432 análises de nitrato/nitrito, cuja somatória permitiu a determinação do nitrogênio mineral (inorgânico) presente em cada amostra. Para determinação do nitrogênio residual do fertilizante considerou-se a contribuição de nitrogênio do solo como sendo igual a do tratamento controle (sem nitrogênio aplicado), subtraindo-se a quantidade de nitrogênio mineral média das testemunhas dos demais tratamentos para avaliação do nitrogênio residual de cada tratamento, em cada profundidade da coluna.

3.4. Análise Estatística

O delineamento experimental foi inteiramente casualizado em arranjo fatorial de 18 x 2, sendo os fatores: (1) fertilizantes nitrogenados + testemunha absoluta (tratamento controle – sem N) e (2) pHs; com 4 repetições, totalizando 144 parcelas experimentais.

Foi realizada análise de variância e havendo diferença estatística entre os tratamentos, a comparação de médias foi realizada através de teste de Tukey, a 5%.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Volatilização - Análise Primeiro Período (6 dias)

Considerando as perdas dos diferentes tratamentos nos primeiros 6 dias após aplicação dos fertilizantes, período em que as coletas de volatilizado foram diárias, a análise de variância não mostrou diferença estatística para pHs, mas mostrou para fertilizantes, coletas e interações de segunda e terceira ordem entre fertilizantes e coletas e pHs. Na Figura 10 e Tabela 13 observam-se as perdas de N-NH₃ em kg/ha ao longo destas 6 coletas, onde os fertilizantes que tiveram maiores perdas foram ureia, Super U, Kimcoat LGU e FH NitroGold. As fontes que tiveram menores perdas, próximas à da testemunha foram sulfato de amônio (AS), nitrato de amônio (NA), IBDU, CDU, Meister LPS30, Meister LP coat L30, Methylene e Ciclus NS.

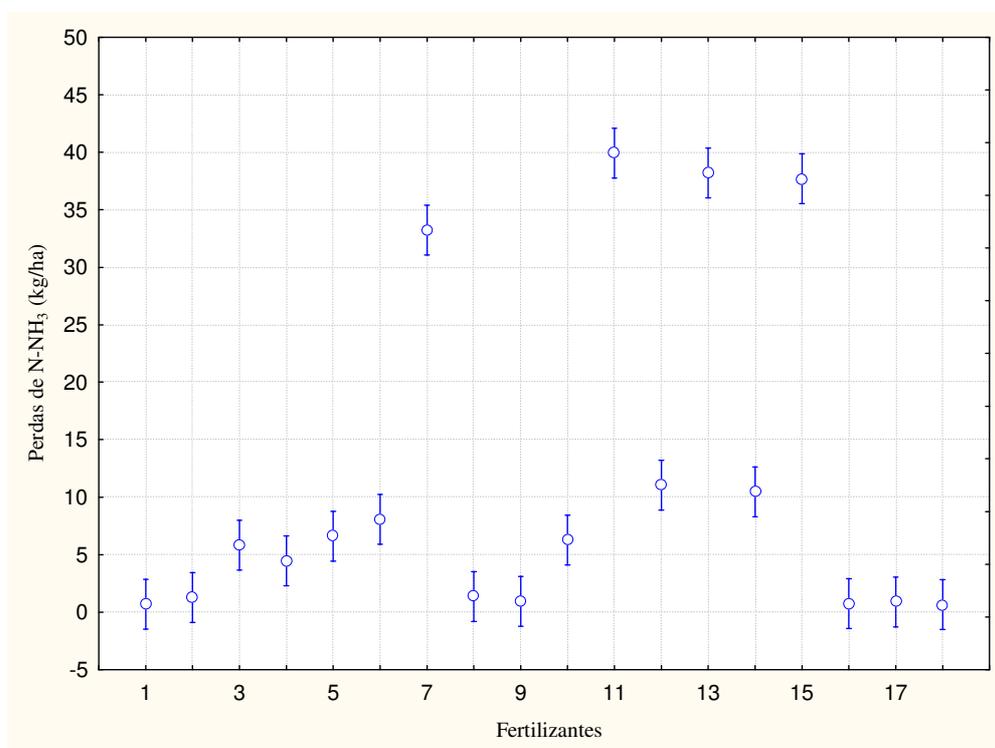


Figura 10. Perda total de N-NH₃ (kg/ha) nos 6 primeiros dias após aplicação dos fertilizantes nitrogenados. Onde, Fertilizantes de liberação lenta – ureia aldeído: 1 (IBDU – 32,5% N), 2 (CDU-31,1%N), 3 (Methylene 75 – 38,7%N), 4 (Ciclus NS-32,5%N), 5 (Ureia Formadeído-37,5%N); Fertilizantes de liberação lenta ou controlada – ureia recoberta por enxofre/polímero: 6 (Poly Plus Sulphur Coated Urea – 28,4%N), 12 (Productote – 39,8%N), 7 (FH Nitro Gold - 42,1%N); Fertilizantes de liberação controlada – ureia recoberta com polímero: 8 (Meister “LP coat L30” – 46,2%N), 9 (Meister “LPS30” – 44,4%N), 10 (ESN-38,9%N), 11 (Kimcoat LGU – 42,4%N); Fertilizantes estabilizados – com inibidores de volatilização ou lixiviação: 13 (Super U-46,4%N), 14 (Super N – 45,7%N); Fertilizantes Convencionais: 15 (Ureia – 45,0%N), 16 (Nitrato de amônio – 34,3%N), 17 (Sulfato de amônio – 21,0%N); Testemunha Absoluta: 18 (sem adição de fonte nitrogenada). As barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%.

Tabela 13. Somatória de perdas de N-NH₃ (kg/ha) dos fertilizantes no período de 6 dias após aplicação do fertilizante nitrogenado.

Fertilizante	Perda N-NH ₃ (kg/ha)
Kimcoat	39,930 a
Super U	38,211 ab
Ureia	37,699 ab
Nitro Gold	33,23 b
Producote	11,041 c
Super N	10,468 c
PPSCU	8,070 cd
UF	6,605 cde
ESN	6,259 cdef
Methylene	5,828 cdefg
Ciclus NS	4,461 defg
Meister L30	1,356 efg
CDU	1,278 efg
Meister LPS30	0,926 fg
AS	0,892 fg
NA	0,734 fg
IBDU	0,678 g
Testemunha	0,651 g

Médias seguidas de mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,05).

Considerando-se os 6 primeiros dias após aplicação dos fertilizantes, as maiores perdas de N-NH₃ ocorreram no primeiro e segundo dia após aplicação da fonte nitrogenada (Figura 11), destacando-se as perdas da ureia, Super U, Kimcoat LGU e FH NitroGold (Figura 12). Producote e PPSCU tiveram um pequeno pico de perda de N no segundo dia e Super N no sexto dia.

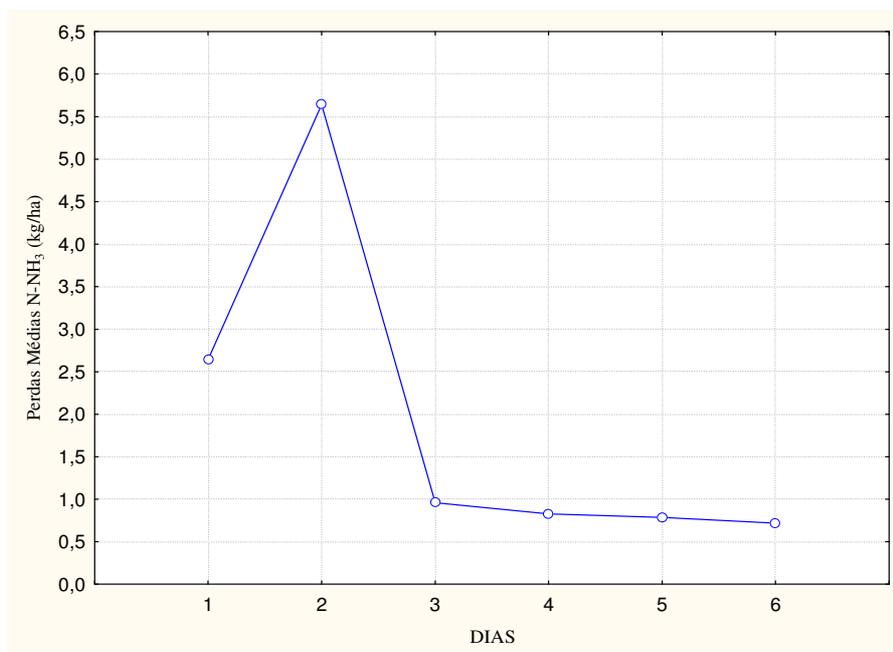


Figura 11. Perdas Médias de N-NH₃ de todos os tratamentos das coletas diárias realizadas ao longo dos 6 primeiros dias após aplicação dos fertilizantes.

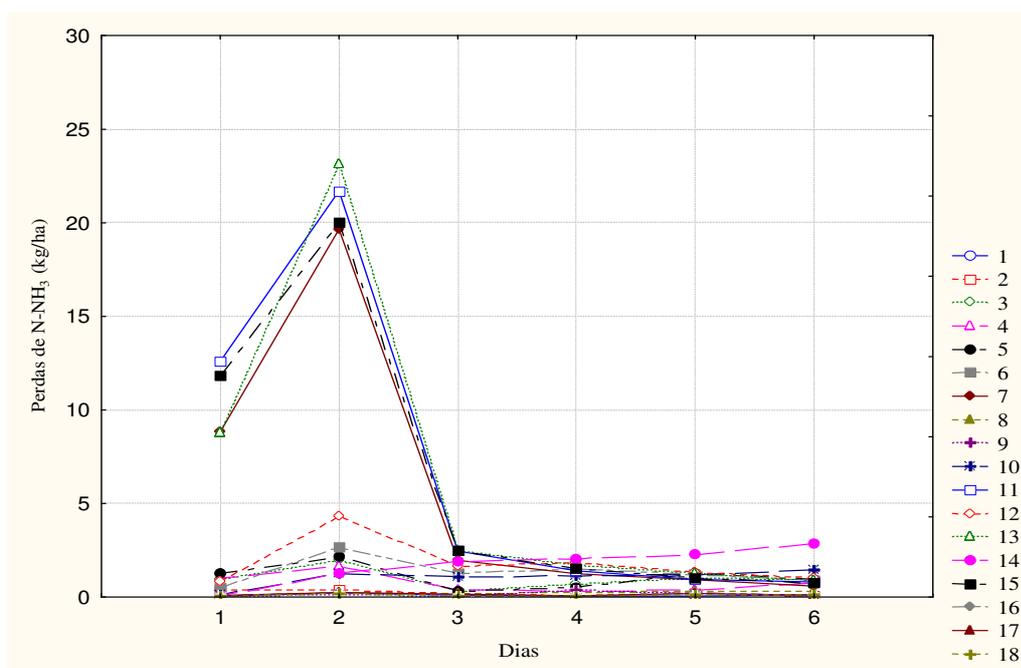


Figura 12. Perdas de N-NH₃ dos diferentes fertilizantes em função dos dias após aplicação dos fertilizantes nitrogenados. Onde, Fertilizantes de liberação lenta – ureia aldeído: 1 (IBDU – 32,5% N), 2 (CDU-31,1%N), 3 (Methylene 75 – 38,7%N), 4 (Ciclus NS-32,5%N), 5 (Ureia Formadeído-37,5%N); Fertilizantes de liberação lenta ou controlada – ureia recoberta por enxofre/polímero: 6 (Poly Plus Sulphur Coated Urea – 28,4%N), 12 (Producote – 39,8%N), 7 (FH Nitro Gold - 42,1%N); Fertilizantes de liberação controlada – ureia recoberta com polímero: 8 (Meister “LP coat L30” – 46,2%N), 9 (Meister “LPS30” – 44,4%N), 10 (ESN-38,9%N), 11 (Kimcoat LGU – 42,4%N); Fertilizantes estabilizados – com inibidores de volatilização ou lixiviação: 13 (Super U-46,4%N), 14 (Super N – 45,7%N); Fertilizantes Convencionais: 15 (Ureia – 45,0%N), 16 (Nitrato de amônio – 34,3%N), 17 (Sulfato de amônio – 21,0%N); Testemunha Absoluta: 18 (sem adição de fonte nitrogenada).

Comparando-se a perda média de amônia dos fertilizantes no pH1 e pH2 (Figura 13) não houve diferença estatística.

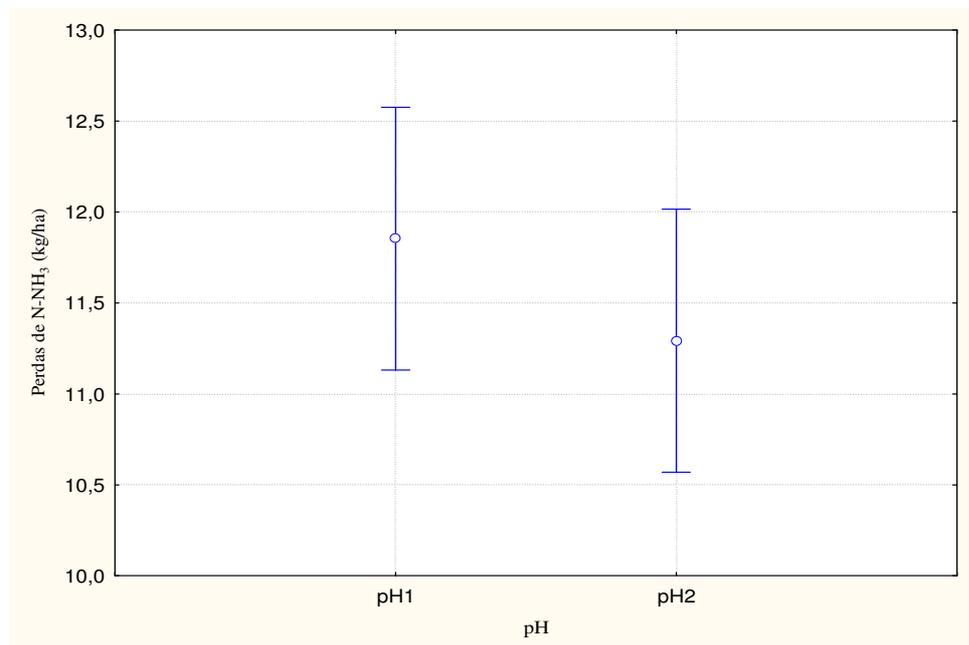


Figura 13. Perda média de N-NH₃ (kg/ha) dos diferentes fertilizantes sob 2 pHs durante os 6 primeiros dias após aplicação dos fertilizantes. Onde pH1 em água é 5,7 e pH2 em água é 6,6. As barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%.

Comparando-se as perdas totais dos diferentes fertilizantes ao longo das 6 primeiras coletas com o pH (Figura 14), observa-se graficamente diferença estatística entre as perdas no pH1 e no pH2, apenas para o Super N, onde a perda foi maior no pH menos elevado.

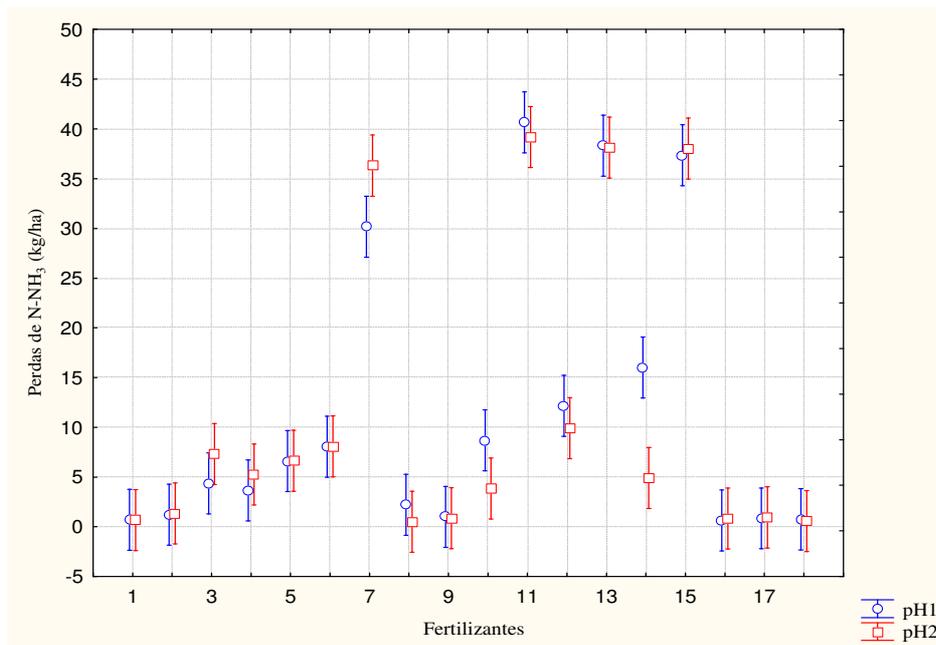


Figura 14. Perda total de N-NH₃ dos diferentes fertilizantes em função do pH nos 6 primeiros dias após aplicação dos fertilizantes nitrogenados. Onde, pH1 é 5,7 e pH2 é 6,6. Fertilizantes de liberação lenta – ureia aldeído: 1 (IBDU – 32,5% N), 2 (CDU-31,1%N), 3 (Methylene 75 – 38,7%N), 4 (Ciclus NS-32,5%N), 5 (Ureia Formadeído-37,5%N); Fertilizantes de liberação lenta ou controlada – ureia recoberta por enxofre/polímero: 6 (Poly Plus Sulphur Coated Urea – 28,4%N), 12 (Producote – 39,8%N), 7 (FH Nitro Gold – 42,1%N); Fertilizantes de liberação controlada – ureia recoberta com polímero: 8 (Meister “LP coat L30” – 46,2%N), 9 (Meister “LPS30” – 44,4%N), 10 (ESN-38,9%N), 11 (Kimcoat LGU – 42,4%N); Fertilizantes estabilizados – com inibidores de volatilização ou lixiviação: 13 (Super U-46,4%N), 14 (Super N – 45,7%N); Fertilizantes Convencionais: 15 (Ureia – 45,0%N), 16 (Nitrato de amônio – 34,3%N), 17 (Sulfato de amônio – 21,0%N); Testemunha Absoluta: 18 (sem adição de fonte nitrogenada). As barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%.

Houve interações entre coletas e pHs, no segundo e sexto dias após aplicação dos fertilizantes, nos demais dias não houve diferença estatística. Na coleta 2, as perdas de N-NH₃ foram maiores no pH2, período em que ocorreram os picos de perdas de Nitro Gold, Kimcoat, Super U e ureia. Na sexta coleta as perdas foram significativamente maiores no pH1, período em que há um pico de perda de amônia pelo Super N (Figura 15).

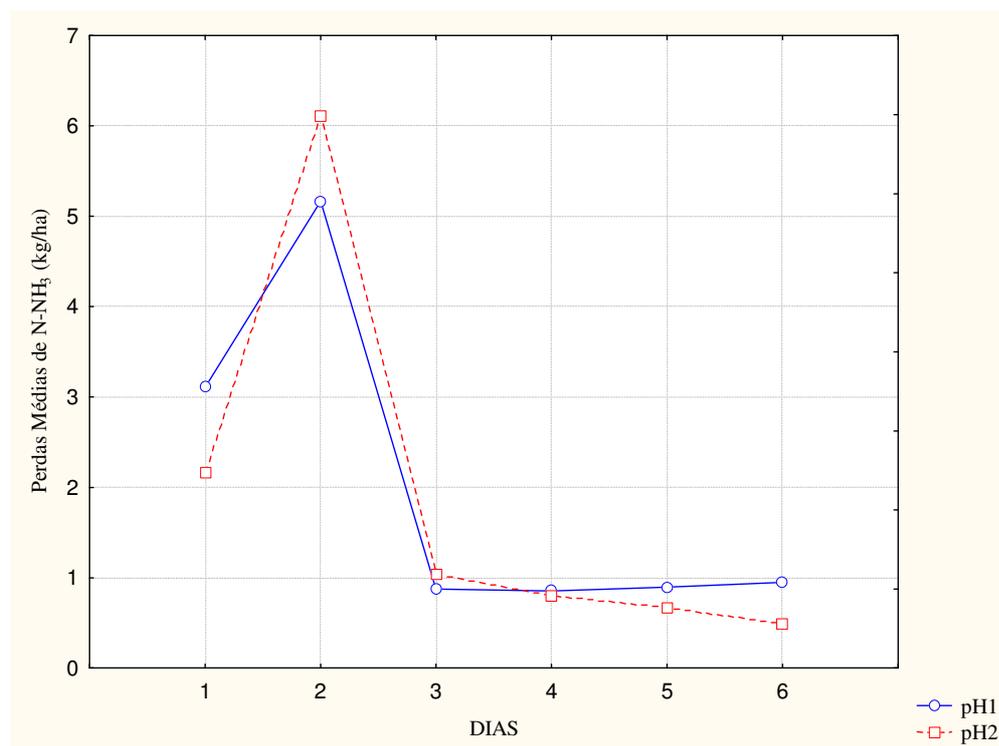


Figura 15. Perdas médias de N-NH₃ (kg/ha) dos diferentes fertilizantes sob 2 pHs nos 6 primeiros dias após aplicação dos fertilizantes. Onde pH1 em água é 5,7 e pH2 em água é 6,6.

Na tabela 14 apresenta-se a perda total de N-NH₃ dos tratamentos nos seis primeiros dias após aplicação dos fertilizantes nitrogenados e em seguida nas figuras 16 à 19, estes mesmos resultados são apresentados graficamente comparando-se cada categoria de produto com os fertilizantes convencionais e a testemunha.

Na Figura 16 destaca-se a maior eficiência do grupo dos fertilizantes de liberação lenta – ureia aldeído e do sulfato de amônio e nitrato de amônio em termos de menores perdas de amônia por volatilização em relação à ureia convencional. Estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% não houve diferença entre sulfato de amônio, nitrato de amônio, testemunha, CDU, IBDU, Methylene, Ciclus NS e Ureia Formaldeído, mas todos estes tratamentos tiveram menores perdas em relação à ureia.

Na Figura 17 destaca-se a maior eficiência do Poly Plus Sulphur Coated Urea e do Producote em termos de menores perdas de amônia em relação à ureia e ao Nitro Gold, que estatisticamente não diferem entre si. Sulfato de amônio e nitrato de amônio mostraram menores perdas em comparação aos demais produtos apresentados na figura e a quantidade volatilizada de amônia estatisticamente foi igual a da testemunha.

Tabela 14. Perda total de N-NH₃ dos tratamentos nos 6 primeiros dias após aplicação dos fertilizantes nitrogenados.

