

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

**DINÂMICA DO NITROGÊNIO EM ARGISSOLO EM FUNÇÃO DE
IRRIGAÇÃO E ADUBAÇÃO NITROGENADA DO MILHO EM
PLANTIO DIRETO**

Fernando Arnuti
(Dissertação de Mestrado)

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

**DINÂMICA DO NITROGÊNIO EM ARGISSOLO EM FUNÇÃO DE
IRRIGAÇÃO E ADUBAÇÃO NITROGENADA DO MILHO EM PLANTIO
DIRETO**

FERNANDO ARNUTI

Engenheiro Agrônomo (UFSM)

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

Porto Alegre (RS) Brasil
Março de 2014

CIP - Catalogação na Publicação

ARNUTI, FERNANDO

DINÂMICA DO NITROGÊNIO EM ARGISSOLO EM FUNÇÃO DE
IRRIGAÇÃO E ADUBAÇÃO NITROGENADA DO MILHO EM PLANTIO
DIRETO / FERNANDO ARNUTI. -- 2014.

89 f.

Orientador: EGON JOSÉ MEURER.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal do
Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia, Programa
de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Porto Alegre, BR-
RS, 2014.

1. ixiviação. 2. cátions básicos. 3. parcelamento
da adubação nitrogenada. 4. rendimento de grãos. I.
JOSÉ MEURER, EGON , orient. II. Título.

FERNANDO ARNUTI
Engenheiro Agrônomo (UFSM)

DISSERTAÇÃO

Submetida como parte dos requisitos
para a obtenção do Grau de
MESTRE EM CIÊNCIA DO SOLO

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

Aprovada em: ___/___/___
Pela Banca Examinadora

Homogado em: ___/___/___
por

EGON JOSÉ MEURER
Orientador-Departamento de Solos /UFRGS

ALBERTO V. INDA JUNIOR
Coordenador do Programa de
Pós-Graduação em Ciência do Solo

CARLOS ALBERTO BISSANI
Departamento de Solos/UFRGS

IBANOR ANGHINONI
Departamento de Solos/UFRGS

PAULO REGIS FERREIRA DA SILVA
Departamento de Fitotecnia/UFRGS

PEDRO ALBERTO SELBACH
Diretor da Faculdade de Agronomia

*Aos meus pais José
Francisco Arnuti e Idilce
Maria Marin Arnuti, pelo
amor, apoio, educação e
ensinamentos.*

Dedico este trabalho

AGRADECIMENTOS

À minha Família, pelo apoio e incentivo.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pela concessão da bolsa de estudo.

À Universidade Federal do Rio Grande do Sul e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo.

Ao Professor Orientador Dr. Egon José Meurer, pela amizade, incentivo e liberdade na condução do presente estudo.

Ao Professor Dr. Paulo Regis Ferreira da Silva, por ter cedido o experimento para a condução deste estudo, pelos ensinamentos e exemplo profissional.

A todos os professores do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pelos ensinamentos nas disciplinas cursadas.

Ao amigo laboratorista Adão Luis Ramos dos Santos, pelo auxílio nas coletas de solo, orientação nas técnicas analíticas e pela boa vontade em sempre ajudar.

Aos funcionários do Departamento de Solos: Jader Amaro e José Ferreira da Silva, pela atenção e auxílio prestados sempre que solicitados.

Aos colegas do Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, pela convivência e amizade. Em especial, agradeço aos colegas Moacir Tuzzin de Moraes, Sérgio Ely Valadão Gigante de Andrade Costa, Bruna Raquel Winck, Daniel Hanke, Douglas Adams Weiler, Janquieli Schirmann, Michael Mazurana, Filipe Selau Carlos e Magno Batista Amorim.

Em especial aos colegas e amigos Amanda Posselt Martins e o José Bernardo Moraes Borin, que partilharam comigo momentos difíceis, mas, principalmente, momentos de grande alegria e descontração.

Aos colegas do Laboratório de Química do Solo: Rosele Clairete dos Santos, Rogério Otávio Schmidt e Tatiana Brum Fontoura pela amizade e agradável convívio no dia-a-dia.

Aos amigos do Departamento de Plantas e Lavouras, em especial, Guilherme Borba Menezes, Cristhiano Gehlen e Guilherme Garcia Alberti pela ajuda na realização deste trabalho a campo.

Aos Bolsistas de Iniciação Científica, Manuela Marinho, Tamires Nunes de Almeida, Diego Cecagno, Isadora Jaeger, Rodrigo Silva, Gabriela Nichel e Fabrício Balerini pela valorosa contribuição de campo e de laboratório que originaram esta dissertação.

“No passado, era uma possibilidade; hoje, é uma realidade; realidade essa que somente foi possível graças a Deus e à ajuda de cada um de vocês, aos quais agradeço de coração”.

Muito Obrigado!!!