Categorias	pH	Produtos (Nome Comercial)	Perdas de N-NH₃ (kg/ha)
Fertilizantes de liberação lenta - Uréia aldeído	pH1	IBDU	0,691 f
	pH2	IBDU	0,666 f
	pH1	CDU	1,213 f
	pH2	CDU	1,344 ef
	pH1	Methylene 75	4,357 def
	pH2	Methylene 75	7,299 def
	pH1	Ciclus NS	3,662 def
	pH2	Ciclus NS	5,260 def
	pH1	Uréia Formaldeído	6,593 def
	pH2	Uréia Formadeído	6,618 def
Fertilizantes de liberação lenta ou controlada - Uréia revestida com enxofre/polímero	pH1	Poly Plus Sulphur Coated Urea	8,066 cdef
	pH2	Poly Plus Sulphur Coated Urea	8,074 cdef
	pH1	Producote	12,166 cd
	pH2	Producote	9,917 cde
	pH1	FH Nitro Gold	30,160 b
	pH2	FH Nitro Gold	36,310 ab
Fertilizantes de liberação controlada - Uréia revestida com polímero	pH1	Meister “LP coat L30”	2,208 ef
	pH2	Meister “LP coat L30”	0,504 f
	pH1	Meister “LPS 30”	1,001 f
	pH2	Meister “LPS 30”	0,850 f
	pH1	ESN	8,683 cdef
	pH2	ESN	3,834 def
	pH1	Kimcoat LGU	40,666 a
	pH2	Kimcoat LGU	39,195 a
Fertilizantes estabilizados – inib. volat. e/ou lixiviação	pH1	Super U	38,302 ab
	pH2	Super U	38,120 ab
	pH1	Super N	16,024 c
	pH2	Super N	4,911 def
Fertilizantes Convencionais	pH1	Uréia	37,357 ab
	pH2	Uréia	38,040 ab
	pH1	Nitrato de Amônio	0,629 f
	pH2	Nitrato de Amônio	0,839 f
	pH1	Sulfato de Amônio	0,844 f
	pH2	Sulfato de Amônio	0,940 f
Testemunha	pH1	Sem N	0,747 f
	pH2	Sem N	0,556 f

Médias seguidas de mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,05).

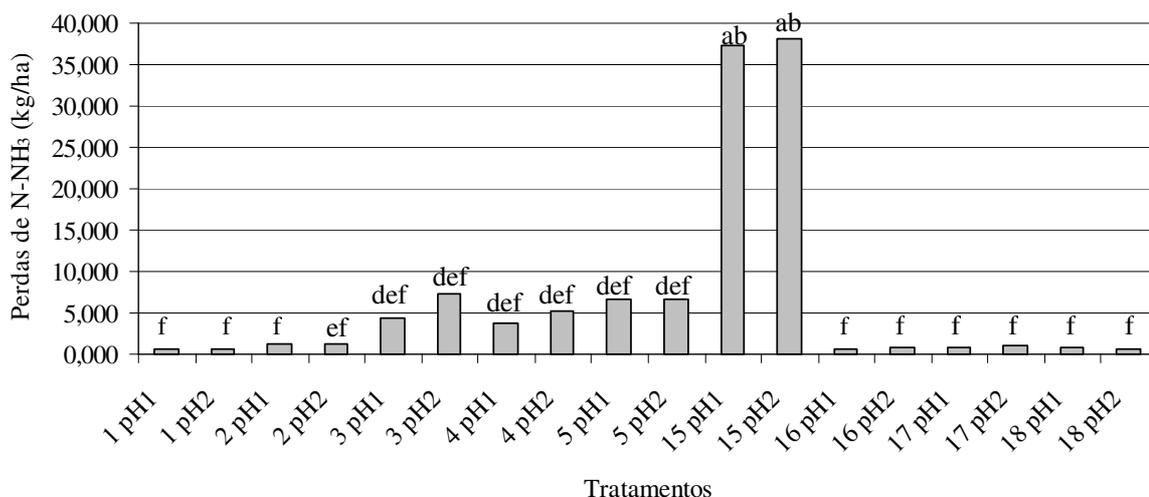


Figura 16. Perda total de N-NH₃ dos fertilizantes de liberação lenta – ureia aldeído em comparação com fertilizantes convencionais e testemunha nos 6 primeiros dias após aplicação dos fertilizantes nitrogenados. Onde, pH1 é 5,7 e pH2 é 6,6. Fertilizantes de liberação lenta – ureia aldeído: 1 (IBDU – 32,5% N), 2 (CDU-31,1%N), 3 (Methylene 75 – 38,7%N), 4 (Ciclus NS-32,5%N), 5 (Ureia Formadeído-37,5%N); Fertilizantes Convencionais: 15 (Ureia – 45,0%N), 16 (Nitrato de amônio – 34,3%N), 17 (Sulfato de amônio – 21,0%N); Testemunha Absoluta: 18 (sem adição de fonte nitrogenada).

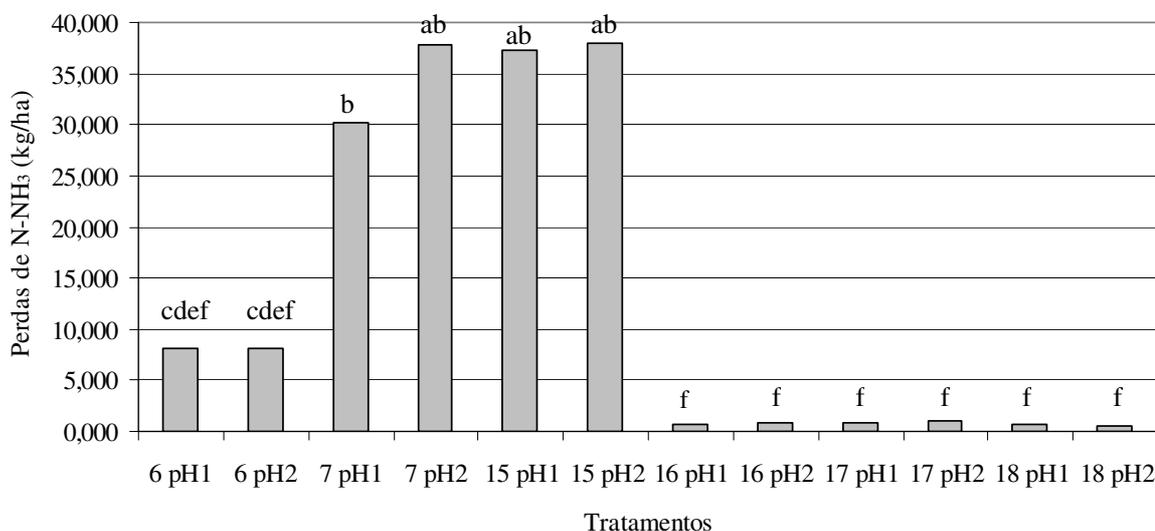


Figura 17. Perda total de N-NH₃ dos fertilizantes de liberação lenta ou controlada – ureia recoberta com enxofre/polímero em comparação com fertilizantes convencionais e testemunha nos 6 primeiros dias após aplicação dos fertilizantes nitrogenados. Onde, pH1 é 5,7 e pH2 é 6,6. Fertilizantes de liberação lenta – ureia recoberta por enxofre: 6 (Poly Plus Sulphur Coated Urea – 28,4%N), 7 (FH Nitro Gold-42,1%N), 12 (Producote – 39,8%N); Fertilizantes Convencionais: 15 (Ureia – 45,0%N), 16 (Nitrato de amônio – 34,3%N), 17 (Sulfato de amônio – 21,0%N); Testemunha Absoluta: 18 (sem adição de fonte nitrogenada).

Na Figura 18 Meister em suas duas formulações e ESN tiveram menores perdas por volatilização, junto com sulfato de amônio e nitrato de amônio, ou seja, perdas de amônia

estatisticamente iguais a testemunha. Kimcoat LGU teve as maiores perdas, similares às perdas da ureia convencional.

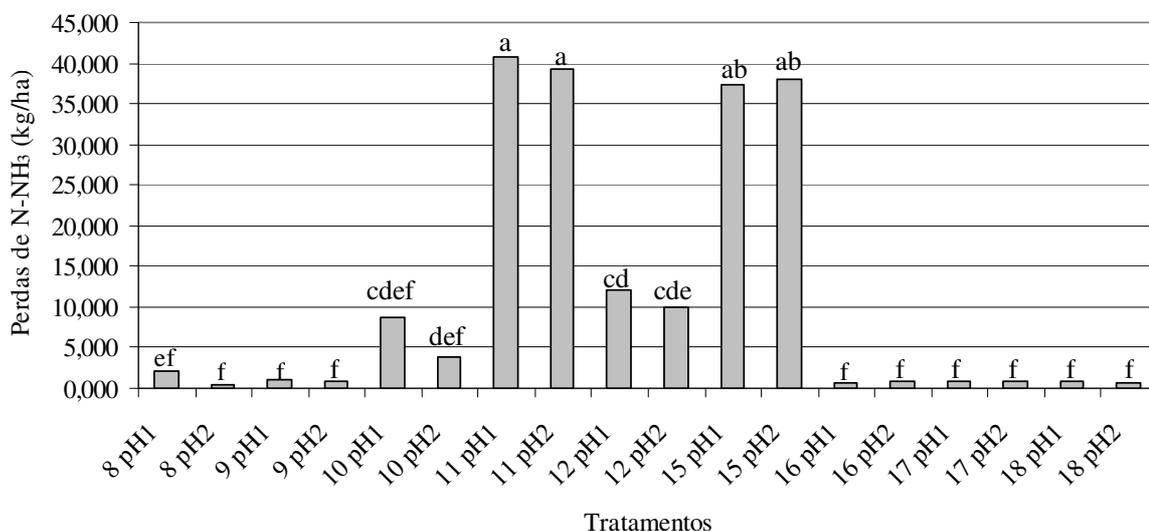


Figura 18. Perda total de N-NH₃ dos fertilizantes de liberação controlada – ureia recoberta com polímero em comparação com fertilizantes convencionais e testemunha nos 6 primeiros dias após aplicação dos fertilizantes nitrogenados. Onde, pH1 é 5,7 e pH2 é 6,6. Fertilizantes de liberação controlada – ureia recoberta com polímero: 8 (Meister “LP coat L30” – 46,2%N), 9 (Meister “LPS30” – 44,4%N), 10 (ESN-38,9%N), 11 (Kimcoat LGU – 42,4%N); Fertilizantes Convencionais: 15 (Ureia – 45,0%N), 16 (Nitrato de amônio – 34,3%N), 17 (Sulfato de amônio – 21,0%N); Testemunha Absoluta: 18 (sem adição de fonte nitrogenada).

Na Figura 19 ureia e Super U tiveram as maiores perdas de amônia por volatilização. O Super N no pH2 não diferiu estatisticamente do sulfato de amônio, nitrato de amônio e testemunha independente dos pHs, tendo perdas mínimas neste período de 6 dias. O Super N no pH1 apresentou perda de amônia intermediária.

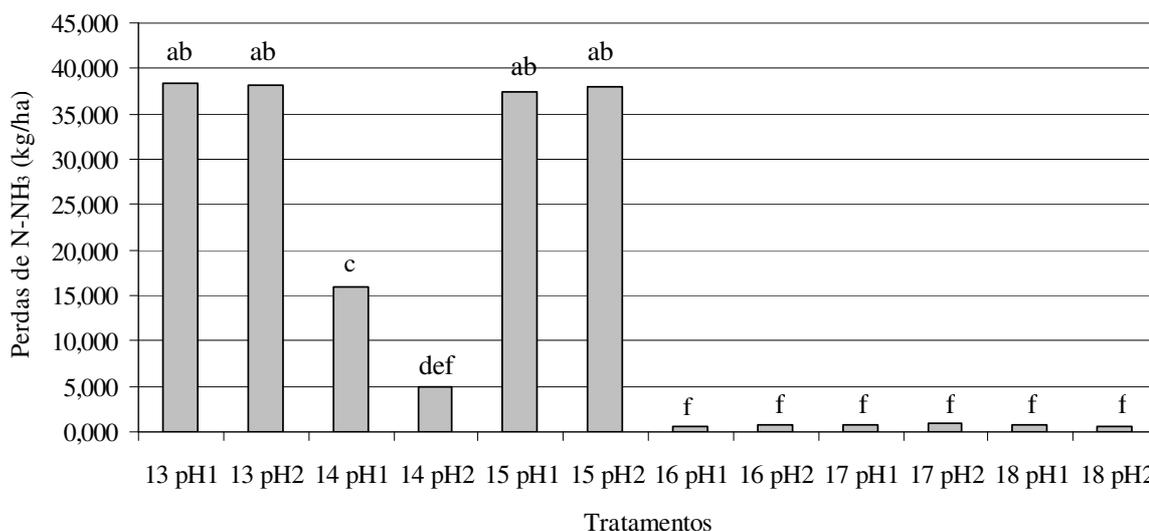


Figura 19. Perda total de N-NH₃ dos fertilizantes estabilizados em comparação com fertilizantes convencionais e testemunha nos 6 primeiros dias após aplicação dos

fertilizantes nitrogenados. Onde, pH1 é 5,7 e pH2 é 6,6. Fertilizantes estabilizados – com inibidores de volatilização ou lixiviação: 13 (Super U-46,4%N), 14 (Super N – 45,7%N); Fertilizantes Convencionais: 15 (Ureia – 45,0%N), 16 (Nitrato de amônio – 34,3%N), 17 (Sulfato de amônio – 21,0%N); Testemunha Absoluta: 18 (sem adição de fonte nitrogenada).

Comparando-se todos os tratamentos ao longo do tempo tivemos picos de perdas de N-NH_3 no segundo dia após aplicação do fertilizante. Conforme Trenkel (2010), a taxa de hidrólise é maior em altas temperaturas porque a atividade da urease aumenta com o aumento da temperatura, sendo a hidrólise da ureia completa em 2 dias à temperatura de 30 °C. Estas condições de temperatura ocorreram durante o experimento, onde a média das temperaturas médias do período foi de 26 °C, a média das máximas 32 °C e a média das mínimas 22 °C .

Os resultados apresentados confirmam altas perdas de nitrogênio na forma de amônia volatilizada quando ureia é aplicada em superfície. Neste experimento as perdas foram de cerca de 31% do nitrogênio aplicado nos primeiros seis dias. Segundo Raij (1997), as perdas a campo são variáveis, mas estima-se que possam chegar a 20% ou mais do N aplicado se as condições favorecerem a volatilização. Também Cabezas et al. (1997) obteve perdas de ureia que chegaram a quase 30% com a aplicação superficial no plantio convencional.

O Super U é um fertilizante estabilizado que contém inibidor de urease - NBPT - N-(n-butil) triamida trifosfórica e inibidor de nitrificação – DCD - dicianodiamida, de modo que o inibidor de nitrificação mantendo o nitrogênio na forma amoniacal por mais tempo favorece a volatilização. Conforme Cantarella e Marcelino (2008), a taxa de volatilização de amônia aumenta em relação aos tratamentos que recebem apenas NBPT.

O FH Nitro Gold é ureia recoberta por enxofre e havendo fissuras na camada de revestimento a ureia pode ser liberada rapidamente logo após aplicação como ocorre com adubos solúveis, estando sujeita a perdas de nitrogênio por volatilização da amônia. A liberação da ureia recoberta por enxofre, usualmente segue um padrão parabólico, entretanto havendo rachaduras no recobrimento, a liberação de uma terça parte ou mais é imediata em contato com água (Trenkel, 2010).

O Kimcoat LGU é uma ureia revestida com polímeros que mostrou pouca eficiência na redução da volatilização do nitrogênio na forma de amônia.

Sulfato de amônio e nitrato de amônio são fontes nitrogenadas que possuem nitrogênio amoniacal e conforme Raij (1997) em solos com pH acima de 7, adubos contendo N na forma amoniacal, aplicados na superfície do solo, estão sujeitos a perdas de N por volatilização de amônia, como os pHs testados foram de 5,7 e 6,6 foram constatadas pequenas perdas de nitrogênio para estas fontes, não havendo diferença estatística para testemunha absoluta (sem nitrogênio) pelo teste de Tukey a 5%.

IBDU (isobutilene diurea), CDU (crotonaldeído), Methylene (ureia formaldeído) e Ciclus NS (ureia formaldeído com sulfato de amônio) - fertilizantes de liberação lenta, Meister LPS30, Meister LP coat L30 - fertilizantes de liberação controlada recobertos com polímeros, e Poly Plus Sulphur Coated Urea - fertilizante de liberação controlada pelo revestimento de enxofre e polímero, nesse primeiro período de análise (6 dias após aplicação) não apresentaram perdas de nitrogênio por volatilização significativamente maiores que a da testemunha (Tukey a 5%) provavelmente pela liberação mais lenta do nitrogênio no solo.

Producote (fertilizante de liberação controlada - ureia revestida por enxofre e polímero) e Super N (fertilizante estabilizado - ureia com NBPT – inibidor de urease) tiveram perdas de amônia intermediárias. As reduções das perdas por volatilização de amônia com inibidores de urease (NBPT) podem atingir a variação de 55 à 99% (Watson et al, 1994).

Neste experimento foi obtida redução de perdas de nitrogênio da ordem de 72% comparando-se com as perdas de ureia nos primeiros seis dias de avaliação.

Comparando-se as médias de perdas de amônia dos fertilizantes no pH1 e pH2 não houve diferença estatística, provavelmente porque a diferença entre pHs foi pequena 0,9, de 5,7 a 6,6. Entretanto o Super N mostrou diferença estatística na análise de variância para os pHs testados tendo maiores perdas no pH menos elevado. No caso do Super N a redução da volatilização foi maior em solos mais alcalinos, provavelmente pelo NBPT decompor-se mais rapidamente em solos ácidos (Trenkel, 2010).

Houve interações entre as coletas e pHs. Na coleta 2 houve perdas maiores no pH2, período em que ocorreram os picos de perdas de Nitro Gold, Kimcoat, Super U e Ureia e na sexta coleta as perdas foram significativamente maiores no pH1, período em que há um pico de perda de amônia do Super N. Estas diferenças são consequência dos produtos que tiveram maiores perdas nestas coletas. Na segunda coleta os produtos ureia, Super U, Kimcoat e Nitro Gold tiveram comportamento semelhante à ureia convencional, devido à rápida hidrólise da ureia e conseqüente elevação do pH, que acarreta a volatilização de amônia pelo equilíbrio da reação entre amônio e amônia tender para amônia em pHs mais elevados (Jones et al, 2007). Na sexta coleta houve um pico de perda do Super N, fertilizante estabilizado, com inibidor de urease NBPT, que se decompõe mais rapidamente em solos ácidos (pH1), segundo Trenkel (2010).

4.2. Volatilização – Análise Período Total (84 dias)

A análise de variância das coletas de volatilizado realizadas no período total do experimento de volatilização (84 dias a partir da aplicação dos fertilizantes) apresentou diferença estatística entre fertilizantes, pHs, coletas e suas interações (fertilizantes x pH, fertilizantes x coletas, coletas x pH, fertilizantes x pHs x coletas).

Na Figura 20 e Tabela 15 verifica-se que em termos de perdas totais de N-NH₃ (kg/ha) ao longo dos 84 dias de experimento de volatilização, os fertilizantes que tiveram maiores perdas foram ureia, Super U, Kimcoat LGU e FH NitroGold, e as fontes que tiveram menores perdas, próximas a testemunha foram sulfato de amônio (AS), nitrato de amônio (NA), IBDU e CDU. Demais fertilizantes tiveram perdas intermediárias, sendo menores para Ciclus NS, Methylene, Ureia Formaldeído, seguidos por Meister LP coat L30, Poly Plus Sulphur Coated Urea, Producote, ESN, Meister LPS30 e Super N.

As menores perdas acumuladas foram do sulfato de amônio, nitrato de amônio, IBDU e CDU. Estas perdas não diferiram estatisticamente da testemunha.

A maioria dos fertilizantes de eficiência aumentada testados apresentou redução nas perdas de N por volatilização quando comparados a fonte convencional ureia nos dois pHs, com exceção da ureia recoberta com o polímero Kimcoat LGU, do fertilizante estabilizado Super U (ureia com inibidores DCD e NBPT) e do fertilizante revestido por enxofre FH Nitro Gold. Mas quando comparados ao nitrato de amônio e sulfato de amônio apresentaram maiores perdas, com exceção do IBDU e CDU, que tiveram as menores perdas acumuladas, juntamente com sulfato de amônio e nitrato de amônio.

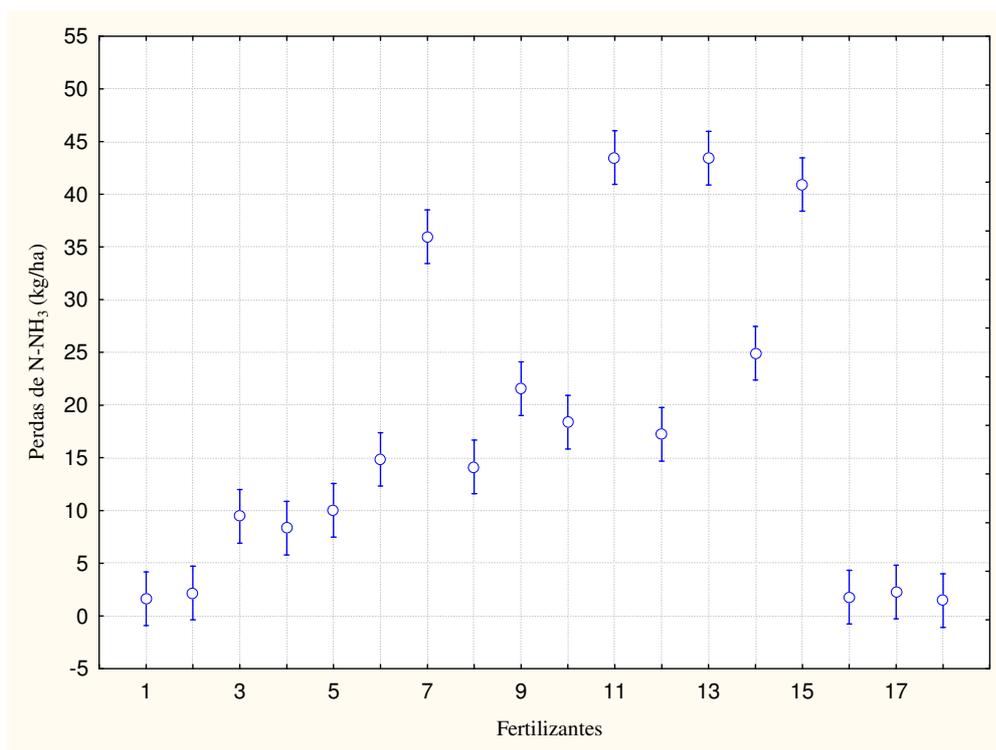


Figura 20. Perda total de N-NH₃ (kg/ha) nos 84 dias de coleta de volatilizados. Onde, Fertilizantes de liberação lenta – ureia aldeído: 1 (IBDU – 32,5% N), 2 (CDU-31,1%N), 3 (Methylene 75 – 38,7%N), 4 (Ciclus NS-32,5%N), 5 (Ureia Formadeído-37,5%N); Fertilizantes de liberação lenta ou controlada – ureia recoberta por enxofre/polímero: 6 (Poly Plus Sulphur Coated Urea – 28,4%N), 7 (FH Nitro Gold-42,1%N), 12 (Producote – 39,8%N); Fertilizantes de liberação controlada – ureia recoberta com polímero: 8 (Meister “LP coat L30” – 46,2%N), 9 (Meister “LPS30” – 44,4%N), 10 (ESN-38,9%N), 11 (Kimcoat LGU – 42,4%N); Fertilizantes estabilizados – com inibidores de volatilização ou lixiviação: 13 (Super U-46,4%N), 14 (Super N – 45,7%N); Fertilizantes Convencionais: 15 (Ureia – 45,0%N), 16 (Nitrato de amônio – 34,3%N), 17 (Sulfato de amônio – 21,0%N); Testemunha Absoluta: 18 (sem adição de fonte nitrogenada). As barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%.

Tabela 15. Perdas de N-NH₃ (kg/ha) no período total de coleta de volatilizado.

Tratamento	Perda total N-NH₃ (kg/ha)
Kimcoat	43,489 a
Super U	43,436 a
Ureia	40,938 ab
Nitro Gold	35,973 b
Super N	24,927 c
Meister LPS30	21,550 cd
ESN	18,383 de
Producote	17,240 def
PPSCU	14,855 efg
Meister L30	14,129 efgh
UF	10,008 gh
Methylene	9,452 gh
Ciclus NS	8,324 hi
AS	2,255 ij
CDU	2,165 ij
NA	2,142 j
IBDU	1,620 j
Testemunha	1,436 j

Médias seguidas de mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,05).

Considerando-se 14 coletas no período total de 84 dias do experimento, sendo a primeira coleta correspondente à somatória de volatilizados do 1°. ao 6°. dia após aplicação dos fertilizantes e as 13 coletas subsequentes aquelas realizadas de 6 em 6 dias, as maiores perdas de amônia comparando-se todos os tratamentos ocorreram na primeira coleta, ou seja, nos primeiros 6 dias após a aplicação dos fertilizantes nitrogenados (Figura 21). Essas perdas foram drasticamente menores na segunda coleta (6°. ao 12°. dia após aplicação dos fertilizantes) e continuaram a decair na terceira (12°. ao 18°. dia), quarta (18°. ao 24°. dia), quinta (24°. ao 30°. dia), sexta (30°. ao 36°. dia) e sétima (36°. ao 42°. dia) coletas, quando se estabilizaram próximas a zero até a décima quarta coleta (78°. ao 84°. dia).

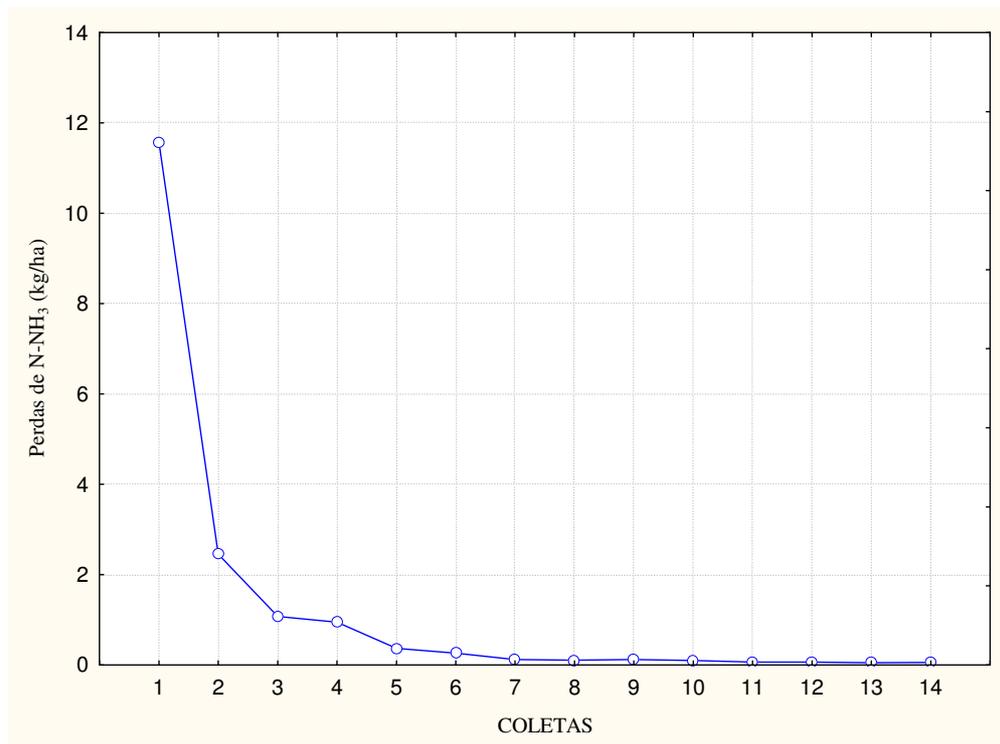


Figura 21. Perdas médias de N-NH₃ (kg/ha) dos diferentes tratamentos em função das coletas (6 em 6 dias).

Na Figura 22 verifica-se que ureia, Kimcoat LGU, Super U e FH NitroGold tiveram grandes picos de perdas de amônia na primeira coleta (volatilizados do 1°. ao 6°. dia após aplicação dos fertilizantes), próximos a 40 kg de N por hectare. Producote, Super N, ESN, Poly Plus Sulphur Coated Urea, Ureia Formaldeído, Methylene, Ciclus NS também tiveram picos de perdas nesta primeira coleta, mas com valores totais de perdas de amônia muito menores (entre 5 e 10 kg de N-NH₃ por hectare). Na segunda coleta, perdas de amônia entre o 6°. e o 12°. dia após aplicação dos fertilizantes, destacam-se as perdas de amônia do Super N e ESN, próximas a 10 kg de N-NH₃ por hectare. Na terceira coleta (12°. ao 18°. dia após aplicação) ocorreu o pico de perda de N do Meister LP coat L30, cerca de 5 kg de N-NH₃ por hectare. Na quarta coleta (volatilizado do 18°. ao 24°. dia após aplicação dos fertilizantes) houve pico de volatilização do Meister LPS30, mas também em níveis muito menores que os ocorridos com a ureia, aproximadamente 10 kg de N-NH₃ por hectare.

Comparando-se a média das perdas de N na forma de amônia dos diferentes fertilizantes nos 84 dias de avaliação, houve diferença estatística significativa de perdas por volatilização de amônia nos pHs testados, conforme Figura 23.

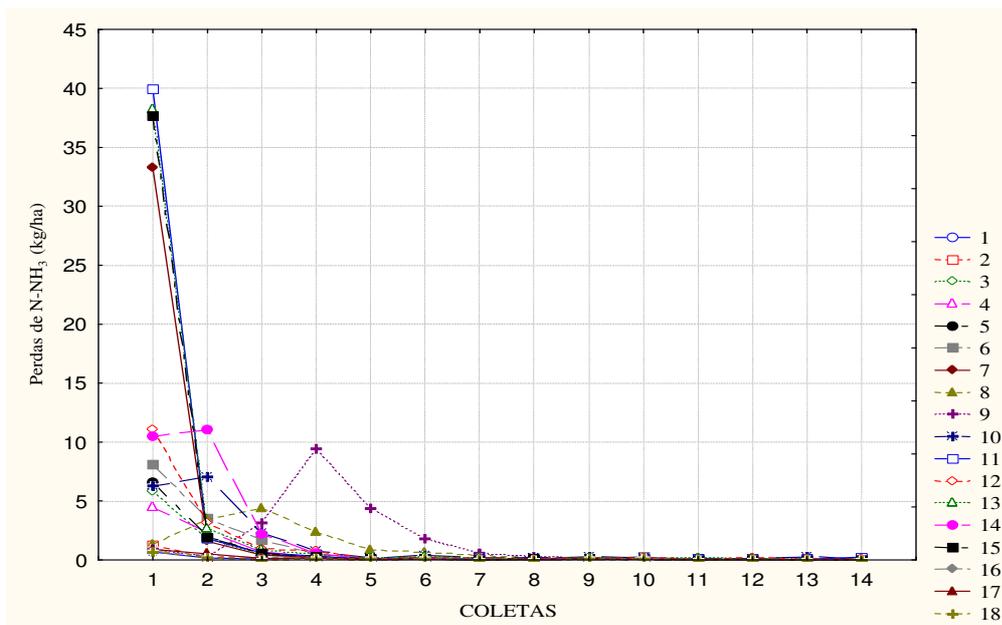


Figura 22. Perdas N-NH₃ (kg/ha) dos diferentes fertilizantes em função das coletas (6 em 6 dias). Onde, Fertilizantes de liberação lenta – ureia aldeído: 1 (IBDU – 32,5% N), 2 (CDU-31,1%N), 3 (Methylene 75 – 38,7%N), 4 (Ciclus NS-32,5%N), 5 (Ureia Formadeído-37,5%N); Fertilizantes de liberação lenta ou controlada – ureia recoberta por enxofre/polímero: 6 (Poly Plus Sulphur Coated Urea – 28,4%N), 12 (Producote – 39,8%N), 7 (FH Nitro Gold-42,1%N); Fertilizantes de liberação controlada – ureia recoberta com polímero: 8 (Meister “LP coat L30” – 46,2%N), 9 (Meister “LPS30” – 44,4%N), 10 (ESN-38,9%N), 11 (Kimcoat LGU – 42,4%N); Fertilizantes estabilizados – com inibidores de volatilização ou lixiviação: 13 (Super U-46,4%N), 14 (Super N – 45,7%N); Fertilizantes Convencionais: 15 (Ureia – 45,0%N), 16 (Nitrato de amônio – 34,3%N), 17 (Sulfato de amônio – 21,0%N); Testemunha Absoluta: 18 (sem adição de fonte nitrogenada).

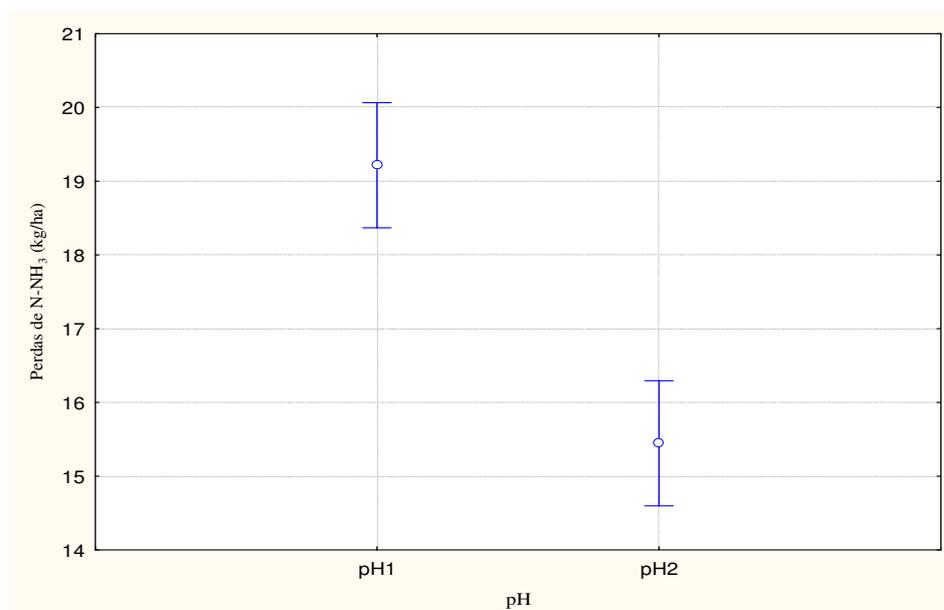


Figura 23. Perdas médias de N-NH₃ (kg/ha) dos diferentes fertilizantes sob 2 pHs durante 84 dias após aplicação dos fertilizantes. Onde pH1 em água é 5,7 e pH2 em água é 6,6. As barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%.

Comparando-se as perdas dos diferentes fertilizantes ao longo das 14 coletas com o pH (Figura 24), observa-se graficamente que para muitos destes produtos não houve diferença estatística entre as perdas no pH1 e no pH2. Apenas para os produtos recobertos com polímeros Meister LP coat L30, Meister LPS30 e ESN e para o fertilizante estabilizado Super N houve diferença estatística na ANOVA (análise de variância), onde as perdas foram maiores no pH1.

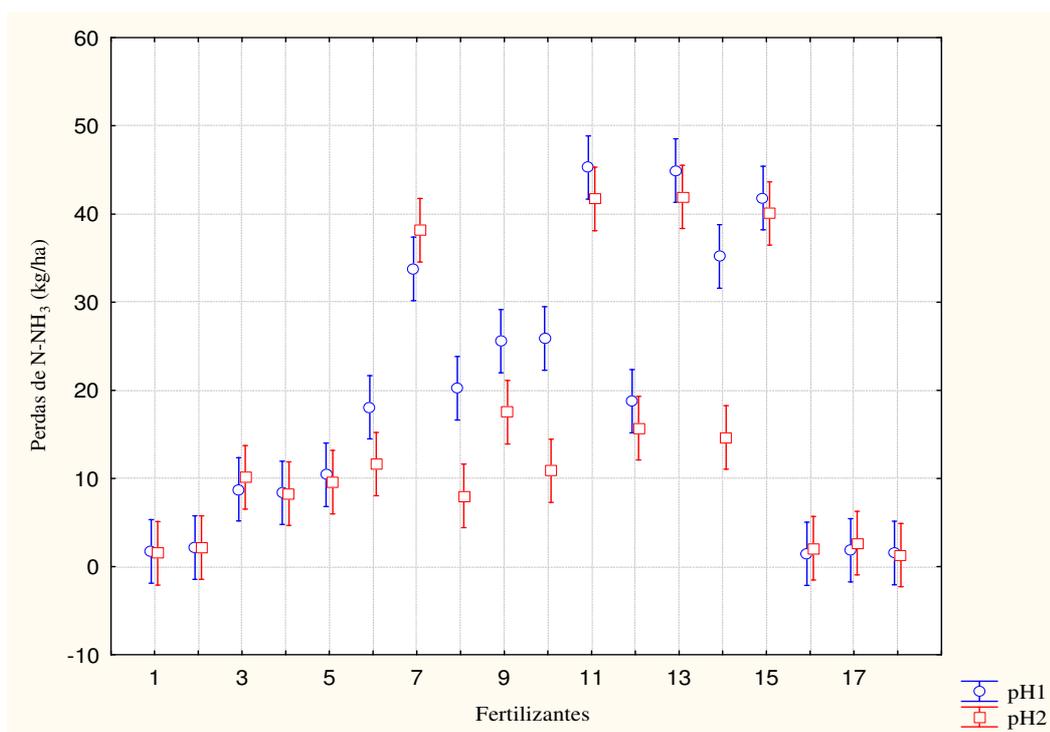


Figura 24. Perdas de N-NH₃ (kg/ha) dos diferentes fertilizantes sob 2 pHs durante 84 dias após aplicação dos fertilizantes. Onde, pH1 é 5,7 e pH2 é 6,6. Fertilizantes de liberação lenta – ureia aldeído: 1 (IBDU – 32,5% N), 2 (CDU-31,1%N), 3 (Methylene 75 – 38,7%N), 4 (Ciclus NS-32,5%N), 5 (Ureia Formadeído-37,5%N); Fertilizantes de liberação lenta ou controlada – ureia recoberta por enxofre/polímero: 6 (Poly Plus Sulphur Coated Urea – 28,4%N), 12 (Producote – 39,8%N), 7 (FH Nitro Gold-42,1%N); Fertilizantes de liberação controlada – ureia recoberta com polímero: 8 (Meister “LP coat L30” – 46,2%N), 9 (Meister “LPS30” – 44,4%N), 10 (ESN-38,9%N), 11 (Kimcoat LGU – 42,4%N); Fertilizantes estabilizados – com inibidores de volatilização ou lixiviação: 13 (Super U-46,4%N), 14 (Super N – 45,7%N); Fertilizantes Convencionais: 15 (Ureia – 45,0%N), 16 (Nitrato de amônio – 34,3%N), 17 (Sulfato de amônio – 21,0%N); Testemunha Absoluta: 18 (sem adição de fonte nitrogenada). As barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%.

Na tabela 16 apresenta-se a perda total de N-NH₃ de cada tratamento no período de 84 dias de experimento de volatilização. Na sequência as figuras 25 a 28 mostram estes mesmos resultados graficamente comparando-se cada categoria de produto com os fertilizantes convencionais e a testemunha.

Tabela 16. Perda total de N-NH₃ dos tratamentos nos 84 dias de experimento de volatilização.

Categorias	pH	Produtos (Nome Comercial)	Perdas de N-NH₃ (kg/ha)
Fertilizantes de liberação lenta - Uréia aldeído	pH1	IBDU	1,722 ij
	pH2	IBDU	1,519 j
	pH1	CDU	2,160 ij
	pH2	CDU	2,169 ij
	pH1	Methylene 75	8,767 ghij
	pH2	Methylene 75	10,138 fghij
	pH1	Ciclus NS	8,371 hij
	pH2	Ciclus NS	8,277 hij
	pH1	Uréia Formaldeído	10,418 fghij
	pH2	Uréia Formadeído	9,598 ghij
Fertilizantes de liberação lenta ou controlada - Ureia revestida com enxofre/polímero	pH1	Poly Plus Sulphur Coated Urea	18,076 dfgh
	pH2	Poly Plus Sulphur Coated Urea	11,634 fghi
	pH1	Producote	18,768 defg
	pH2	Producote	15,713 efgh
	pH1	FH Nitro Gold	33,784 bc
	pH2	FH Nitro Gold	38,161 ab
Fertilizantes de liberação controlada - Uréia revestida com polímero	pH1	Meister “LP coat L30”	20,232 def
	pH2	Meister “LP coat L30”	8,026 hij
	pH1	Meister “LPS 30”	25,575 cde
	pH2	Meister “LPS 30”	17,524 defgh
	pH1	ESN	25,893 cd
	pH2	ESN	10,874 fghij
	pH1	Kimcoat LGU	45,273 a
	pH2	Kimcoat LGU	41,705 ab
Fertilizantes estabilizados - inib. volat. e/ou lixiviação	pH1	Super U	44,931 a
	pH2	Super U	41,941 ab
	pH1	Super N	35,201 abc
	pH2	Super N	14,652 fgh
Fertilizantes Convencionais	pH1	Uréia	41,818 ab
	pH2	Uréia	40,057 ab
	pH1	Nitrato de Amônio	1,461 j
	pH2	Nitrato de Amônio	2,083 ij
	pH1	Sulfato de Amônio	1,850 ij
	pH2	Sulfato de Amônio	2,660 ij
Testemunha	pH1	Sem N	1,559 ij
	pH2	Sem N	1,313 j

Médias seguidas de mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,05).

Na figura 25 onde comparamos os fertilizantes de liberação lenta – ureia aldeído com os fertilizantes convencionais e testemunha, verificamos que pelo teste de médias de Tukey a 5 %, quando se considera as perdas de volatilização não houve diferença estatística entre estes fertilizantes de liberação lenta, sulfato de amônio, nitrato de amônio e testemunha, como também entre os pHs. Mas houve diferença estatística destes tratamentos em relação às perdas de amônia pela fonte nitrogenada convencional ureia, que foi muito superior, variando de 33,4 a 34,8% do nitrogênio aplicado, nos pHs 1 e 2 respectivamente.

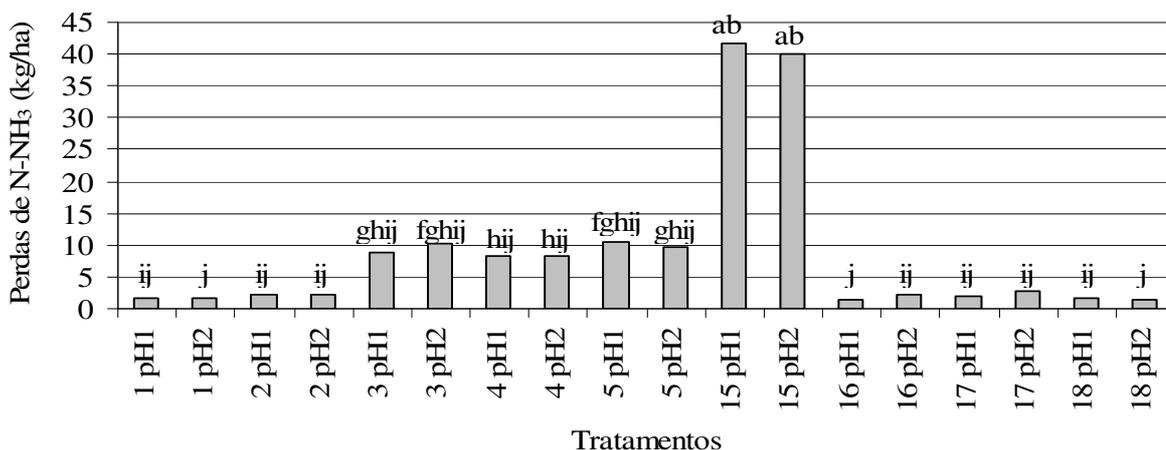


Figura 25. Perda total de N-NH₃ dos fertilizantes de liberação lenta – ureia aldeído em comparação com fertilizantes convencionais e testemunha nos 84 dias de experimento de volatilização. Onde, pH1 é 5,7 e pH2 é 6,6. Fertilizantes de liberação lenta – ureia aldeído: 1 (IBDU – 32,5% N), 2 (CDU-31,1%N), 3 (Methylene 75 – 38,7%N), 4 (Ciclus NS-32,5%N), 5 (Ureia Formadeído-37,5%N); Fertilizantes Convencionais: 15 (Ureia – 45,0%N), 16 (Nitrato de amônio – 34,3%N), 17 (Sulfato de amônio – 21,0%N); Testemunha Absoluta: 18 (sem adição de fonte nitrogenada).

Na Figura 26 comparando-se os fertilizantes revestidos com enxofre em relação à ureia, não houve diferença estatística entre as perdas de amônia da ureia e do FH Nitro Gold no período total do experimento (84 dias). Essas perdas foram superiores às verificadas com o Poly Sulphur Coated Urea e Produccote, que por sua vez foram maiores que as observadas com o nitrato de amônio e sulfato de amônio, que não diferiram da testemunha.

Na Figura 27 comparando-se as fontes nitrogenadas revestidas com polímeros com as fontes convencionais e testemunha, nota-se que as maiores perdas de amônia foram da ureia e do Kimcoat LGU. As menores perdas do nitrato de amônio e sulfato de amônio, perdas estas que não diferiram estatisticamente da testemunha. Os produtos Meister LP coat L30 e ESN no pH2 (6,6) também encontram-se nesta faixa de menores perdas. Estes mesmos produtos no pH1 (5,7) tiveram perdas intermediárias semelhantes às perdas do Meister LPS30 nos dois pHs.

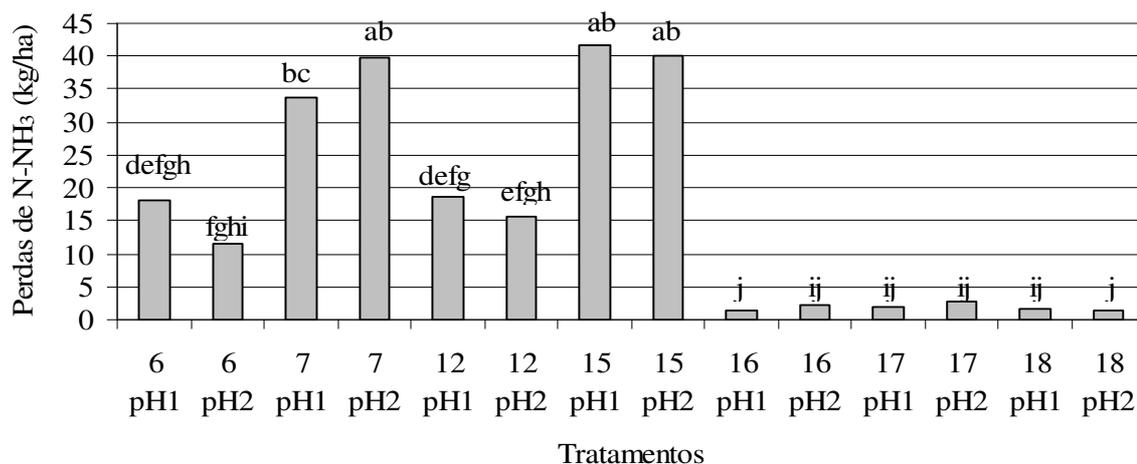


Figura 26. Perda total de N-NH₃ dos fertilizantes de liberação lenta ou controlada – ureia recoberta com enxofre/polímero em comparação com fertilizantes convencionais e testemunha nos 84 dias de experimento de volatilização. Onde, pH1 é 5,7 e pH2 é 6,6. Fertilizantes de liberação lenta – ureia recoberta por enxofre: 6 (Poly Plus Sulphur Coated Urea – 28,4%N), 12 (Producote – 39,8%N), 7 (FH Nitro Gold-42,1%N); Fertilizantes Convencionais: 15 (Ureia – 45,0%N), 16 (Nitrato de amônio – 34,3%N), 17 (Sulfato de amônio – 21,0%N); Testemunha Absoluta: 18 (sem adição de fonte nitrogenada).