DINÂMICA DO NITROGÊNIO EM ARGISSOLO EM FUNÇÃO DE IRRIGAÇÃO E ADUBAÇÃO NITROGENADA DO MILHO EM PLANTIO DIRETO¹

Autor: Fernando Arnuti

Orientador: Prof. Dr. Egon José Meurer

RESUMO

A aplicação de altas doses de nitrogênio (N) no cultivo do milho é prática rotineira em lavouras com altos índices de produtividade. Entretanto, são poucos conhecidos os efeitos de volumes de irrigação após a aplicação de altas doses de N em cobertura na dinâmica do N no perfil do solo. O objetivo desta pesquisa foi avaliar como o manejo da adubação nitrogenada em cobertura e os volumes de irrigação afetam o deslocamento do amônio, nitrato e cátions básicos no perfil do solo. Para isso, foi utilizada uma área experimental de 22 anos de duração em um Argissolo Vermelho Distrófico típico, em Eldorado do Sul, RS. O estudo foi conduzido no ano agrícola 2012/13, com a cultura do milho. Os tratamentos constaram da combinação de três manejos de N em cobertura e dois volumes de irrigação. Os manejos de nitrogênio em cobertura constaram de testemunha sem aplicação de nitrogênio em cobertura, aplicação única (300 kg N ha^{-1}) e aplicações parceladas ($150+150 \text{ kg N ha}^{-1}$) na forma de ureia. A aplicação da dose única de N em cobertura foi realizada no estágio V5-6. O parcelamento da aplicação de 300 kg N ha^{-1} em cobertura foi realizado nos estádios V5-6 (150 kg N ha^{-1}) e V11-12 (150 kg N ha^{-1}). Os volumes de irrigação foram de 20 e 100 mm, aplicados aos nove dias após a primeira adubação nitrogenada de cobertura no estágio V7-8. O maior volume de irrigação (100 mm) aplicado nove dias após a aplicação da dose única de N (300 kg N ha^{-1}) em cobertura aumentou os teores de nitrato nas camadas de 20-30 e 30-40 cm. Houve correlação positiva entre os teores de nitrato e os cátions básicos (cálcio e magnésio) nas camadas abaixo de 15 cm de profundidade, aos dez dias após a segunda adubação nitrogenada de cobertura. O parcelamento da adubação nitrogenada para altos rendimentos do milho é uma alternativa eficiente para diminuir os teores de nitrato nas camadas subsuperficiais do solo. Entretanto, isso não foi vantajoso quando comparado com a aplicação única de N em cobertura para rendimento de matéria seca e quantidade de nitrogênio acumulado na parte aérea no espigamento e rendimento de grãos, independentemente do volume de irrigação.

Palavras-chaves: lixiviação, cátions básicos, parcelamento da adubação nitrogenada, rendimento de grãos.

¹ Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. (89 p.) Março, 2014. Trabalho realizado com apoio financeiro do CNPq.

NITROGEN DYNAMICS IN ULTISOL AS A FUNCTION OF IRRIGATION AND NITROGEN FERTILIZER MANAGEMENT IN CORN UNDER NO-TILL²

Author: Fernando Arnuti
Adviser: Prof. Dr. Egon José Meurer

ABSTRACT

Application of high nitrogen (N) rates in corn is recommended practice to achieve high grain yield. However, little is known about N dynamics in soil profile after addition of high N rates combined with different irrigation volumes. Thus, the objective of this research was evaluate how management of N topdressing fertilization and irrigation volumes affect the movement of mineral N (N-NH_4^+ and N-NO_3^-) and basic cations in the soil profile. For this, a long-term trial (22 years), in Eldorado do Sul/RS, was used. The soil of the area is classified as an Ultisol (Rhodic Paleudult). The study was conducted in the agricultural year 2012/13, with cover crop (black-oat) in winter season and corn in summer season. The treatments consisted of three N topdressing managements combined with two volumes of simulated irrigation. The N topdressing managements were the control (without application), single application (300 kg N ha^{-1}) and split application ($150+150 \text{ kg N ha}^{-1}$) in urea form. Single topdressing dose was applied at V5-6 stage. The split topdressing application was performed in stages V5-6 (150 kg N ha^{-1}) and V11-12 (150 kg N ha^{-1}). The irrigation volumes were 20 and 100mm, applied at nine days after the first N topdressing (V7-8 stage). The highest irrigation volume (100 mm) was applied nine days after the single application of 300 kg N ha^{-1} results in an increase of nitrate content in 20-30 and 30-40 cm soil layers. There was positive relationship between nitrate content and basic cations contents (calcium and magnesium) in soil layers below 15 cm depth, at ten days after the second N topdressing. The split of N topdressing fertilization for high corn yields is an efficient alternative to reduce the nitrate leaching in subsoil. However, it was not advantageous, when compared with single N topdressing application, for shoot dry matter yield, amount of accumulated N in shoots at silking and grain yield, regardless of irrigation volume.

Keywords: leaching, basic cations, split of nitrogen fertilization, grain yield.