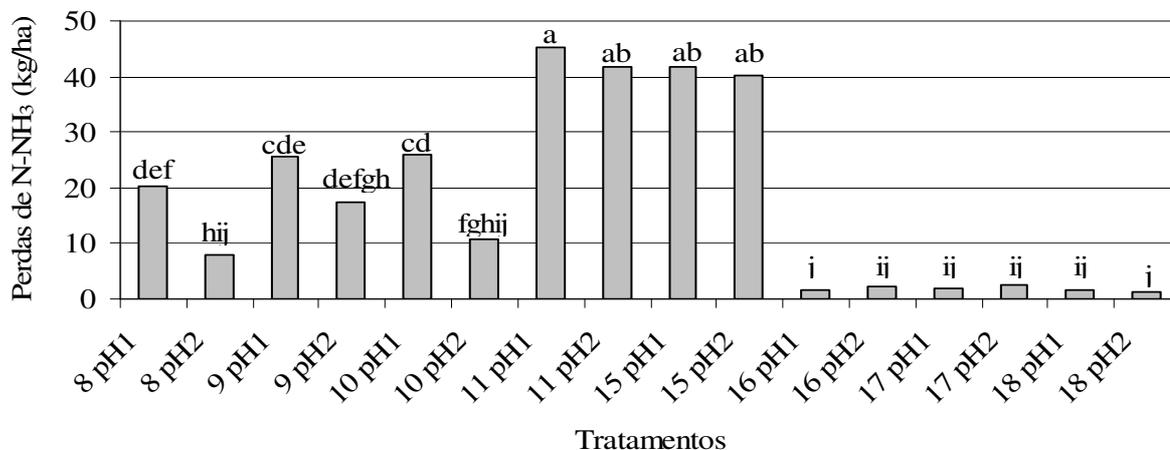


Figura 27. Perda total de N-NH₃ dos fertilizantes de liberação controlada – ureia recoberta com polímero em comparação com fertilizantes convencionais e testemunha nos 84 dias de experimento de volatilização. Onde, pH1 é 5,7 e pH2 é 6,6. Fertilizantes de liberação controlada – ureia recoberta com polímero: 8 (Meister “LP coat L30” – 46,2%N), 9 (Meister “LPS30” – 44,4%N), 10 (ESN-38,9%N), 11 (Kimcoat LGU – 42,4%N); Fertilizantes Convencionais: 15 (Ureia – 45,0%N), 16 (Nitrato de amônio – 34,3%N), 17 (Sulfato de amônio – 21,0%N); Testemunha Absoluta: 18 (sem adição de fonte nitrogenada).

Na Figura 28 comparando-se os fertilizantes estabilizados com os convencionais e testemunha no período total de avaliação 84 dias, observa-se que não há diferença estatística entre as perdas de amônia por volatilização da ureia, do Super U e do Super N no pH1. As menores perdas ocorrem para nitrato de amônio e sulfato de amônio, não diferindo da testemunha e o Super N no pH2 apresenta perda intermediária.

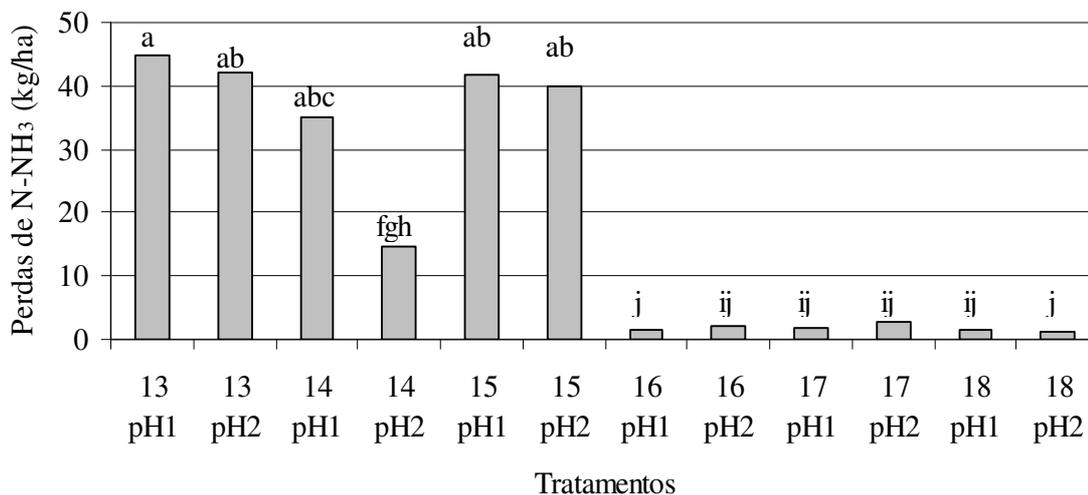


Figura 28. Perda total de N-NH₃ dos fertilizantes estabilizados em comparação com fertilizantes convencionais e testemunha nos 84 dias de experimento de volatilização. Onde, pH1 é 5,7 e pH2 é 6,6. Fertilizantes estabilizados – com inibidores de volatilização ou lixiviação: 13 (Super U-46,4%N), 14 (Super N – 45,7%N); Fertilizantes Convencionais: 15 (Ureia – 45,0%N), 16 (Nitrato de amônio – 34,3%N), 17 (Sulfato de amônio – 21,0%N); Testemunha Absoluta: 18 (sem adição de fonte nitrogenada).

Os dados da tabela 17 refletem as perdas percentuais acumuladas de amônia em relação à quantidade aplicada inicialmente (120 kg/ha) dos diferentes tratamentos. Como a partir da sétima coleta (36°. ao 42°. dia) as perdas de amônia estabilizaram-se próximas a zero até a última coleta - décima quarta (78°. ao 84°. dia) – Figura 21, consideraram-se os intervalos acumulados para análise de 1 a 6, 1 a 12, 1 a 18, 1 a 24, 1 a 30, 1 a 36, 1 a 42 e 1 a 84 dias após aplicação (DAP) do fertilizante nitrogenado e instalação do tratamento controle sem nitrogênio – testemunha. Esses resultados na sequência são apresentados e discutidos graficamente por categorias, reunindo os tratamentos em grupos para facilidade de análise (Figuras 29 a 33).

Tabela 17. Perdas acumuladas de N-NH₃ em relação ao N aplicado (%) de 1 a 6, 1 a 12, 1 a 18, 1 a 24, 1 a 30, 1 a 36, 1 a 42 e 1 a 84 dias após aplicação (DAP) do fertilizante nitrogenado e instalação do tratamento controle sem nitrogênio – testemunha.

Tratamentos		1 a 6 DPA	1 a 12 DPA	1 a 18 DAP	1 a 24 DAP	1 a 30 DAP	1 a 36 DAP	1 a 42 DAP	1 a 84 DAP								
IBDU	pH1	0,58	f	0,74	g	0,85	g	1,03	h	1,06	i	1,09	i	1,11	i	1,43	ij
IBDU	pH2	0,55	f	0,69	g	0,74	g	0,83	h	0,84	i	0,94	i	0,99	i	1,27	j
CDU	pH1	1,01	f	1,16	g	1,22	fg	1,28	gh	1,32	hi	1,41	hi	1,47	hi	1,80	ij
CDU	pH2	1,12	ef	1,35	g	1,38	fg	1,46	gh	1,49	hi	1,51	hi	1,54	hi	1,81	ij
Methylene	pH1	3,63	def	5,42	efg	5,97	defg	6,28	efgh	6,43	fghi	6,60	fghi	6,71	fghi	7,31	ghij
Methylene	pH2	6,08	def	7,34	efg	7,55	defg	7,74	efgh	7,79	efghi	7,97	efghi	8,02	efghi	8,45	fghij
Ciclus NS	pH1	3,05	def	5,28	fg	6,02	defg	6,21	efgh	6,35	fghi	6,54	fghi	6,64	fghi	6,98	hij
Ciclus NS	pH2	4,38	def	6,06	efg	6,38	defg	6,55	efgh	6,58	fghi	6,62	fghi	6,66	fghi	6,90	hij
UF	pH1	5,49	def	7,17	efg	7,79	defg	8,05	efgh	8,14	efghi	8,24	efghi	8,27	efghi	8,68	fghij
UF	pH2	5,51	def	7,18	efg	7,43	defg	7,49	efgh	7,52	efghi	7,67	efghi	7,70	fghi	8,00	ghij
PPSCU	pH1	6,72	cdef	10,96	def	13,07	cd	13,65	de	13,81	cdef	13,94	defg	13,99	defg	15,06	defgh
PPSCU	pH2	6,73	cdef	8,30	defg	9,04	def	9,21	efg	9,25	defgh	9,37	efgh	9,45	efgh	9,70	fghi
Producote	pH1	10,14	cd	13,06	de	13,94	cd	14,21	de	14,35	cdef	14,50	def	14,70	def	15,64	defg
Producote	pH2	8,26	cde	10,60	def	11,25	cde	12,29	def	12,34	cdefg	12,46	defg	12,52	defg	13,09	efgh
Nitro Gold	pH1	25,13	b	27,03	bc	27,47	b	27,70	c	27,76	b	27,82	bc	27,85	bc	28,15	bc
Nitro Gold	pH2	30,26	ab	31,01	abc	31,26	ab	31,40	abc	31,43	ab	31,48	ab	31,50	ab	31,80	ab
Meister L30	pH1	1,84	ef	5,90	efg	11,46	cde	14,31	de	15,23	cde	15,83	de	16,14	de	16,86	def
Meister L30	pH2	0,42	f	2,03	g	3,81	efg	4,95	fgh	5,39	ghi	5,84	ghi	6,11	ghi	6,69	hij

Continuação da Tabela 17.

Meister LPS30	pH1	0,83	f	1,02	g	4,60	efg	12,43	def	17,30	cd	19,55	d	20,25	cd	21,31	cde
Meister LPS30	pH2	0,71	f	0,95	g	2,69	fg	10,60	ef	13,03	cdefg	13,86	defg	14,11	defg	14,60	defgh
ESN	pH1	7,24	cdef	15,47	d	18,29	c	19,23	d	19,50	c	20,14	cd	20,36	cd	21,58	cd
ESN	pH2	3,20	def	6,77	efg	7,74	defg	8,02	efgh	8,07	efghi	8,10	efghi	8,22	efghi	9,06	fghij
Kimcoat	pH1	33,89	a	35,93	a	36,57	a	36,82	a	36,86	a	37,02	a	37,07	a	37,73	a
Kimcoat	pH2	32,66	a	32,66	ab	33,99	ab	34,28	abc	34,32	ab	34,37	ab	34,41	ab	34,75	ab
Super U	pH1	31,92	ab	34,51	ab	35,34	ab	35,90	ab	36,13	a	36,48	a	36,71	a	37,44	a
Super U	pH2	31,77	ab	33,70	ab	34,25	ab	34,45	abc	34,49	ab	34,59	ab	34,61	ab	34,95	ab
Super N	pH1	13,35	c	25,77	c	27,28	b	28,57	bc	28,70	ab	28,86	ab	28,91	ab	29,33	abc
Super N	pH2	4,09	def	10,05	def	11,58	cde	11,82	def	11,87	cdefg	11,93	defg	11,95	efg	12,21	fgh
Uréia	pH1	31,13	ab	33,44	abc	34,16	ab	34,41	abc	34,48	ab	34,57	ab	34,59	ab	34,85	ab
Uréia	pH2	31,70	ab	32,64	abc	32,82	ab	33,01	abc	33,04	ab	33,11	ab	33,13	ab	33,38	ab
NA	pH1	0,52	f	0,70	g	0,77	g	0,91	h	0,93	i	1,00	i	1,04	i	1,22	j
NA	pH2	0,70	f	1,08	g	1,35	fg	1,45	gh	1,48	hi	1,55	hi	1,57	hi	1,74	ij
AS	pH1	0,70	f	0,99	g	1,04	fg	1,14	gh	1,22	hi	1,26	hi	1,28	hi	1,54	ij
AS	pH2	0,78	f	1,38	g	1,60	fg	1,77	gh	1,83	hi	1,88	hi	1,92	hi	2,22	ij
Testemunha	pH1	0,62	f	0,77	g	0,80	g	0,90	h	0,95	i	1,04	i	1,06	i	1,30	ij
Testemunha	pH2	0,46	f	0,59	g	0,62	g	0,70	h	0,76	i	0,78	i	0,84	i	1,09	j

Médias seguidas de mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,05).

Na Figura 29 apresentam-se as perdas acumuladas em porcentagem de amônia volatilizada dos fertilizantes de liberação lenta – ureia aldeído (IBDU, CDU, Methylene, Ciclus NS e Ureia Formaldeído – UF) ao longo do tempo. Pelo teste de Tukey a 5% não há diferença estatística de perdas entre estas fontes e pHs testados em cada período analisado. Estas perdas não diferem das perdas obtidas com a testemunha (sem nitrogênio), com nitrato de amônio e com sulfato de amônio nos períodos analisados (Tabela 17). Por outro lado em todos estes períodos estas perdas são estatisticamente menores que as ocorridas com a ureia (Tabela 17). No final do experimento (84 dias) as perdas destes produtos oscilaram entre 1,27% e 8,68% do nitrogênio aplicado, enquanto as perdas de ureia foram de 34,85% no pH 1 e 33,38% no pH2 (Tabela 17). Tanto pela Figura 29, como pela Tabela 17 verifica-se que o maior porcentual de incremento de perdas para os produtos analisados ocorreu no primeiro período (1 a 6 dias após instalação do experimento).

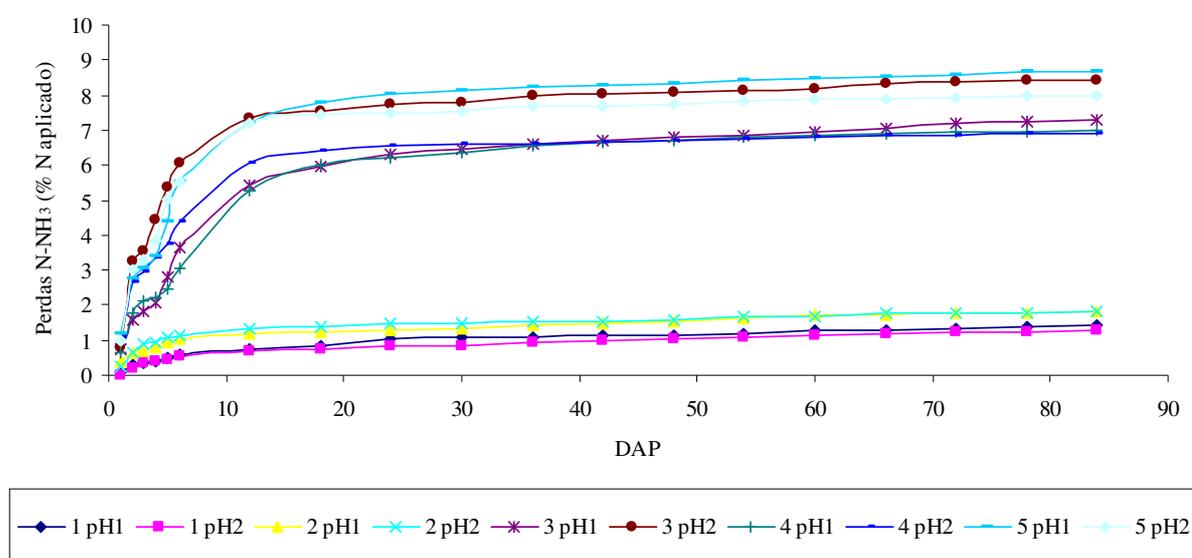


Figura 29. Perdas acumuladas de N-NH₃ em % N aplicado no período 0 a 84 dias após aplicação (DAP) dos fertilizantes de liberação lenta – ureia aldeído. Onde, pH1 é 5,7 e pH2 é 6,6, 1 (IBDU – 32,5% N), 2 (CDU-31,1%N), 3 (Methylene 75 – 38,7%N), 4 (Ciclus NS-32,5%N), 5 (Ureia Formadeído-37,5%N).

Na Figura 30 comparam-se as perdas de amônia por volatilização de ureia recoberta com enxofre (FH Nitrogold) e de ureia recoberta com enxofre e polímero (Poly Plus Sulphur Coated Urea – PPSCU e Producote), onde as perdas de amônia do PPSCU e do Producote são menores que as do FH Nitro Gold (Tukey a 5%). Não houve diferença estatística entre pHs. As perdas de amônia de FH Nitro Gold não diferiram estatisticamente das perdas de ureia nos períodos analisados. Enquanto PPSCU e Producote apresentaram resultados semelhantes entre si em relação às perdas de nitrogênio por volatilização de amônia e menores em relação à ureia. Considerando-se o primeiro período (1 a 6 dias após instalação do experimento), as perdas de FH NitroGold atingiram 25,13% do N aplicado no pH1 e 30,26% do N aplicado no pH2, já no período total (1 a 84 dias) foram de 28,15% (pH1) e 31,80% (pH2). As perdas de ureia foram de 31,13% (pH1) e 31,70% (pH2) do N aplicado no primeiro período e de 34,85% (pH1) e 33,38% (pH2) no período total. As perdas de PPSCU foram de 6,72% (pH1) e 6,73% (pH2) no primeiro período e no período total de 15,06% (pH1) e 9,7% (pH2). As perdas de Producote foram de 10,14% do N aplicado no pH1 e 8,26% do N aplicado no pH2 considerando-se os primeiros 6 dias de avaliação, e de 15,64% (pH1) e 13,09% (pH2).

considerando-se o percentual acumulado de perdas no período total de 84 dias. Tanto pela Figura 30, como pela Tabela 17 verifica-se que o maior percentual incremental de perdas para PPSCU, Producote e Nitro Gold ocorreu no primeiro período (1 a 6 dias após instalação do experimento).

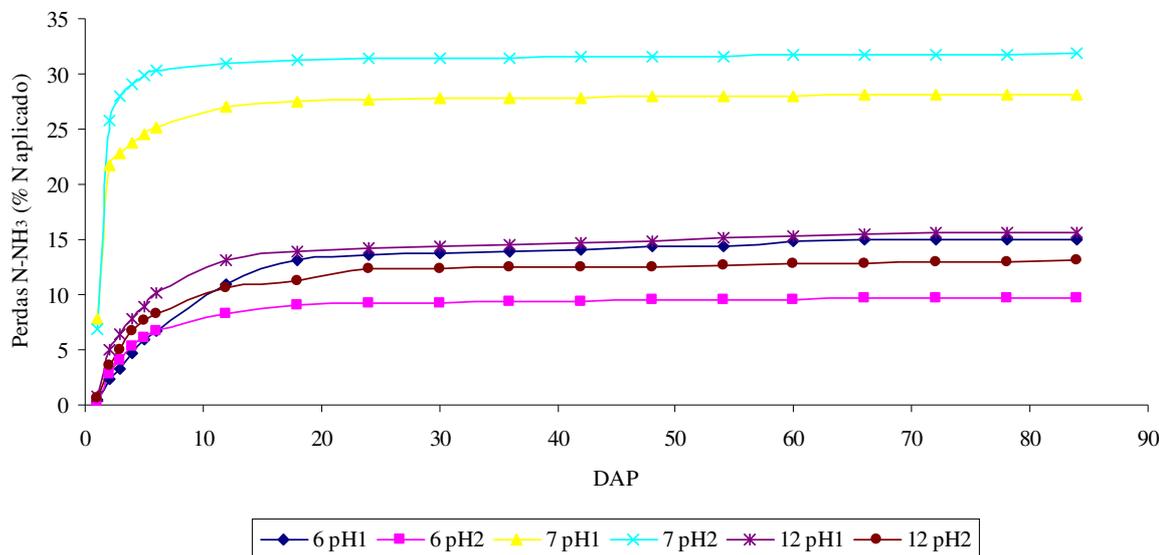


Figura 30. Perdas acumuladas de N-NH₃ em % N aplicado no período 0 a 84 dias após aplicação (DAP) dos fertilizantes de liberação lenta ou controlada – ureia recoberta com enxofre/polímero. Onde, pH1 é 5,7 e pH2 é 6,6, 6 (Poly Plus Sulphur Coated Urea – 28,4%N), 7 (FH Nitro Gold-42,1%N), 12 (Producote – 39,8%N).

Na Figura 31 apresentam-se os dados dos fertilizantes de liberação controlada, onde o Kimcoat LGU teve maiores perdas nos períodos analisados em relação às demais fontes nitrogenadas desta categoria e estas perdas não diferiram estatisticamente das perdas da ureia, também não houve diferença para os pHs testados, estas perdas variaram de 32,66% no N aplicado no pH2 a 33,89% no pH1 no primeiro período (1 a 6 dias após instalação do experimento) a 34,75% (pH2) e 37,73% (pH1) no período total de 84 dias do experimento (Tabela 17). Comparando-se os demais produtos de liberação controlada testados, no primeiro período (6 dias) não houve diferença estatística entre as perdas de Meister L30 (1,84% N aplicado no pH1 e 0,42% no pH2), Meister LPS 30 (0,83% no pH1 e 0,71% no pH2) e ESN (7,24% no pH1 e 3,20% no pH2), e estas também não diferiram da testemunha, nitrato de amônio e sulfato de amônio (Tabela 17).

No período total do experimento (84 dias) fazendo-se a mesma comparação entre estas fontes Meister L30 no pH1 (16,86% do N aplicado), Meister LPS 30 no pH1 (21,31%) e pH2 (14,60%) e ESN no pH1 (21,58% N aplicado) apresentaram perdas que não diferiram estatisticamente, mas foram superiores às perdas de Meister L30 no pH2 (6,69%) e ESN no pH2 (9,06%), que por sua vez assemelharam-se às perdas da testemunha, nitrato de amônio e sulfato de amônio. Analisando-se as perdas de amônia na Figura 31 e Tabela 17, verifica-se que Meister L30 (pH1 e pH2) teve as maiores perdas no terceiro período (12 a 18 dias após aplicação dos fertilizantes); o Meister LPS30 (pH1 e pH2) no quarto período (18 a 24 dias após aplicação dos fertilizantes), ESN (pH1 e pH2) teve as maiores perdas no segundo período de análise (6 a 12 dias após aplicação dos fertilizantes), Kimcoat (pH1 e pH2) no primeiro período (1 a 6 dias após instalação do experimento).

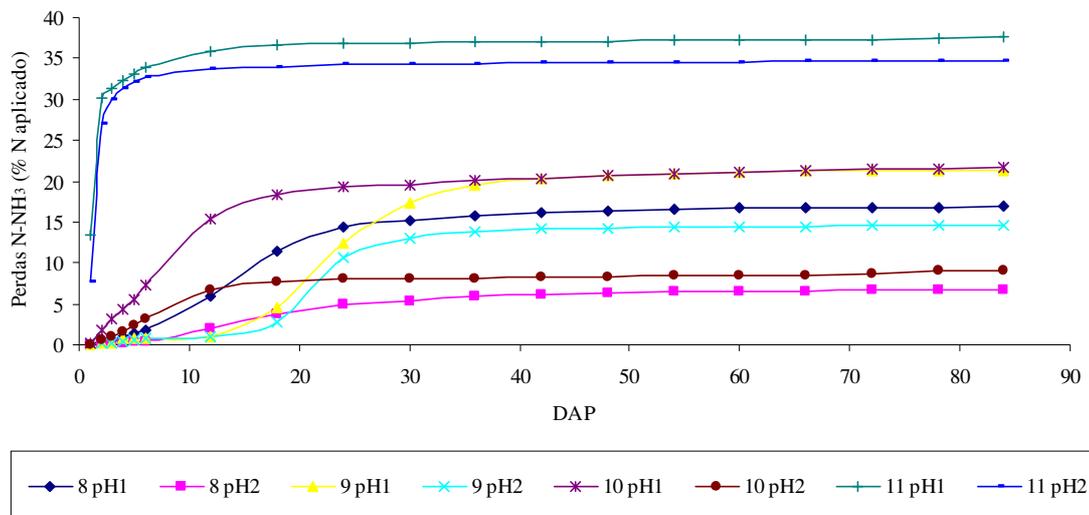


Figura 31. Perdas acumuladas de N-NH₃ em % N aplicado no período 0 a 84 dias após aplicação (DAP) dos fertilizantes de liberação controlada – ureia recoberta com polímero. Onde, pH1 é 5,7 e pH2 é 6,6, 8 (Meister “LP coat L30” – 46,2%N), 9 (Meister “LPS30” – 44,4%N), 10 (ESN-38,9%N), 11 (Kimcoat LGU – 42,4%N).

Analisando-se a Figura 32 e a Tabela 17 as perdas de amônia de Super U foram superiores às perdas de Super N no primeiro (1 a 6 dias após instalação do experimento) e segundo (6 a 12 dias após aplicação dos fertilizantes) períodos, ou seja, até 12 dias após aplicação, para os dois pHs. A partir do terceiro período (12 a 18 dias após aplicação dos tratamentos) as perdas do Super N (pH1) igualaram-se estatisticamente às perdas do Super U (pH1 e pH2).

As perdas acumuladas de Super U (pH1 e pH2) durante todos os períodos analisados e de Super N (pH1) a partir da oitava coleta (18 dias após aplicação do fertilizante nitrogenado) não diferiram das perdas de ureia (pH1 e pH2). Os maiores incrementos de perdas de amônia ocorreram no primeiro período (1 a 6 dias após instalação do experimento) para Super U e no primeiro (1 a 6 dias após instalação do experimento) e segundo (6 a 12 dias após aplicação dos fertilizantes) períodos para o Super N, no pH1 e pH2, respectivamente. Enquanto para o Super U não houve diferença estatística para os pHs testados, para o Super N as perdas foram maiores no pH1.

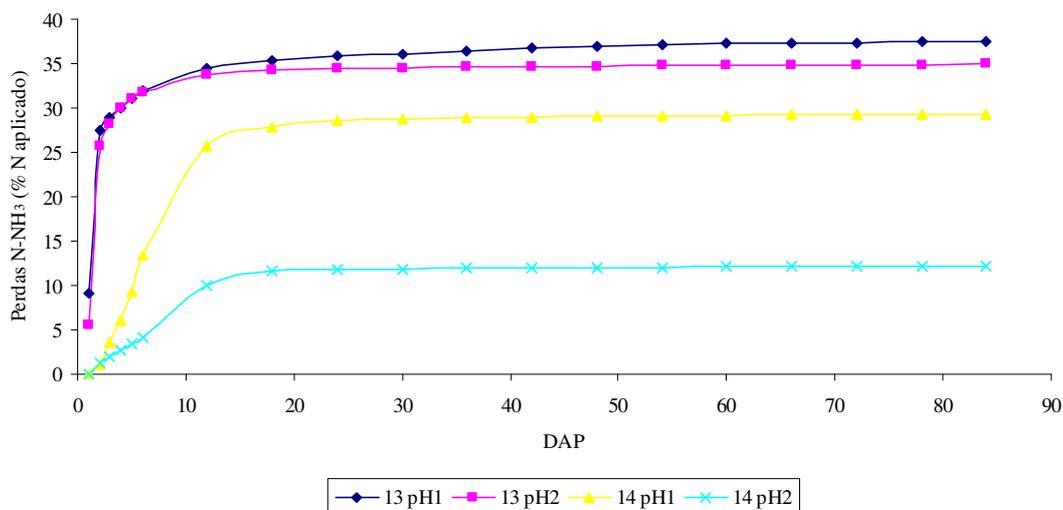


Figura 32. Perdas acumuladas de N-NH₃ em % N aplicado no período 0 a 84 dias após aplicação (DAP) dos fertilizantes estabilizados com inibidores de volatilização e/ou lixiviação. Onde, pH1 é 5,7 e pH2 é 6,6; 13 (Super U-46,4%N), 14 (Super N – 45,7%N).

Na Figura 33 apresentam-se as perdas de amônia das fontes convencionais: ureia, nitrato de amônio, sulfato de amônio e da testemunha (sem adição de N). Conforme Tabela 17 não houve diferença estatística entre testemunha, nitrato de amônio e sulfato de amônio para todos os períodos analisados, inclusive considerando-se os dois pHs diferentes. Mas houve diferença estatística destes tratamentos em relação à ureia (pH1 e pH2) com perdas superiores em todos os períodos analisados e com maior incremento de perdas no primeiro período analisado (1 a 6 dias após aplicação da ureia).

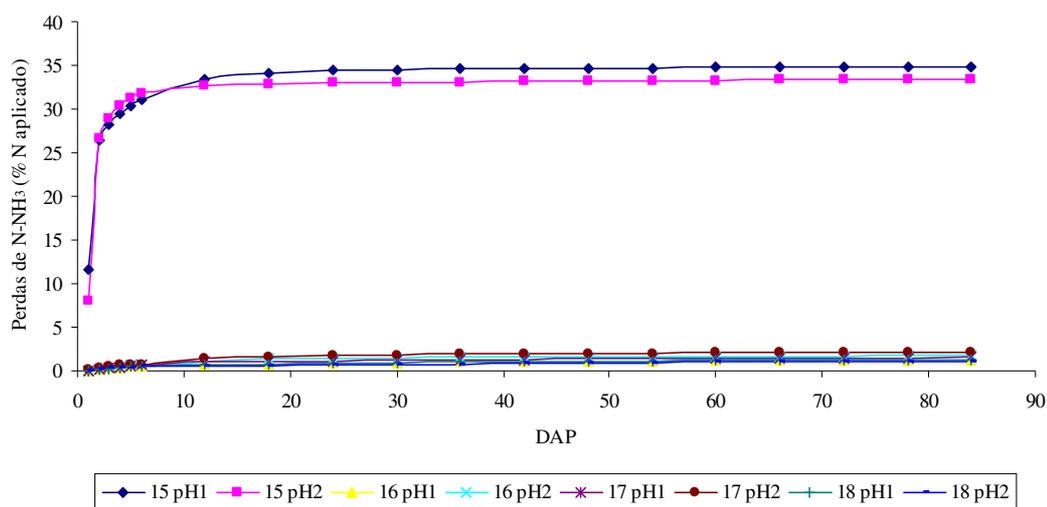


Figura 33. Perdas acumuladas de N-NH₃ em % N aplicado no período 0 a 84 dias após aplicação (DAP) dos fertilizantes convencionais e testemunha. Onde, pH1 é 5,7 e pH2 é 6,6; 15 (Ureia – 45,0%N), 16 (Nitrato de amônio – 34,3%N), 17 (Sulfato de amônio – 21,0%N); Testemunha Absoluta: 18 (sem adição de fonte nitrogenada).

Os resultados apresentados mostram que a maioria dos fertilizantes de eficiência aumentada testados apresentou redução nas perdas de N por volatilização de amônia quando comparados a fonte convencional ureia nos dois pHs, com exceção da ureia recoberta com o polímero Kimcoat LGU e do fertilizante estabilizado Super U (ureia com inibidores DCD e NBPT) e FH Nitro Gold. Sulfato de amônio, nitrato de amônio, IBDU, CDU, Methylene, Ciclus NS e Ureia Formaldeído tiveram as menores perdas durante todos os períodos analisados, não diferindo das perdas de amônia ocorridas na testemunha. Os resultados das análises estatísticas dos dados de perdas de amônia do PPSCU, Producote, Meister LPS30, Meister LP coat L30, ESN e Super N variaram de acordo com o período escolhido para análise, mostrando maior ou menor eficiência de cada tecnologia em reduzir a volatilização da amônia ao longo do tempo.

As menores perdas acumuladas do sulfato de amônio, nitrato de amônio, IBDU, CDU, Methylene, Ciclus NS e Ureia Formaldeído podem ser explicadas pelo sulfato de amônio e nitrato de amônio serem fontes amoniacaais de nitrogênio, onde as perdas por volatilização somente ocorrem em pHs mais elevados (>7) e pela liberação mais lenta do IBDU, CDU, Methylene, Ciclus NS e Ureia Formaldeído no solo, de forma que parte da ureia pode não ter sido liberada no período analisado e/ou sua liberação mais lenta possibilitou imobilização microbiana do N liberado, reduzindo sua volatilização.

Ureia, Kimcoat LGU, Super U e FH NitroGold tiveram as maiores perdas e grandes picos de perdas de amônia no primeiro período analisado (volatilizados do 1°. ao 6°. dia após aplicação dos fertilizantes), resultado esperado pela ureia apresentar uma hidrólise rápida em temperaturas altas como as ocorridas no experimento, de modo que aplicada em superfície fica sujeita a perdas de nitrogênio por volatilização pelo equilíbrio da reação em pH elevado, gerado pela própria hidrólise, tender à presença de amônia livre (Jones et al, 2007) . O FH NitroGold por ser ureia revestida com enxofre deve ter tido uma rápida liberação da ureia pelas fissuras deste recobrimento comportando-se como fertilizante convencional, o polímero utilizado no Kimcoat LGU não mostrou eficiência para liberação controlada da ureia nas condições deste experimento e o Super U pela presença de dois aditivos, um inibidor de urease e outro inibidor de nitrificação propiciou condições para presença de amônia livre e pH para volatilização (Cantarella e Marcelino, 2008).

O Super N (somente pH1), Producote e Poly Plus Sulphur Coated Urea (PPSCU) também tiveram seus picos de perdas nos primeiros seis dias de coletas de volatilizados, mas com valores totais de perdas de amônia muito menores que os da ureia, o que pode ser justificado por serem produtos de liberação lenta ou controlada (PPSCU e Producote) e estabilizados (Super N), cujas perdas de amônia no período foram mais gradativas, de acordo com a liberação do nutriente. O PPSCU e o Producote correspondem a ureia revestida por enxofre elementar mais um polímero, diferente do FH Nitro Gold apenas recoberto por enxofre e selante, mostrando menores perdas de amônia por volatilização em relação a este, confirmando recomendações de Trenkel (2010) do uso de cobertura de polímero sobre a camada de enxofre para uma liberação mais lenta do nutriente. O Super N apresenta o inibidor de urease NBPT reduzindo a velocidade de hidrólise da ureia (Cantarella e Marcelino, 2008).

Analisando-se o segundo período (perdas de amônia entre o 6°. e o 12°. dia após aplicação dos fertilizantes), destacaram-se os picos de perdas de amônia do Super N no pH2 e ESN no pH1 e pH2. Estes picos de perdas foram pequenos, acumulando-se perdas entre 3,2 e 7,24 kg de N-NH₃ por hectare e foram posteriores em relação às altas perdas de ureia convencional.

Considerando-se o terceiro período (volatilizado do 12°. ao 18°. dia após aplicação dos fertilizantes) houve pico de volatilização do Meister LP coat L30. Estes picos de perdas foram

pequenos, acumulando-se perdas de 11,46 kg de N-NH₃ por hectare no pH1 e 3,81 kg de N-NH₃ por hectare no pH2 após 18 dias da aplicação dos fertilizantes.

Na quarta coleta ou período (volatilizado do 18^o. ao 24^o. dia após aplicação dos fertilizantes) houve pico de volatilização do Meister LPS30, atingindo perdas de 12,43 kg de N-NH₃ por hectare no pH1 e 10,60 kg de N-NH₃ por hectare no pH2, níveis menores em comparação com os ocorridos com a ureia. Esta diferença de volatilização entre o Meister LP coat L30 e o LPS30 tem relação com sua marcha de liberação, enquanto a curva de liberação do nutriente do primeiro segue uma forma linear o segundo libera o produto num formato de sigmóide.

Não houve diferença estatística entre as perdas no pH1 e no pH2 nos primeiros 6 dias de coletas, provavelmente pela pequena diferença entre pHs (5,7 e 6,6) e pela maior influência neste período inicial da mudança de pH ocasionada pela própria reação dos fertilizantes no solo. Comparando-se as perdas dos diferentes fertilizantes ao longo dos 84 dias de experimento para muitas destas fontes nitrogenadas não ocorreu diferença entre as perdas de amônia por volatilização nestes pHs, com exceção dos produtos recobertos com polímeros Meister LP coat L30, Meister LPS30 e ESN e para o fertilizante estabilizado Super N que tiveram perdas maiores no pH1. No caso do Super N as maiores perdas por volatilização no pH1 podem ser decorrentes da mais rápida decomposição do NBPT em solos ácidos (Trenkel, 2010). Já sobre esses fertilizantes recobertos de liberação controlada, não foram encontradas informações sobre decomposição e/ou reações de seus polímeros no solo que venham a interferir no pH do solo e/ou no seu tamponamento, gerando os resultados encontrados, por outro lado o pH mais elevado pode ter favorecido a atividade microbiana, levando a uma maior imobilização do nitrogênio liberado lentamente e conseqüentemente menor volatilização. Segundo Brady (1989) a presença de cálcio trocável e pH entre 6 e 8 favorecem o crescimento de bactérias.

4.3. Lixiviação - Amônio

Considerando-se as perdas médias de amônio por lixiviação dos diferentes tratamentos durante as 4 coletas não houve diferença estatística pela análise de variância (ANOVA) entre fertilizantes e testemunha, pHs e suas interações, mas houve diferença estatística entre as coletas. Na Figura 34 e na Tabela 18 observa-se que em termos de perdas médias de nitrogênio na forma de amônio (N-NH₄) em kg/ha dos diferentes tratamentos, a coleta 1 apresentou as maiores perdas, seguida da coleta 2 e da coleta 3 e 4, que por sua vez não diferiram estatisticamente.

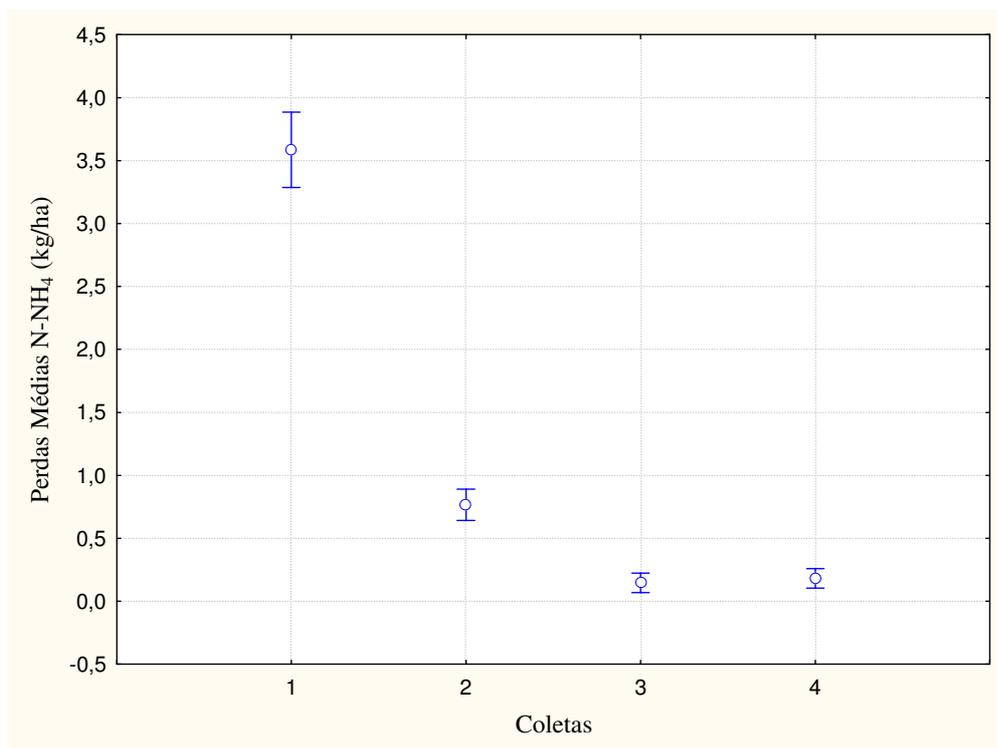


Figura 34. Perdas médias de N-NH₄ (kg/ha) dos diferentes tratamentos em função das coletas, onde as barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%.

Tabela 18. Perdas médias de N-NH₄ (kg/ha) em cada coleta de lixivado.

Coletas	N-NH ₄ (kg/ha)
1	3,585 a
2	0,766 b
3	0,146 c
4	0,182 c

Médias seguidas de mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,05).

Em termos de perda total de N-NH₄, ou seja, considerando-se a somatória das 4 coletas de lixivado, não houve diferença estatística para fertilizantes, pH e interação fertilizantes e pH.

As perdas de amônio por lixiviação foram pequenas provavelmente por ser um cátion, mais retido pela CTC do solo. Concentraram-se na primeira coleta pelo maior volume de água aplicado (o dobro das demais aplicações) e por ser a primeira permitindo o carreamento de maior quantidade de nutrientes livres na solução do solo, de modo que a quantidade de íons lixiviada foi reduzindo-se nas coletas subsequentes.

4. 4. Lixiviação - Nitrato

As análises laboratoriais realizadas determinaram a presença de nitrato mais nitrito. Assumindo-se a premissa de que a maior parte deste nitrogênio determinado estava na forma

de nitrato, os gráficos e tabelas são apresentados como perdas de nitrato, como também os dados estão discutidos com esta mesma base.

Considerando-se as perdas médias de nitrato por lixiviação dos diferentes tratamentos durante as 4 coletas houve diferença estatística pela análise de variância (ANOVA) entre fertilizantes, pHs, coletas e suas diversas interações, com exceção de fertilizantes e pH, onde não houve diferença estatística.

Na Figura 35 e na Tabela 19 são apresentadas as perdas médias de N na forma de nitrato (N-NO₃) em kg/ha dos diferentes tratamentos, onde a coleta 1 apresentou maiores perdas, seguida da coleta 2 e de 3 e 4, que não diferiram estatisticamente por Tukey a 5%.

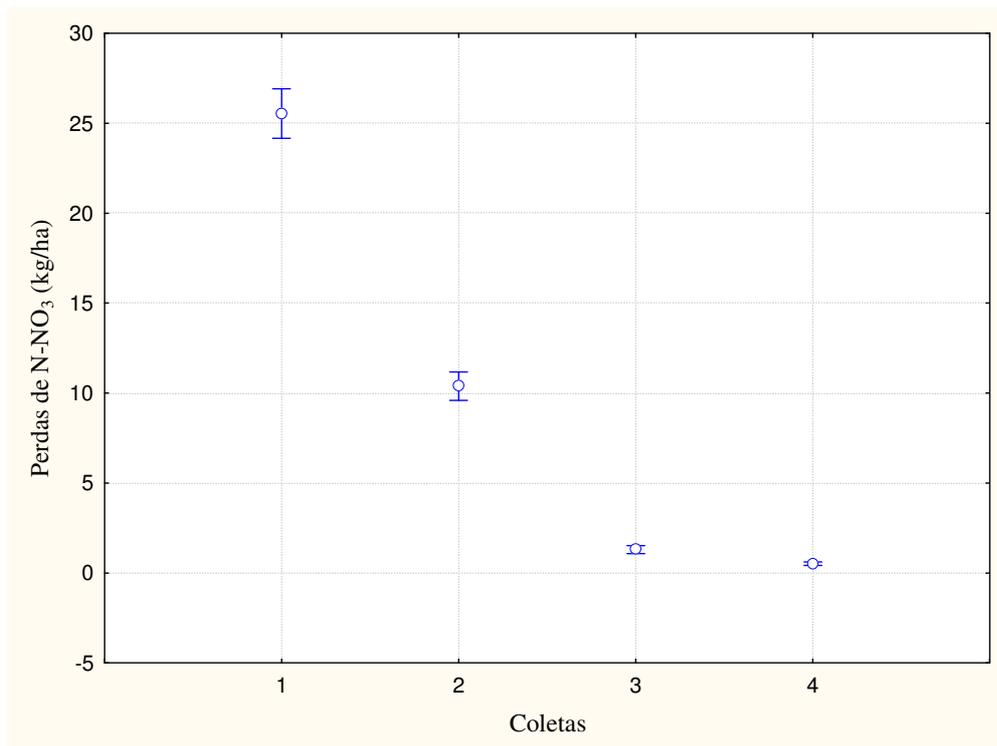


Figura 35. Perdas médias de N-NO₃ (kg/ha) dos diferentes tratamentos em função das coletas, onde as barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%.

Tabela 19. Perdas médias de N-NO₃ (kg/ha) em cada coleta de lixivado.

Coletas	N-NO ₃ (kg/ha)
1	25,544 a
2	10,388 b
3	1,295 c
4	0,521 c

Médias seguidas de mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,05).

A Figura 36 com perdas totais de nitrato por lixiviação (soma das 4 coletas) dos diferentes tratamentos mostra diferenças estatísticas entre fertilizantes, confirmadas pelo teste de Tukey a 5%, conforme Tabela 20. Onde a perda de nitrato pelo IBDU foi significativamente menor quando comparada às perdas do Super U, do Super N e do Meister

L30, mas por sua vez as perdas destes produtos não diferiram estatisticamente das perdas de nitrato dos demais fertilizantes e testemunha. Ou seja, as perdas de nitrato dos diferentes fertilizantes não diferiram estatisticamente das perdas da testemunha.

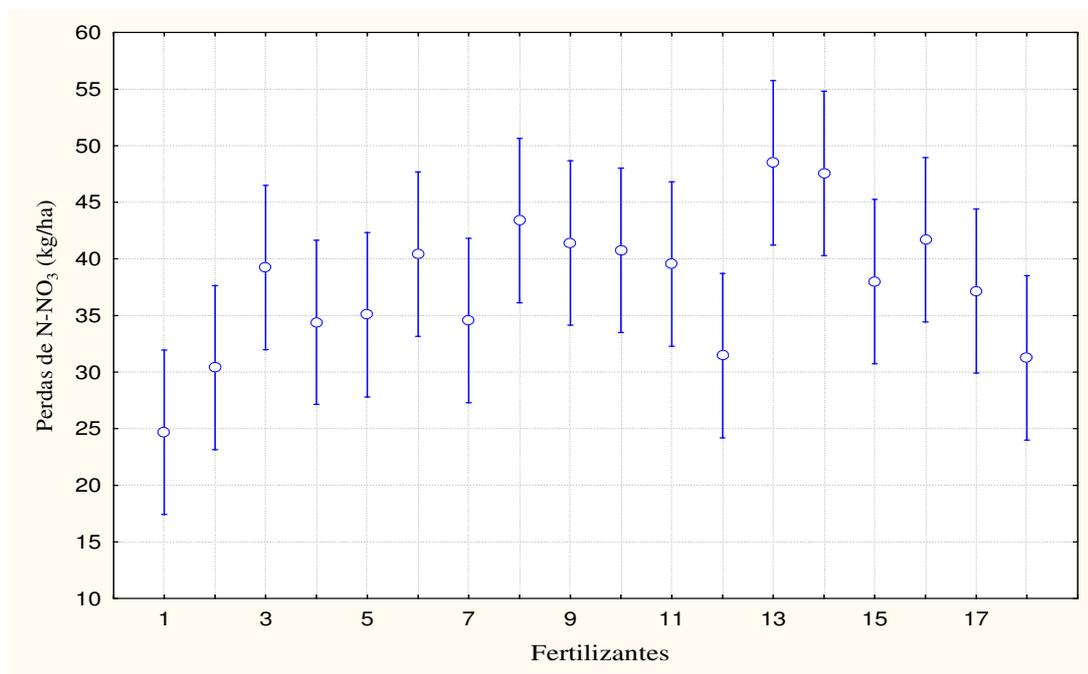


Figura 36. Perdas de N-NO₃ (kg/ha) das 4 coletas de lixiviado em função dos fertilizantes. Onde, Fertilizantes de liberação lenta – ureia aldeído: 1 (IBDU – 32,5% N), 2 (CDU- 31,1%N), 3 (Methylene 75 – 38,7%N), 4 (Ciclus NS-32,5%N), 5 (Ureia Formadeído- 37,5%N); Fertilizantes de liberação lenta ou controlada – ureia recoberta por enxofre/polímero: 6 (Poly Plus Sulphur Coated Urea – 28,4%N), 12 (Producote – 39,8%N), 7 (FH Nitro Gold-42,1%N); Fertilizantes de liberação controlada – ureia recoberta com polímero: 8 (Meister “LP coat L30” – 46,2%N), 9 (Meister “LPS30” – 44,4%N), 10 (ESN-38,9%N), 11 (Kimcoat LGU – 42,4%N); Fertilizantes estabilizados – com inibidores de volatilização ou lixiviação: 13 (Super U-46,4%N), 14 (Super N – 45,7%N); Fertilizantes Convencionais: 15 (Ureia – 45%N), 16 (Nitrato de Amônio – 34,3%N), 17 (Sulfato de Amônio – 21%N); Testemunha Absoluta: 18 (sem adição de fonte nitrogenada). As barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%.

Tabela 20. Perda total de N-NO₃ (kg/ha) das 4 coletas de lixiviado.

Fertilizante	Perda N-NO₃ (kg/ha)
Super U	48,487 a
Super N	47,555 a
Meister L30	43,376 a
NA	41,701 ab
Meister LPS30	41,407 ab
ESN	40,772 ab
PPSCU	40,422 ab
Kimcoat	39,543 ab
Methylene	39,237 ab
Ureia	38,003 ab
AS	37,163 ab
UF	35,068 ab
Nitro Gold	34,548 ab
Ciclus NS	34,395 ab
Producote	31,445 ab
Testemunha	31,252 ab
CDU	30,398 ab
IBDU	24,682 b

Médias seguidas de mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,05).

Comparando-se as perdas médias de nitrato da somatória das 4 coletas dos tratamentos em função do pH (Figura 37) houve diferença estatística entre as perdas sendo maiores no pH1.

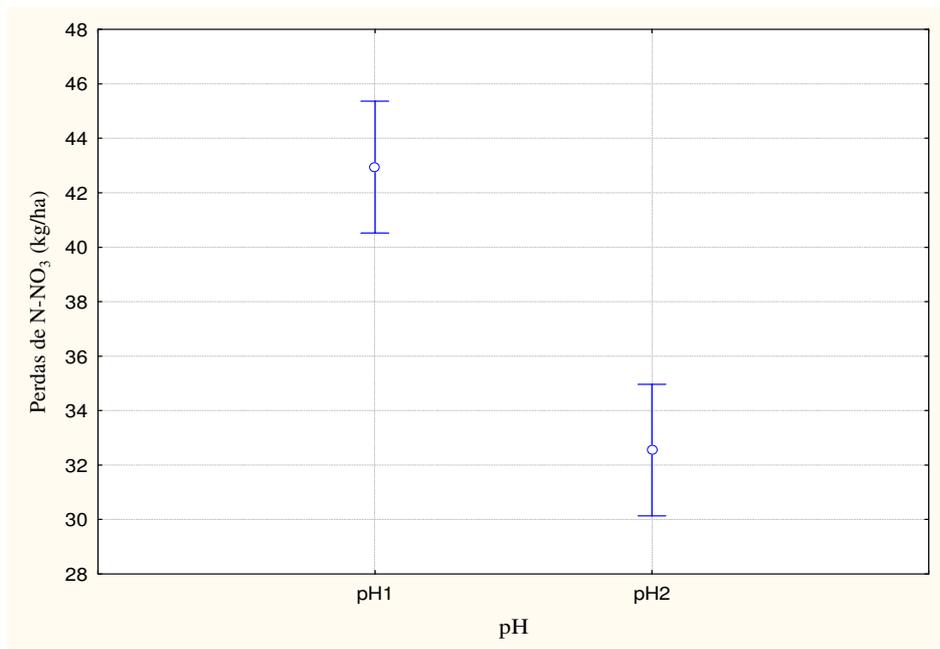


Figura 37. Perdas médias de N-NO₃ (kg/ha) dos tratamentos (soma das 4 coletas) em função do pH. Onde pH1 em água é 5,7 e pH2 em água é 6,6. As barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%.

Na figura 38 e na Tabela 21 apresentam-se as perdas médias de nitrato em função das coletas e pH. Na coleta 1 e pH 1 ocorreram as maiores perdas, seguidas de coleta 1 e pH2. Na coleta 2 a situação inverteu e houve perda maior de nitrato no pH2. Já entre as coletas 3 e 4 independente do pH não houve diferença estatística.

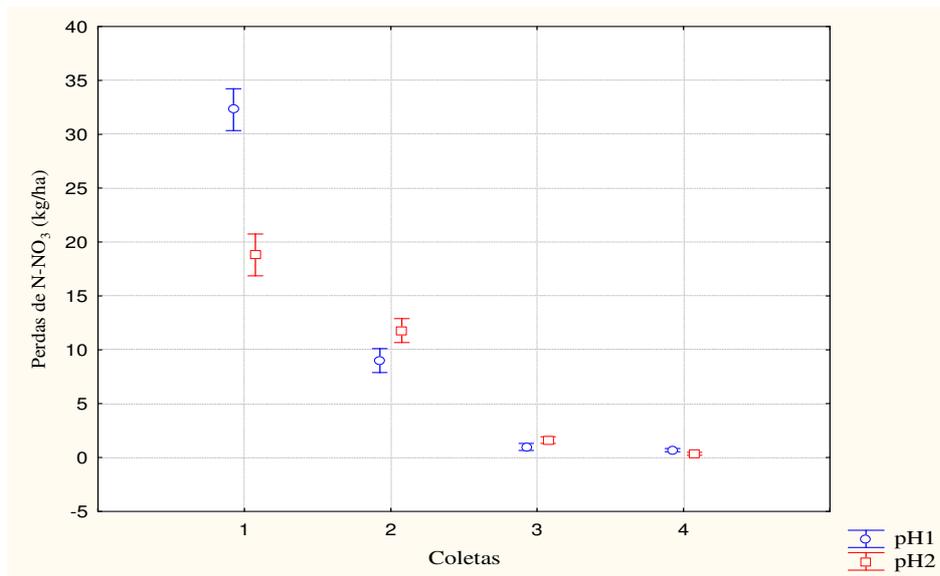


Figura 38. Perdas médias de N-NO₃ (kg/ha) dos diferentes fertilizantes em função de coletas e pH. Onde pH1 em água é 5,7 e pH2 em água é 6,6. As barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%.

Tabela 21. Perda total de N-NO₃ (kg/ha) das 4 coletas de lixiviado.

Coletas – pHs	N-NO ₃ (kg/ha)
Coleta 1 – pH1	32,292 a
Coleta 1 – pH2	18,795 b
Coleta 2 – pH2	11,781 c
Coleta 2 – pH1	8,994 d
Coleta 3 – pH2	1,615 e
Coleta 3 – pH1	0,974 e
Coleta 4 – pH1	0,686 e
Coleta 4 – pH2	0,356 e

Médias seguidas de mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,05).

As perdas de nitrato por lixiviação foram elevadas provavelmente por ser um ânion, pouco adsorvido pelo complexo de troca do solo. As perdas de lixiviado concentraram-se na primeira coleta pelo maior volume de água aplicado (o dobro das demais) e por ser a primeira permitindo o carreamento de maior quantidade de nutrientes livres na solução do solo, de modo que a quantidade de nutrientes lixiviados foi reduzindo-se nas coletas subsequentes.

Houve uma grande variabilidade em termos de perdas de nitrato em números absolutos, mas devido ao grande coeficiente de variação das repetições, as perdas de nitrato dos diferentes fertilizantes não diferiram estatisticamente das perdas da testemunha (sem nitrogênio), onde o nitrato lixiviado provém de reações de mineralização da matéria orgânica do solo, já que a água utilizada foi desmineralizada.

As perdas de nitrato por lixiviação foram estatisticamente menores no pH2 (6,6 em água) considerando-se as perdas médias de todos os tratamentos e coletas. Separando-se por coletas as perdas médias de nitrato em função do pH, na coleta 1 e pH 1 (5,7) ocorreram as maiores perdas, seguidas de coleta 1 e pH2 (6,6). Na coleta 2 a situação inverteu e houve perda maior de nitrato no pH2. Não houve diferença estatística entre as coletas 3 e 4 e os pHs testados. Espera-se maiores perdas de nitrato por lixiviação em pHs mais elevados, onde no balanço de cargas do solo há maior predomínio de cargas negativas que repelem o nitrato e menos cargas positivas para adsorvê-lo, deixando-o mais livre na solução do solo e conseqüentemente mais sujeito a lixiviação, entretanto esta situação somente ocorreu na segunda coleta, na primeira coleta e na média das 4 coletas as perdas foram maiores no pH1 provavelmente pela maior atividade microbiana no pH2 (maior pH e mais cálcio livre pela adição do calcário) promovendo maior imobilização do N liberado, permanecendo menos formas trocáveis na solução do solo para serem lixiviadas neste pH.

4. 5. Lixiviação - Nitrogênio Inorgânico

Através de análises laboratoriais determinou-se nas soluções lixiviadas a quantidade de amônio e de nitrato mais nitrito, somando-se estas formas obteve-se o nitrogênio inorgânico (N inorgânico) utilizado nas análises de dados.

Considerando-se as perdas médias de nitrogênio inorgânico por lixiviação dos diferentes tratamentos durante as 4 coletas houve diferença estatística pela análise de variância

(ANOVA) entre fertilizantes, pHs, coletas e suas diversas interações, com exceção de fertilizantes e pH, onde não houve diferença estatística.

Na Figura 39 e na Tabela 22 apresentam-se as perdas médias de nitrogênio inorgânico em kg/ha dos diferentes tratamentos, onde a coleta 1 apresentou as maiores perdas, seguida da coleta 2 e da coleta 3 e 4, que não diferiram estatisticamente por Tukey a 5%.

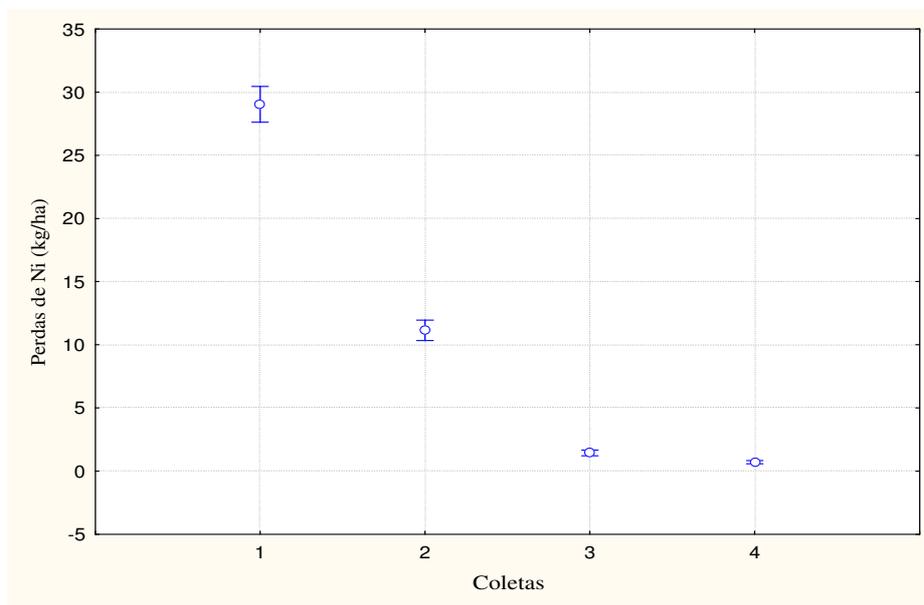


Figura 39. Perdas médias de N inorgânico (kg/ha) dos diferentes tratamentos em função das coletas. As barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%.

Tabela 22. Perdas médias de N inorgânico (kg/ha) em cada coleta de lixivado.

Coletas	N inorg (kg/ha)
1	29,045 a
2	11,157 b
3	1,438 c
4	0,702 c

Médias seguidas de mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,05).

A Figura 40 com perdas totais de N inorgânico dos diferentes tratamentos (soma das 4 coletas) mostra diferenças estatísticas entre fertilizantes, confirmadas pelo teste de Tukey a 5%, conforme Tabela 23. Onde a perda de nitrato pelo IBDU foi significativamente menor quando comparada às perdas do Super U, do Super N e do Meister L30, mas por sua vez as perdas destes produtos não diferiram estatisticamente das perdas dos demais fertilizantes e testemunha.

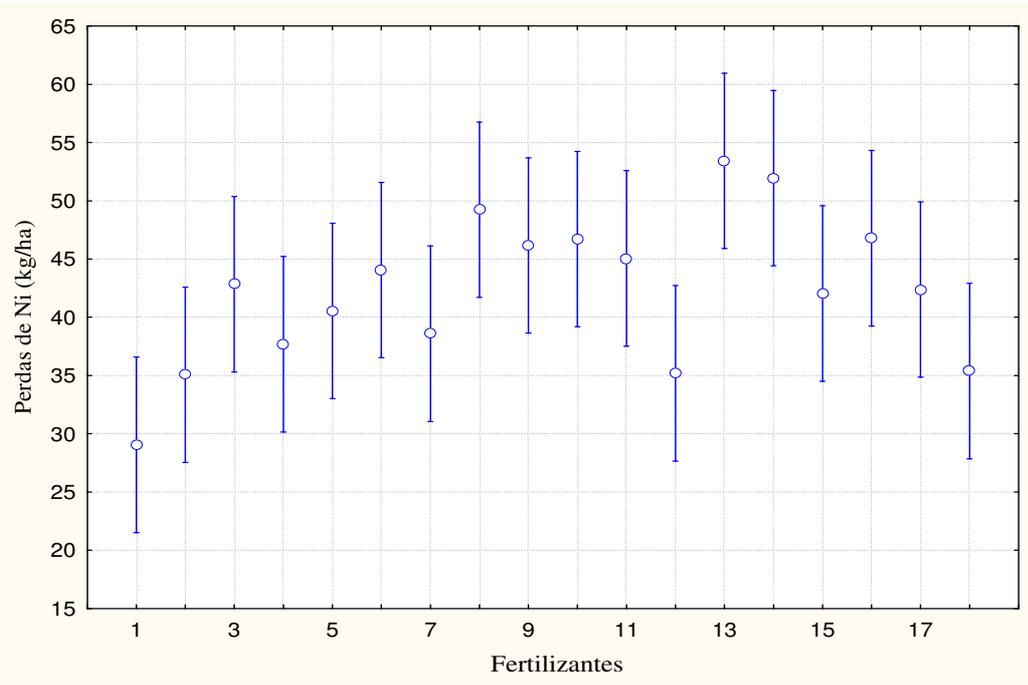


Figura 40. Perdas totais de N inorgânico (kg/ha) das 4 coletas de lixiviado em função dos fertilizantes. Onde, Fertilizantes de liberação lenta – ureia aldeído: 1 (IBDU – 32,5% N), 2 (CDU-31,1%N), 3 (Methylene 75 – 38,7%N), 4 (Ciclus NS-32,5%N), 5 (Ureia Formadeído-37,5%N); Fertilizantes de liberação lenta ou controlada – ureia recoberta por enxofre/polímero: 6 (Poly Plus Sulphur Coated Urea – 28,4%N), 12 (Producote – 39,8%N), 7 (FH Nitro Gold-42,1%N); Fertilizantes de liberação controlada – ureia recoberta com polímero: 8 (Meister “LP coat L30” – 46,2%N), 9 (Meister “LPS30” – 44,4%N), 10 (ESN-38,9%N), 11 (Kimcoat LGU – 42,4%N); Fertilizantes estabilizados – com inibidores de volatilização ou lixiviação: 13 (Super U-46,4%N), 14 (Super N – 45,7%N); Fertilizantes Convencionais: 15 (Ureia – 45%N), 16 (Nitrato de Amônio – 34,3%N), 17 (Sulfato de Amônio – 21%N); Testemunha Absoluta: 18 (sem adição de fonte nitrogenada). As barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%.

Tabela 23. Perda total de N inorgânico (kg/ha) das 4 coletas de lixiviado.

Fertilizante	Perda de N inorg (kg/ha)
Super U	53,427 a
Super N	51,955 a
Meister L30	49,228 a
NA	46,779 ab
ESN	46,722 ab
Meister LPS30	46,163 ab
Kim coat	45,051 ab
PPSCU	44,06 ab
Methylene	42,839 ab
AS	42,389 ab
Uréia	42,04 ab
UF	40,549 ab
Nitro Gold	38,584 ab
Ciclus NS	37,68 ab
Testemunha	35,388 ab
Producote	35,194 ab
CDU	35,067 ab
IBDU	29,047 b

Médias seguidas de mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).

Na Figura 41, comparam-se as perdas de nitrogênio inorgânico por lixiviação em função dos pHs, mostrando que houve diferença estatística e as perdas foram maiores no pH1.

Na Figura 42 e na Tabela 24 apresentam-se as perdas médias de nitrogênio inorgânico em função das coletas e pH. Na coleta 1 e pH1 ocorreram as maiores perdas, seguidas de coleta 1 e pH2. Na coleta 2 a situação inverteu e houve perda maior de nitrato no pH2. Já entre as coletas 3 e 4 independente do pH não houve diferença estatística entre os tratamentos.

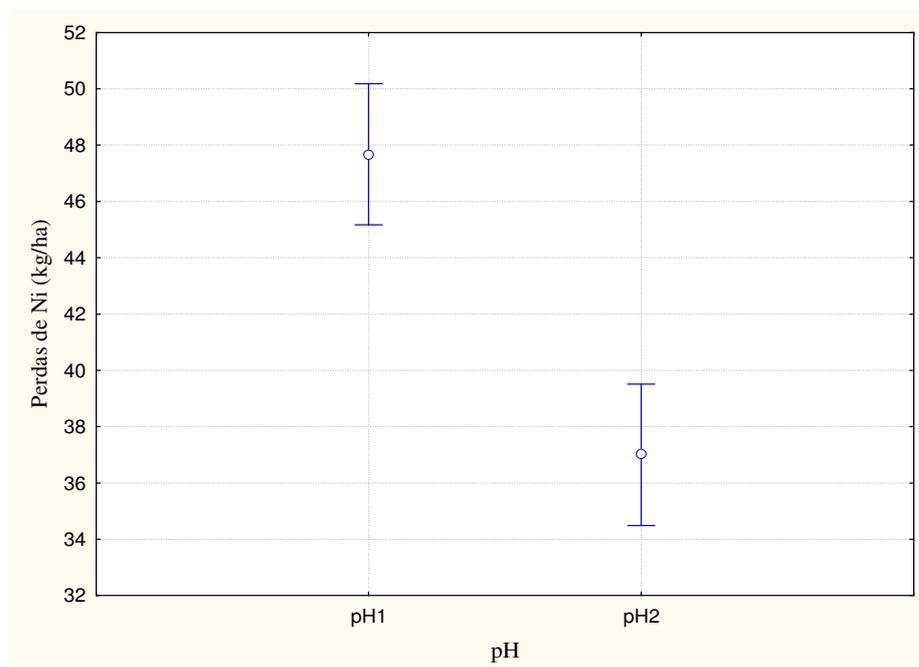


Figura 41. Perda total média de N inorgânico (kg/ha) dos tratamentos em função do pH. Onde pH1 em água é 5,7 e pH2 em água é 6,6. As barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%.

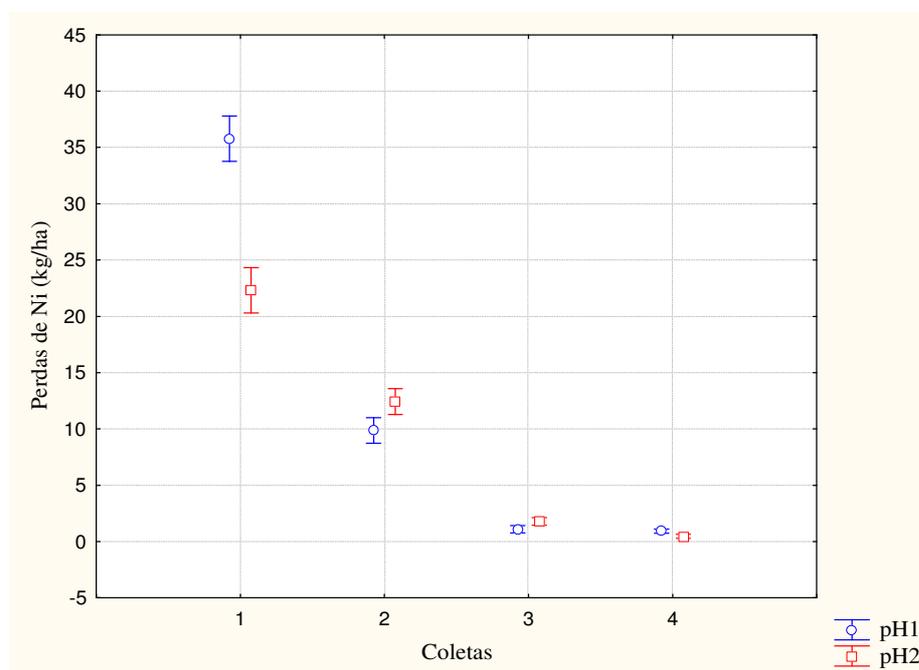


Figura 42. Perdas médias de N inorgânico (kg/ha) dos diferentes fertilizantes em função de coletas e pH. Onde pH1 em água é 5,7 e pH2 em água é 6,6. As barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%.

Tabela 24. Perda total de N inorgânico (kg/ha) das 4 coletas de lixiviado.

Coletas – pHs	N inorg (kg/ha)
Coleta 1 – pH1	35,775 a
Coleta 1 – pH2	22,316 b
Coleta 2 – pH2	12,44 c
Coleta 2 – pH1	9,873 d
Coleta 3 – pH2	1,779 e
Coleta 3 – pH1	1,097 e
Coleta 4 – pH1	0,936 e
Coleta 4 – pH2	0,467 e

Médias seguidas de mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,05).

As perdas de nitrogênio inorgânico por lixiviação seguiram a mesma composição das perdas do nitrato, já que este íon teve a maior parcela de contribuição nas perdas de nitrogênio por lixiviação em comparação com o amônio

As perdas de lixiviado concentraram-se na primeira coleta pelo maior volume de água aplicado (o dobro das demais) e por ser a primeira permitindo o carreamento de maior quantidade de íons livres na solução do solo, de modo que a quantidade de nutrientes lixiviada foi reduzindo-se nas coletas subsequentes. Apesar da grande diferença entre as perdas de nitrogênio inorgânico por lixiviação em termos numéricos, estatisticamente as perdas das fontes nitrogenadas não foram significativas em relação às perdas da testemunha (sem aplicação de nitrogênio). Provavelmente o manuseio do solo para preenchimento da coluna gerou aumento da atividade microbiana e conseqüentemente da mineralização da matéria orgânica do solo, justificando as altas perdas de N por lixiviação da testemunha (35,39 kg/ha).

As perdas de nitrogênio inorgânico por lixiviação foram maiores no pH1 (5,7 em água) considerando-se as perdas médias de todos os tratamentos e coletas. Separando-se por coletas, na coleta 1 e pH 1 ocorreram as maiores perdas, seguidas de coleta 1 e pH2. Na coleta 2 houve maior perda no pH2. Não houve diferença estatística entre as coletas 3 e 4 e os pHs dos tratamentos. Esperava-se maiores perdas de nitrogênio por lixiviação em pHs mais elevados, já que o nitrato é a principal forma lixiviada e em pHs mais elevados há menos sítios de adsorção para o mesmo, ficando livre em maior quantidade na solução do solo e conseqüentemente mais sujeito a perdas. Segundo diversos autores citados por Trenkel (2010), fertilizantes de eficiência aumentada precisam ser melhor estudados em solos tropicais, pois sua eficiência tende a ser mais baixa nesses ambientes. De modo que as maiores perdas de nitrogênio por lixiviação em pH mais ácido podem decorrer de uma maior taxa de liberação de nutrientes neste pH em relação ao pH mais elevado, como também pelo favorecimento da imobilização do N pelos microrganismos do solo em pHs mais elevados, na presença de cálcio livre e em condições de liberação mais lenta do nutriente.

4. 6. Nitrogênio Residual

Inicialmente compararam-se os resultados obtidos pelas análises de solo em miligramas de nitrogênio por quilograma de solo, considerando-se quantidade presente de

amônio (N-NH₄), nitrato (N-NO₃) e nitrogênio inorgânico (obtido pela somatória de amônio com nitrato mais nitrito) nas profundidades de coleta de solo da coluna. As mesmas premissas dos dados de lixiviado foram adotadas para os dados de nitrogênio no solo, ou seja, apesar de ter sido determinado pela análise a soma de nitrato mais nitrito, para efeitos de interpretação dos dados, baseado em informações de literatura, de que apenas uma pequena parte do nitrogênio inorgânico (N inorgânico) encontra-se na forma de nitrito, considerou-se que esta quantidade determinada representa a quantidade de nitrato (N-NH₃) presente no solo.

Tomando-se as profundidades de coleta do solo na coluna: 0-10 cm, 10-30 cm e de 30 cm à base da mesma, que variou de 50 a 55 cm, comparou-se a quantidade de N inorgânico, N-NH₄ e N-NO₃ em mg/kg presente em cada profundidade.

Na Figura 43 verifica-se a maior concentração de N inorgânico mais superficialmente (profundidade 1), confirmado pela comparação de médias por Tukey a 5% na Tabela 25.

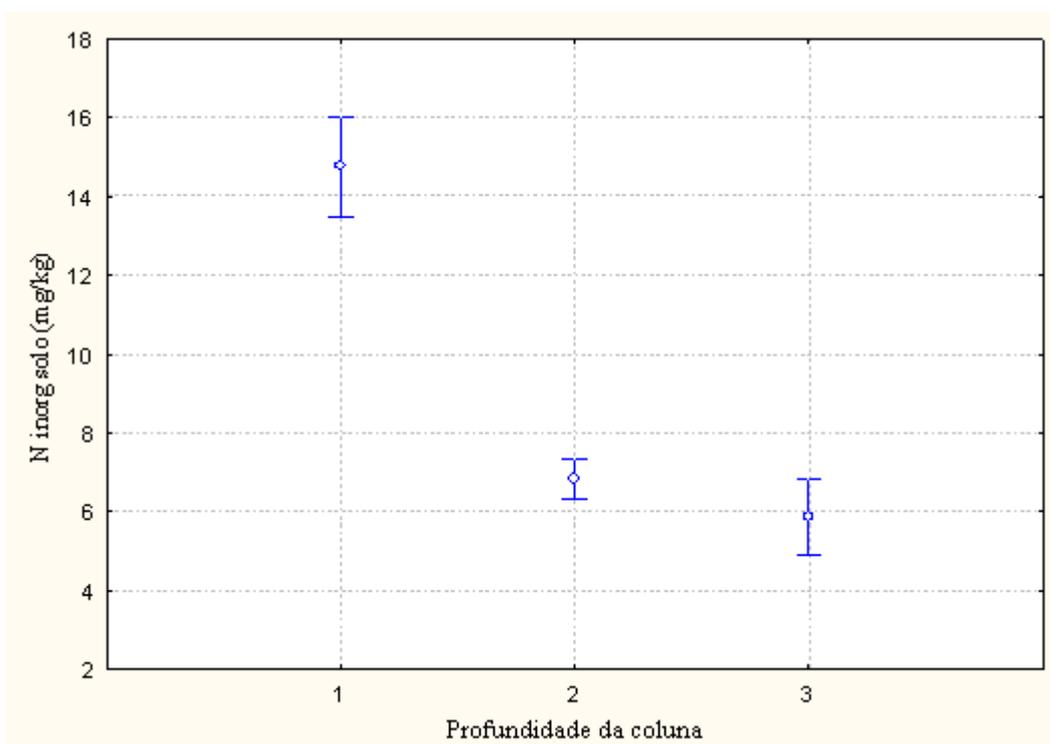


Figura 43. Quantidade média de N inorgânico (mg/kg) em função das profundidades de coleta da coluna. Onde, 1 corresponde de 0-10 cm, 2 de 10-30 cm e 3 de 30 à base da coluna. As barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%.

Tabela 25. Quantidade média de N inorgânico (mg/kg) das 3 profundidades.

Profundidades	N inorg (mg/kg)
1	14,748 a
2	6,828 b
3	5,994 b

Médias seguidas de mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,05). 1 corresponde à profundidade da coluna de 0-10 cm, 2 de 10-30 cm e 3 de 30 à base da coluna.

Na Figura 445 e Tabela 26 compara-se a quantidade de amônio (N-NH₄) nas diferentes profundidades e observa-se o mesmo comportamento, maior concentração na profundidade 1.

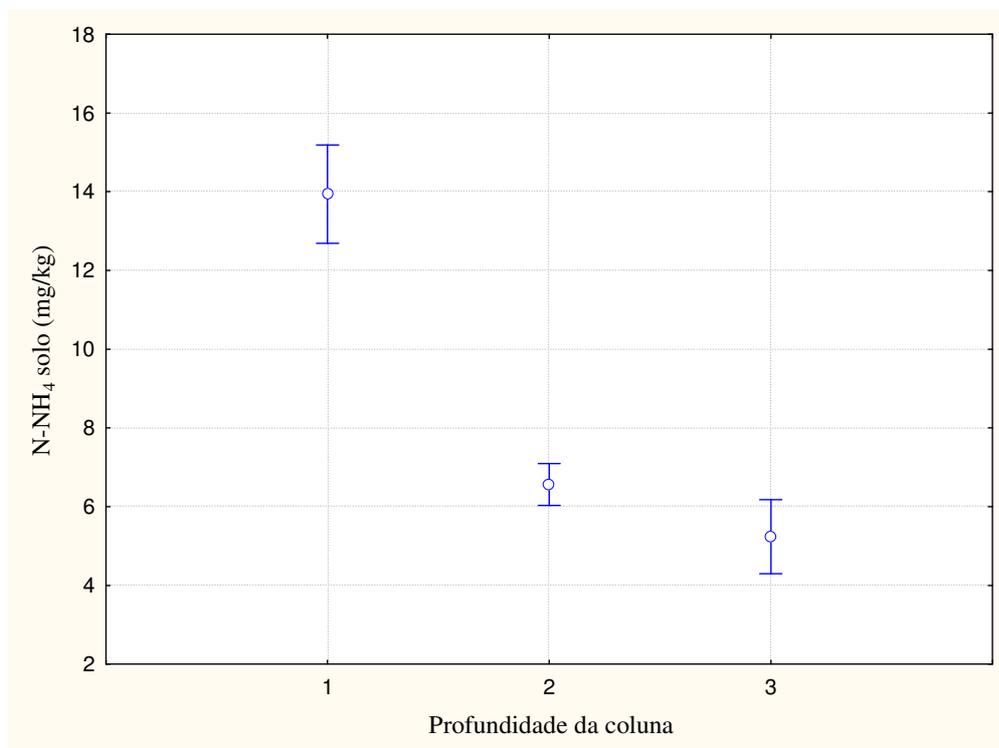


Figura 44. Quantidade média de N-NH₄ (mg/kg) em função das profundidades de coleta da coluna. Onde, 1 corresponde de 0-10 cm, 2 de 10-30 cm e 3 de 30 à base da coluna. As barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%.

Tabela 26. Quantidade média de N-NH₄ (mg/kg) das 3 profundidades.

Profundidades	N-NH ₄ (mg/kg)
1	13,941 a
2	6,565 b
3	5,237 b

Médias seguidas de mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,05). 1 corresponde à profundidade da coluna de 0-10 cm, 2 de 10-30 cm e 3 de 30 à base da coluna.

Na Figura 45 e Tabela 27 encontram-se a quantidade média de nitrato (N-NO₃) nas diferentes profundidades. Onde as maiores concentrações do nitrogênio nesta forma predominaram nas profundidades 1 e 3.

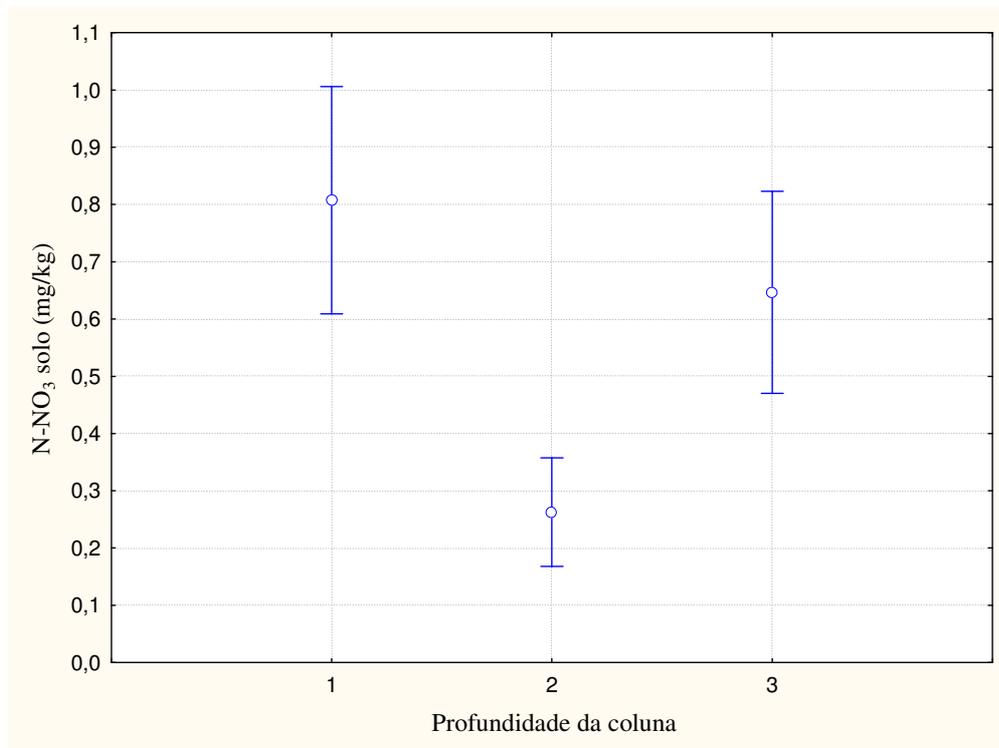


Figura 45. Quantidade média de N-NO₃ (mg/kg) em função das profundidades de coleta da coluna. Onde, 1 corresponde de 0-10 cm, 2 de 10-30 cm e 3 de 30 à base da coluna. As barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%.

Tabela 27. Quantidade média de N-NO₃ (mg/kg) das 3 profundidades.

Profundidades	N-NO ₃ (mg/kg)
1	0,807 a
2	0,263 b
3	0,646 a

Médias seguidas de mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,05). 1 corresponde à profundidade da coluna de 0-10 cm, 2 de 10-30 cm e 3 de 30 à base da coluna.

Na Figura 46 e Tabela 28 consideram-se a quantidade média de N-NH₄ e N-NO₃ presentes no solo em kg/ha. Mostrando a maior concentração de nitrogênio no solo na forma de N-NH₄.

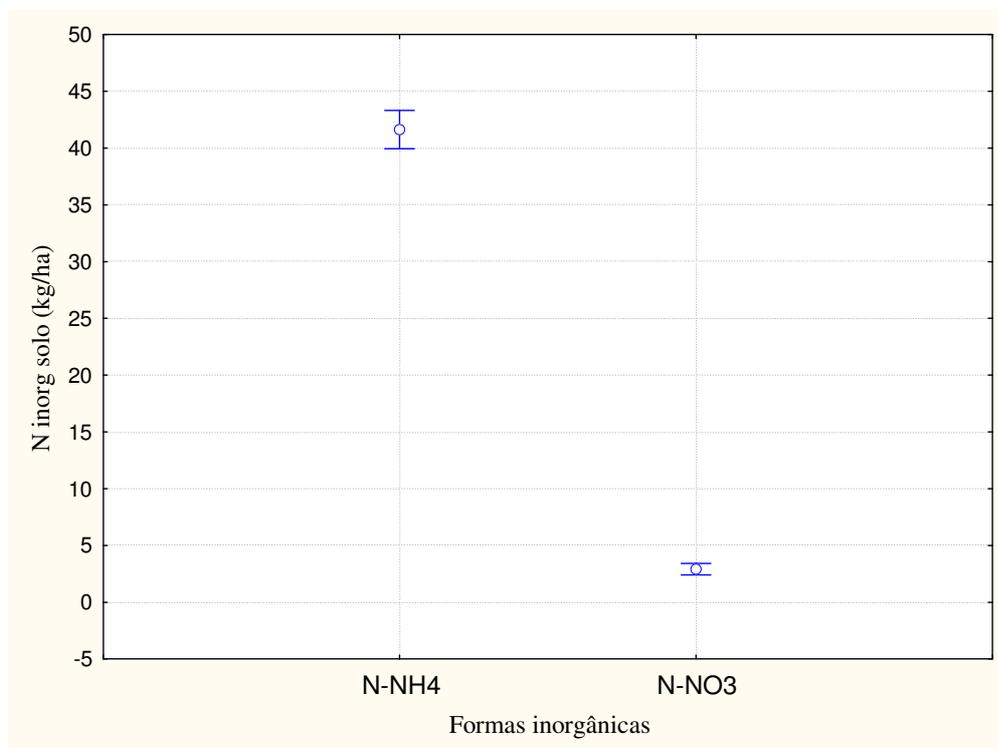


Figura 46. Quantidade média das formas de N inorgânico no solo (kg/ha). As barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%.

Tabela 28. Quantidade média das formas de N inorgânico no solo (kg/ha).

Formas	N inorgânico (kg/ha)
N-NH ₄	41,622 a
N-NO ₃	2,907 b

Médias seguidas de mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey (P<0,05).

Analisando-se os dados de N residual (obtido pela subtração do nitrogênio mineral da média das testemunhas – 36,54 kg/ha, dos demais tratamentos) através da ANOVA não houve diferença estatística entre os fertilizantes (Figura 47) e interação fertilizantes e pH (Figura 48), mas houve diferença estatística entre pHs (Figura 49 e Tabela 29). Havendo maior concentração de N residual no pH2.

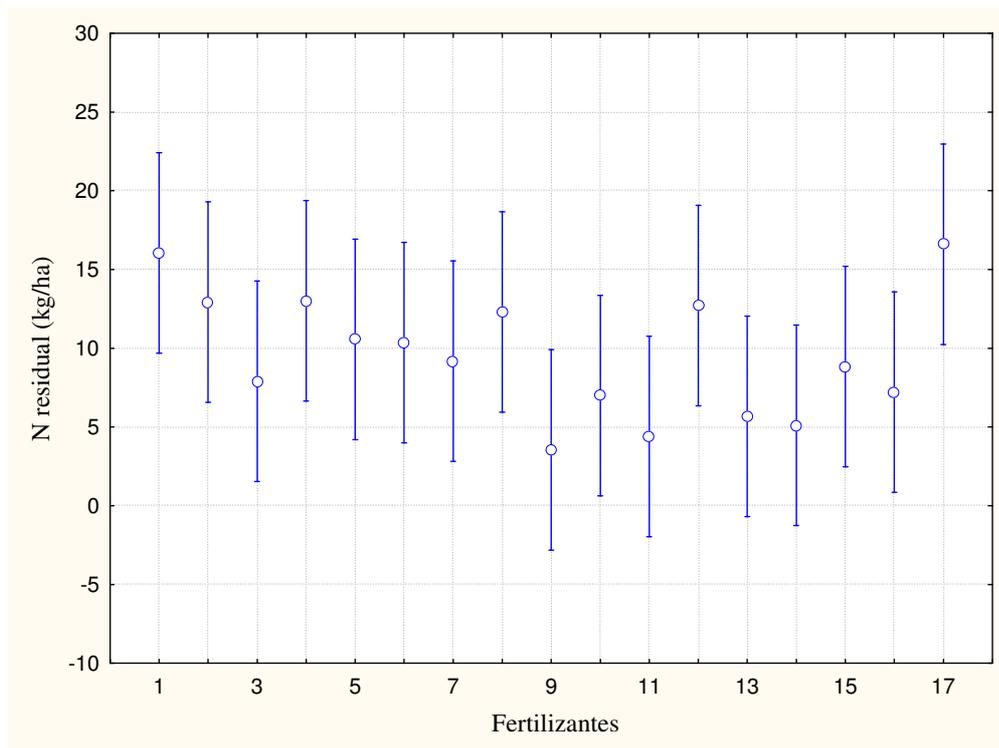


Figura 47. Quantidade de N residual (kg/ha) em função dos fertilizantes. Onde, Fertilizantes de liberação lenta – ureia aldeído: 1 (IBDU – 32,5% N), 2 (CDU-31,1%N), 3 (Methylene 75 – 38,7%N), 4 (Ciclus NS-32,5%N), 5 (Ureia Formadeído-37,5%N); Fertilizantes de liberação lenta ou controlada – ureia recoberta por enxofre/polímero: 6 (Poly Plus Sulphur Coated Urea – 28,4%N), 12 (Producote – 39,8%N), 7 (FH Nitro Gold-42,1%N); Fertilizantes de liberação controlada – ureia recoberta com polímero: 8 (Meister “LP coat L30” – 46,2%N), 9 (Meister “LPS30” – 44,4%N), 10 (ESN-38,9%N), 11 (Kimcoat LGU – 42,4%N); Fertilizantes estabilizados – com inibidores de volatilização ou lixiviação: 13 (Super U-46,4%N), 14 (Super N – 45,7%N); Fertilizantes Convencionais: 15 (Ureia – 45%N), 16 (Nitrato de Amônio – 34,3%N), 17 (Sulfato de Amônio – 21%N). As barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%.

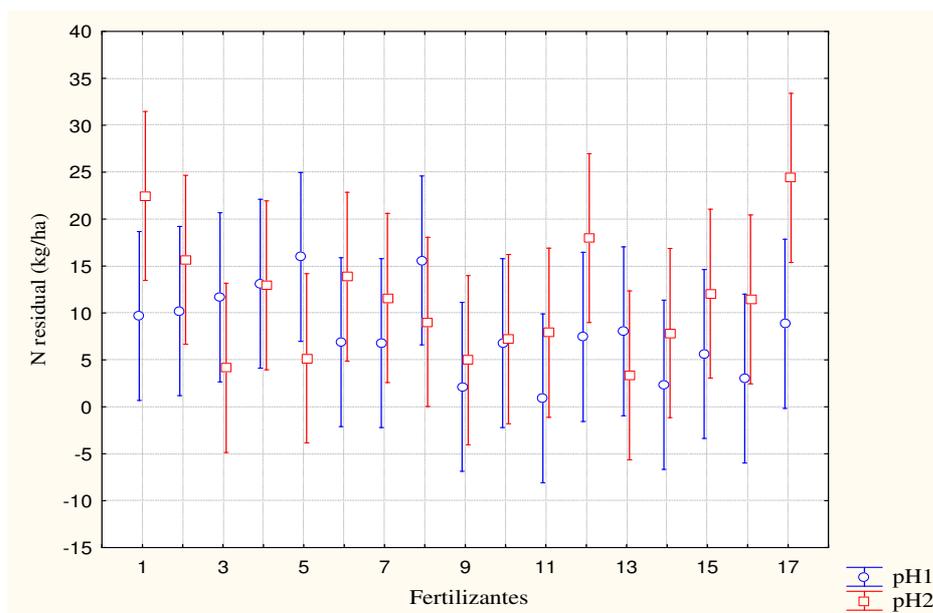


Figura 48. Quantidade de N residual (kg/ha) em função dos fertilizantes e pH. Onde, pH1 é 5,7 e pH2 é 6,6, Fertilizantes de liberação lenta – ureia aldeído: 1 (IBDU – 32,5% N), 2 (CDU-31,1%N), 3 (Methylene 75 – 38,7%N), 4 (Ciclus NS-32,5%N), 5 (Ureia Formadeído-37,5%N); Fertilizantes de liberação lenta ou controlada – ureia recoberta por enxofre/polímero: 6 (Poly Plus Sulphur Coated Urea – 28,4%N), 12 (Producote – 39,8%N), 7 (FH Nitro Gold-42,1%N); Fertilizantes de liberação controlada – ureia recoberta com polímero: 8 (Meister “LP coat L30” – 46,2%N), 9 (Meister “LPS30” – 44,4%N), 10 (ESN-38,9%N), 11 (Kimcoat LGU – 42,4%N); Fertilizantes estabilizados – com inibidores de volatilização ou lixiviação: 13 (Super U-46,4%N), 14 (Super N – 45,7%N); Fertilizantes Convencionais: 15 (Ureia – 45%N), 16 (Nitrato de Amônio – 34,3%N), 17 (Sulfato de Amônio – 21%N). As barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%.

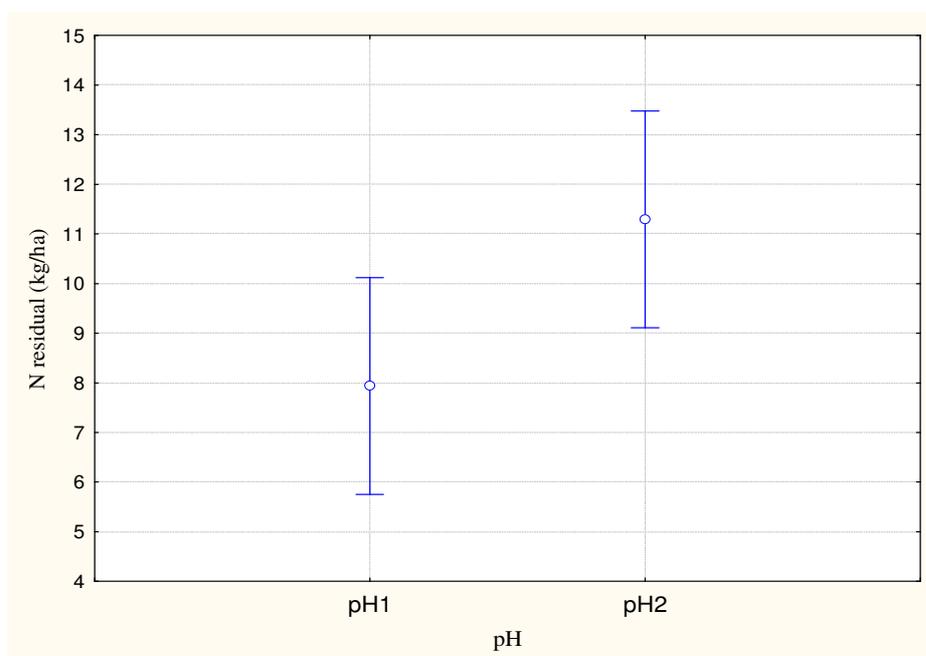


Figura 49. Quantidade média de N residual (kg/ha) dos tratamentos em função do pH. Onde pH1 em água é 5,7 e pH2 em água é 6,6. As barras verticais representam o intervalo de confiança de 95%.

Tabela 29. Quantidade média de N residual em função do pH (kg/ha).

pH	N residual (kg/ha)
1	7,936 b
2	11,292 a

Médias seguidas de mesma letra na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey ($P < 0,05$).

Os dados mostraram maior fração de $N-NH_4$ no solo em relação a $N-NO_3$ muito provavelmente por grande parte no nitrato já ter sido lixiviado com as aplicações de lâminas de água durante 4 dias consecutivos. Este $N-NH_4$ e consequentemente o N inorgânico predominaram na camada superficial (0-10 cm) mais próximos a região de aplicação dos fertilizantes nitrogenados, já que o amônio sendo cátion é adsorvido pelas cargas negativas dos colóides do solo. Já o $N-NO_3$ mais facilmente lixiviado por ser um ânion, pouco retido pelas cargas do solo, predominou na profundidade 1 e 3, mas em pequenas quantidades, já que a amônia concentrada na profundidade 1 sofreu processos de nitrificação e parte do nitrato lixiviado desceu no perfil da coluna de solo para profundidade 3, levado pelas lâminas de lixiviação.

Considerando o N residual houve diferença estatística entre pHs, onde no pH2 houve maior concentração de N residual, provavelmente pela maior presença de cargas negativas para adsorção de $N-NH_4$ num pH mais alto. Entretanto não houve diferença estatística entre os fertilizantes provavelmente por grande parte do N aplicado no sistema já ter sido perdido por volatilização de amônia e lixiviação, quantificados neste trabalho; como também por perdas de desnitrificação (não determinadas pelo experimento), imobilização na matéria orgânica do solo e presença de formas insolúveis de N (não detectáveis pela metodologia utilizada).

5. CONCLUSÕES

Os fertilizantes de eficiência aumentada tiveram menores perdas de amônia por volatilização em relação à ureia, com exceção de Kimcoat LGU, Super U e FH NitroGold, que tiveram perdas similares às da ureia em todos os períodos analisados. Sulfato de amônio, nitrato de amônio, IBDU, CDU, Methylene, Ciclus NS e Ureia Formaldeído tiveram as menores perdas durante todos os períodos analisados, não diferindo das perdas de amônia ocorridas na testemunha. O PPSCU, Producote, Meister LPS30, Meister LP coat L30, ESN e Super N tiveram perdas intermediárias entre testemunha e ureia, variando de acordo com o período analisado.

As perdas de nitrogênio por volatilização da amônia dos tratamentos considerando-se o período total de 84 dias de avaliação concentraram-se nos primeiros 6 dias de coletas e dentro destes 6 primeiros dias, as perdas foram maiores no segundo dia. Muitos dos fertilizantes de eficiência aumentada obtiveram um atraso no pico de perdas de nitrogênio por volatilização da amônia em relação a esta média.

Nos 6 primeiros dias de ensaio de volatilização não houve diferença estatística entre os pHs do experimento (5,7 e 6,6), entretanto considerando-se o período total (84 dias) o pH passou a influenciar nas dinâmicas de perdas de amônia de alguns tratamentos.

As lixiviações realizadas após o experimento de volatilização tiveram como forma inorgânica predominante o nitrato e as maiores perdas ocorreram na primeira e segunda coleta. Não houve diferença estatística entre a quantidade de nitrato lixiviado da testemunha e dos demais tratamentos.

No solo após experimento de volatilização (84 dias) e lixiviação (4 dias) houve a predominância de nitrogênio inorgânico na forma de amônio ($N-NH_4$) e a maior concentração de nitrogênio residual ocorreu no pH2 (6,6), mas não houve diferença estatística entre os tratamentos.

Os fertilizantes de eficiência aumentada com base nos resultados experimentais e revisão de literatura são ferramentas importantes no manejo de adubação para alta produtividade e conservação do meio ambiente.

6. CONSIDERAÇÕES FINAIS

O trabalho permitiu uma avaliação prévia da eficiência dos fertilizantes nitrogenados à base de ureia de eficiência aumentada quanto à redução das perdas de amônia por volatilização.

Para maior aprofundamento de resultados recomenda-se realização de experimentos em casa de vegetação e/ou campo com plantas, para avaliação do aproveitamento do fertilizante pela planta e da produtividade da cultura com estas diferentes fontes.

Para diferenciação das fontes nitrogenadas quanto à lixiviação pode ser feito um experimento específico com lâminas de água empregadas logo após aplicação dos fertilizantes.

Acredita-se que com uma diferença maior entre pHs, como comparando-se pH 5 e pH 7, seriam melhor evidenciadas as interações entre pHs e fertilizantes e as perdas de nitrogênio no sistema.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVES, B.J.R.; SANTOS, J.C.F. dos; URQUIAGA, S.; BODDEY, R.M. Métodos de determinação do nitrogênio em solo e planta. In: HUNGRIA, M.; ARAÚJO, R.S. (Ed.). Manual de métodos empregados em estudos de microbiologia agrícola. Brasília: Embrapa-SPI, 1994. p.449-469.

ANDA (Associação Nacional para Difusão de Adubos). Anuário Estatístico do Setor de Fertilizantes. São Paulo, 2010.

ANDA (Associação Nacional para Difusão de Adubos) – disponível em: <http://www.anda.org.br/home.aspx> acesso em 5 de dezembro de 2011.

ARAÚJO, E.S.; MARSOLA, T.; MIYAZAWA, M.; SOARES, L.H.B.; URQUIAGA, S., BODDEY, R.M.; ALVES, B.J.R. Calibração de câmara semiaberta estática para quantificação de amônia volatilizada do solo. Pesquisa Agropecuária Brasileira, Brasília, v.44, n.7, p.769-776, jul. 2009

BRADY, N.C. Natureza e Propriedades dos Solos. 7ª.Edição. Rio de Janeiro: Freitas Bastos, 1989. 898p.

CABEZAS, W.A.R.L.; KORNDÖRFER, G.H. & MOTTA, S.A. Volatilização de NNH_3 na cultura do milho: II. Avaliação de fontes sólidas e fluidas em sistema de plantio direto e convencional. Rev. Bras. Ci. Solo, 21: 481-487, 1997.

CANTARELLA, H.; MARCELINO, R.. Fontes alternativas de nitrogênio para a cultura do milho. Milho: nutrição e adubação. Piracicaba: ESALQ/USP/LPV, 2008. 204p.

CANTARELLA, H. VII – Nitrogênio. In: Fertilidade do Solo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Viçosa, MG p.375-470, 2007

CANTARELLA, H.; MONTEZANO, Z.F. Nitrogênio e Enxofre. In: Boas Práticas para Uso Eficiente de Fertilizantes – Volume 2 – Nutrientes. Piracicaba: IPNI, 2010. p.5-65.

CANTARELLA, H., QUAGGIO, J.A., GALLO, P.B., BOLONHEZI, D., ROSSETTO, R., MARTINS, J.L.M., PAULINO, V.J., ALCANTARA, P.B. Ammonia losses of NBPT-treated urea under Brazilian soil conditions. IFA International Workshop on Enhanced-Efficiency Fertilizers, Frankfurt. International Fertilizer Industry Association, Paris, France, 2005.

DATAMONITOR (2010): Fertilizers & Agricultural Chemicals: Global Industry Guide. Datamonitor, London, 2011. 331p.

FERNANDES, M.S.; SOUZA, S.R. V - Absorção de Nutrientes. In: Nutrição Mineral de Plantas. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. Viçosa, MG pg 115-152.

FRANCO, J.A.M.; SARAIVA NETO, A. Produção de Fertilizantes Nitrogenados e Suprimento de Matéria-Prima. IN: Simpósio sobre Nitrogênio e Enxofre na Agricultura

Brasileira. , 2006/edição de Tsuioshi Yamada, Silvia Regina Stipp e Abdalla e Godofredo Cesar Vitti. Piracicaba, IPNI Brasil, 2007. 722 p.

FUJITA, T.; TAKAHASHI, C.; USHIODA, T.; SHIMIZU, H. Coated granular fertilizer capable of controlling the effects of temperature upon dissolution-out rate. United States Patent, No. 4, 881,963, 1983.

GRANT, C. Effects of nitrogen and phosphorus fertilizers on the environment. In: Boas Práticas para Uso Eficiente de Fertilizantes – Volume 1 – Contexto mundial e práticas de suporte. Piracicaba: IPNI, 2010. p.43-90.

IBGE (Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística) – disponível em: <http://www.ibge.gov.br/home/estatistica/economia/agropecuaria/indicadoresagro>

IFA (International Fertilizer Industry Association) – disponível em: <http://www.fertilizer.org/ifa/HomePage/Statistics> acesso em 5 de dezembro de 2011.

JONES, C.A.; KOENIG, R.T.; ELLSWORTH, J.W.; BROWN, B.D.; JACKSON, G.D. Management of Urea Fertilizer to Minimize Volatilization. Montana State University – Extension. 2007 12p.

LIN, D., FAN, X., HU, F., ZHAO, H., LUO J. Ammonia volatilization and nitrogen utilization efficiency in response to urea application in rice fields of the Taihu lake region, China. *Pedosphere*, [S.l.], v. 17, n. 5, p 639–645, 2007.

LOPES, A. L.; GUILHERME, L.R.G. Uso Eficiente de Fertilizantes e Corretivos Agrícolas – Aspectos Agrônômicos. ANDA – Associação Nacional para Difusão de Adubos. São Paulo, Boletim técnico 4, set 2000, 70 p.

MALAVOLTA, E. Nutri-Fatos: Informação Agrônômica sobre Nutrientes para as Culturas. Arquivo Agrônômico N.10. Piracicaba: Potafos, 1996. p.1-2.

MALAVOLTA, E. Manual de Nutrição de Mineral de Plantas. São Paulo. Editora Agrônômica Ceres. p. 163-192, 2006.

MOIR, J.L., CAMERON, K.C., DI, H.J. Effects of the nitrification inhibitor dicyandiamide on soil mineral N, pasture yield, nutrient uptake and pasture quality in a grazed pasture system. *Soil Use and Management* 23, p.111-120, 2007.

MORTVEDT, J.J., MURPHY, L.S., FOLLETT, R.H. Fertilizer Technology and Application. Ohio: Meister Publishing, 1999. 199p.

NATALE, W.; MARCHAL, J. Absorção e redistribuição de nitrogênio (15N) em *Citrus mitis* Bl. *Revista Brasileira de Fruticultura*, v.24, p.183-188, 2002.

PAULETTI, V. Nutrientes: Teores de Interpretações. Fundação ABC para Assistência e Divulgação Técnica Agropecuária. Castro, PR: 2004. 86p.

PRASAD, R. POWER, J. Nitrification inhibitors for agriculture, health and the environment. *Advances in Agronomy* 54, p. 233-281, 1995.

RAIJ, B.V.; CATARELLA, H.; QUAGGIO, J.A.; FURLANI, A.M.C. Recomendações de Adubação e Calagem para o Estado de São Paulo. *Boletim Técnico* No. 100, IAC, Campinas, SP, 285p., 1997.

ROY, A. Fertilizer and Diversified Demand for Agricultural Products. Sevilha (Espanha), IFA/IFDC, 3 out. 2011. Palestra ministrada aos alunos do curso Nitrogen Fertilizer Production Technology Workshop.

SANTANA, R.C.; de BARROS, N.F.; NEVES, J.C.L. Biomassa e conteúdo de nutrientes de procedências de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna* em alguns sítios florestais do Estado de São Paulo. *SCIENTIA FORESTALIS* n. 56, p. 155-169, dez. 1999

SHAVIV, A. Controlled Release Fertilizers. IFA International Workshop on Enhanced-Efficiency Fertilizers, Frankfurt. International Fertilizer Industry Association. Paris, France, 2005.

SHOJI, S.; DELGADO, J.; MOSIER, A.; MIURA, Y. Use of controlled release fertilizers and nitrification inhibitors to increase nitrogen use efficiency and to conserve air and water quality. *Communications in Soil Science and Plant Analysis* 32, p.1051-1070, 2001.

SOUZA, S.R.; FERNANDES, M.S.. IX - Nitrogênio. In: *Nutrição Mineral de Plantas*. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. Viçosa, MG pg 215-252.

STAFANATO, J.B. Aplicação de misturas granuladas NK e NS em cultivar de arroz (*Oryza sativa*). 2009, 67p. Dissertação (Mestrado em Agronomia-Ciência do Solo. Departamento de Agronomia. UFRRJ, Seropédica-RJ).

STEVENSON, I.L. Biochemistry of soil. In: *Chemistry of the Soil*. 2^a ed. F. Bear, ed. Van Nostrand Reinhold Co. Nova Iorque. p.242-287

TAIZ, L.; ZEIGER, E. *Fisiologia Vegetal*. Porto Alegre: Artmed, 2009. 848p.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. Análise de solo, plantas e outros materiais. 2. Ed. Porto Alegre: Departamento de Solos. UFRGS. 174p. 1995. *Boletim Técnico*, 5

TRENKEL, M.E. Slow- and Controlled-Release Stabilized Fertilizers. An Option for Enhancing Nutrient Use Efficiency in Agriculture. Paris: International Fertilizer Industry Association (IFA), 2010. 160 p.

TRENKEL, M.E. Improving fertilizer use efficiency: Controlled-release and stabilized fertilizers in agriculture. International Fertilizer Industry Association, Paris, 1997, 151 p.

VITTI, G.C. *Nutrição e Adubação da Cana-de-açúcar e Amendoim*. Piracicaba: 1997 (Apostila da Disciplina de Adubos e Adubação, Curso de Engenharia Agrônômica, Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiróz")

WATSON, C.J., MILLER, H., POLAND, P., KILPATRICK, D.J., ALLEN, M. D.B., GARRETT, M.K., CHRISTIANSON, C.B. Soil properties and the ability of the urease inhibitor N-(n-butyl) thiophosphoric triamide (nBTPT) to reduce ammonia volatilization from surface-applied urea. *Soil Biology & Biochemistry* 26 (9), p.1165-1171, 1994.

WATSON, C.J., MILLER, H. Short-term effects of urea amended with the urease inhibitor N-(n-butyl)thiophosphoric triamide on perennial ryegrass. *Plant and Soil* 184, p.33-45, 1996.

WATSON, C.J. Urease inhibitors. IFA International Workshop on Enhanced-Efficiency Fertilizers, Frankfurt. International Fertilizer Industry Association. Paris, France, 2005.

WATSON, C.J., AKLONZADA, N.A., HAMILTON, J.T.G., MATTHEWS, D.I. Rate and mode of application of the urease inhibitor N-(n-butyl) thiophosphoric triamide on ammonia volatilization from surface-applied urea. *Soil Use and Management* 24, p.246-253, 2008.

WEBER, A., GUTSER, R., MICHEL, H.J., WOZNIAK, H., CHEN, G.X., XU, H., NICLAS, H.J. Dicyandiamide and 1H-1,2,4-Triazole – a new effective nitrification inhibitor for reducing nitrous oxide emissions from cultivated land. In: A. Weiske: Greenhouse Gas Emissions from Agriculture – Mitigation Options and Strategies, Proceedings of the International Conference, Leipzig, Germany, p.273-275, 2004.

WERNER, J.C., PAULINO, V.T., CANTARELLA, H., ANDRADE, N.O., QUAGGIO, J.A. Forrageiras. In: RAIJ, B. van, CANTARELLA, H., QUAGGIO, J.A., FURLANI, A.M.C. Recomendações de Adubação e Calagem para o Estado de São Paulo. (2ª.ed.rev.atual.). Campinas, IAC, 1997. p. 261-273. (Boletim técnico, 100).

WHO. Guidelines for drinking-water quality. 4th ed. Geneva: WHO Library, 2011. 541 p. Disponível em: <www.who.int>. Acesso em: 31 de maio de 2012

WHO. Nitrate and nitrite in drinking-water. Background document for development of WHO Guidelines for Drinking-Water Quality. Geneva: WHO Library, 2007. 21 p. Disponível em: <www.who.int>. Acesso em: 31 de maio de 2012

YANG, Y.Ch.; ZHANG, M.; CHEN, J.Q.; GENG, Y.Q.; CHEN, H.N. Nutrient Release Characteristics of Polymer-Sulphur Coated Urea. *Chemical Fertilizer Industry* 33(1), p.26-30, 2006.

8. ANEXOS

Análise de variância - Volatilização - 6 primeiros dias após aplicação dos fertilizantes - coletas diárias.

Efeitos	SQ	GL	QM	F	p
Fertilizantes	4812	17	283,1	177,5	0,000*
pH	2	1	1,9	1,2	0,279
Fertilizantes x pH	67	17	3,9	2,5	0,003*
Coletas	2768	5	553,6	416,9	0,000*
Coletas x Fertilizantes	8245	85	97	73,1	0,000*
Coletas x pH	73	5	14,5	11,0	0,000*
Coletas x Fertilizantes x pH	294	85	3,5	2,6	0,000*

QM - Quadrado Médio, SQ - Soma de Quadrados, GL - Graus de Liberdade, F - teste Fischer.

Análise de variância - Volatilização - somatória 6 primeiros dias após aplicação dos fertilizantes.

Efeitos	SQ	GL	QM	F	p
Fertilizantes	28866	17	1698	177,5	0,000*
pH	11	1	11	1,2	0,279
Fertilizantes x pH	402	17	24	2,5	0,003*

QM - Quadrado Médio, SQ - Soma de Quadrados, GL - Graus de Liberdade, F - teste Fischer.

Análise de variância - Volatilização nos 84 dias.

Efeitos	SQ	GL	QM	F	p
Fertilizantes	30073	17	1769	134,2	0,000*
pH	511	1	511	38,8	0,000*
Fertilizantes x pH	1409	17	83	6,3	0,000*

QM - Quadrado Médio, SQ - Soma de Quadrados, GL - Graus de Liberdade, F - teste Fischer.

Análise de variância - Lixiviação de N-NH₄ - 4 coletas diárias.

Efeitos	SQ	GL	QM	F	p
Fertilizantes	17	17	1	0,9	0,604
pH	3	1	3,1	2,7	0,103
Fertilizantes x pH	17	17	1	0,8	0,649
Coletas	1155	3	385	369,1	0,000*
Coletas x Fertilizantes	38	51	0,7	0,7	0,929
Coletas x pH	3	3	1	1	0,398
Coletas x Fertilizantes x pH	55	51	1,1	1	0,43

QM - Quadrado Médio, SQ - Soma de Quadrados, GL - Graus de Liberdade, F - teste Fischer.

Análise de variância - Lixiviação de N-NH₄ - somatória 4 coletas.

Efeitos	SQ	GL	QM	F	p
Fertilizantes	69,33	17	4,08	0,875	0,604
pH	12,57	1	12,57	2,699	0,103
Fertilizantes x pH	66,19	17	3,89	0,836	0,649

QM - Quadrado Médio, SQ - Soma de Quadrados, GL - Graus de Liberdade, F - teste Fischer.

Análise de variância - Lixiviação de N-NO₃ - 4 coletas diárias.

Efeitos	SQ	GL	QM	F	P
Fertilizantes	1259	17	74	2,8	0,001*
pH	973	1	973	36,3	0,000*
Fertilizantes x pH	463	17	27	1	0,448
Coletas	50506	3	19502	870	0,000*
Coletas x Fertilizantes	2454	51	48	2,1	0,000*
Coletas x pH	5882	3	1961	2,1	0,000*
Coletas x Fertilizantes x pH	2468	51	48	2,2	0,000*

QM - Quadrado Médio, SQ - Soma de Quadrados, GL - Graus de Liberdade, F - teste Fischer.

Análise de variância - Lixiviação de N-NO₃ - somatória 4 coletas.

Efeitos	SQ	GL	QM	F	P
Fertilizantes	5037	17	296	2,76	0,001*
pH	3893	1	3893	36,29	0,000*
Fertilizantes x pH	1852	17	109	1,02	0,448

QM - Quadrado Médio, SQ - Soma de Quadrados, GL - Graus de Liberdade, F - teste Fischer.

Análise de variância - Lixiviação de N inorgânico - 4 coletas diárias.

Efeitos	SQ	GL	QM	F	P
Fertilizantes	1390	17	82	3	0,001*
pH	1026	1	1026	36	0,000*
Fertilizantes x pH	420	17	25	1	0,626
Coletas	75252	3	25102	1042	0,000*
Coletas x Fertilizantes	2768	51	54	2	0,000*
Coletas x pH	5758	3	1919	80	0,000*
Coletas x Fertilizantes x pH	2745	51	54	2	0,000*

QM - Quadrado Médio, SQ - Soma de Quadrados, GL - Graus de Liberdade, F - teste Fischer.

Análise de variância - Solo - N inorgânico (mg/kg) - 3 profundidades.

Efeitos	SQ	GL	QM	F	P
Fertilizantes	647	17	38	1,36	0,172
pH	0,0003	1	0,0003	0,01	0,919
Fertilizantes x pH	720	17	42	1,51	0,104
Profundidade	6825	2	3413	91,7	0,000*
Profundidade x Fertilizantes	1456	34	43	1,15	0,271
Profundidade x pH	3	2	1	0,03	0,966
Profundidade x Fertilizantes x pH	1798	34	53	1,42	0,072

QM - Quadrado Médio, SQ - Soma de Quadrados, GL - Graus de Liberdade, F - teste Fischer.

Análise de variância - Solo - N-NH₄ (mg/kg) - 3 profundidades.

Efeitos	SQ	GL	QM	F	p
Fertilizantes	568	17	33	1,3	0,206
pH	1	1	1	0,05	0,832
Fertilizantes x pH	794	17	47	1,82	0,034
Profundidade	6332	2	3166	84,94	0,000*
Profundidade x Fertilizantes	1426	34	43	1,15	0,271
Profundidade x pH	6	2	3	0,08	0,92
Profundidade x Fertilizantes x pH	1649	34	48	1,3	0,136

QM - Quadrado Médio, SQ - Soma de Quadrados, GL - Graus de Liberdade, F - teste Fischer.

Análise de variância - Solo - N inorgânico (kg/ha) - formas N-NH₄ e N-NO₃.

Efeitos	SQ	GL	QM	F	p
Fertilizantes	1661	17	98	2	0,066
pH	61	1	61	1	0,315
Fertilizantes x pH	1335	17	79	1	0,195
Formas	108000	1	108000	2010	0,000*
Formas x Fertilizantes	1820	17	107	2	0,018
Formas x pH	7	1	7	0,1	0,725
Formas x Fertilizantes x pH	2110	17	124	2	0,005*

QM - Quadrado Médio, SQ - Soma de Quadrados, GL - Graus de Liberdade, F - teste Fischer.

Análise de variância - Solo - N residual (kg/ha).

Efeitos	SQ	GL	QM	F	P
Fertilizantes	1981	16	123,8	1,502	0,113
pH	383	1	382,7	4,644	0,034*
Fertilizantes x pH	1729	16	108	1,311	0,205

QM - Quadrado Médio, SQ - Soma de Quadrados, GL - Graus de Liberdade, F - teste Fischer.