² M.Sc. Dissertation in Soil Science. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. (89 p.) March, 2014.

SUMÁRIO

	Pág.
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	3
2.1 Dinâmica do nitrogênio no solo.....	3
2.1.1 Mineralização e imobilização do N.....	4
2.1.2 Nitrificação	6
2.1.3 Volatilização de amônia	9
2.1.4 Desnitrificação	10
2.1.5 Lixiviação de nitrogênio	11
2.1.6 Lixiviação de cátions básicos.....	15
2.2 Nitrogênio na planta.....	16
2.3 Manejo da adubação nitrogenada no milho em sistema plantio direto.....	17
3. HIPÓTESES E OBJETIVOS.....	20
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	21
4.1 Localização e caracterização da área experimental	21
4.2 Manejo do experimento, delineamento experimental e tratamentos.....	22
4.3 Amostragem e determinações no solo e na planta.....	25
4.4 Análise estatística.....	27
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	28
5.1 pH do solo.....	28
5.2 Teores de amônio (N-NH ₄ ⁺) e nitrato (N-NO ₃ ⁻) no perfil do solo	34
5.3 Teores de cátions no perfil do solo	41
5.3.1 Cálcio e magnésio trocáveis	41
5.3.2 Potássio disponível	50
5.4 Características agronômicas	54
6. CONCLUSÕES.....	57
7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	58
8. APÊNDICES	69

RELAÇÃO DE TABELAS

	Pág.
Tabela 1. Caracterização química do solo por camada do Argissolo Vermelho Distrófico típico antes da aplicação dos manejos de nitrogênio em cobertura e volumes de irrigação (estádio V5-6) no ano agrícola 2012/13.....	22
Tabela 2. Atributos físicos do solo por camada do Argissolo Vermelho Distrófico típico da área experimental no ano agrícola 2012/13	22
Tabela 3. Manejos de adubação de nitrogênio no ciclo de desenvolvimento do milho irrigado	24
Tabela 4. Valor de pH em função de volumes de irrigação e manejos de nitrogênio em cobertura na segunda época de amostragem do solo, realizada dez dias após a segunda adubação nitrogenada de cobertura do milho irrigado, na média de camadas de solo.....	33
Tabela 5. Cálcio trocável no solo em função de manejos de nitrogênio em cobertura na primeira época de amostragem do solo, realizada aos dez dias após a primeira adubação nitrogenada de cobertura do milho irrigado, na média dos volumes de irrigação e camadas de solo	44
Tabela 6. Coeficiente de correlação linear entre os teores de cátions básicos e nitrato nas diferentes camadas de solo e volumes de irrigação de 20 e 100 mm em duas épocas de amostragem de solo	46
Tabela 7. Magnésio trocável no solo em função de volumes de irrigação e manejos de nitrogênio em cobertura na primeira época de amostragem do solo, realizada aos dez dias após a primeira adubação nitrogenada de cobertura do milho, na média de camada de solo	48
Tabela 8. Teor de potássio em função de volume de irrigação e manejos de nitrogênio em cobertura na primeira época de amostragem do solo, realizada aos dez dias após a primeira adubação nitrogenada de cobertura do milho irrigado, na média de camadas de solo.....	52
Tabela 9. Rendimento de matéria seca e quantidade de nitrogênio acumulado na parte aérea no espigamento e rendimento de grãos de milho em função de manejos de nitrogênio em cobertura e volumes de irrigação	55

RELAÇÃO DE FIGURAS

	Pág.
Figura 1. Ciclo resumido do nitrogênio no solo.	4
Figura 2. Fluxos da decomposição dos resíduos orgânicos pelos microrganismos. Fonte: Bissani et al. (2008).	6
Figura 3. Representação esquemática dos processos e as causas da acidez do solo ocasionada pela matéria orgânica do solo e fonte amídica de N (a) e fonte amoniacal de N (b), desconsiderando a assimilação direta do NH_4^+ pelas plantas. Fonte: Adaptado de Helyar & Porter (1989).	8
Figura 4. Diagrama esquemático do compartilhamento de carga pelos átomos de P^{+5} e N^{+5} com o oxigênio. Fonte: McBride (1994).	14
Figura 5. Manejo de nitrogênio em cobertura, volume de irrigação e época de amostragem do solo ao longo do ciclo do milho irrigado. A primeira adubação nitrogenada de cobertura (↓) foi realizada no estágio V5-6 com as doses de 0, 150 e 300 kg N ha ⁻¹ . A segunda adubação nitrogenada de cobertura (↓) foi realizada no estágio V11-12, com aplicação de 150 kg N ha ⁻¹ na dose parcelada. O (●) indica a primeira e segunda época de amostragens do solo, realizada nos estádios V7-8 e V14-15, respectivamente. A (↓) indica a diferenciação dos volumes de irrigação 20 e 100 mm no estágio V7-8.	24
Figura 6. Distribuição das precipitações pluviométricas e irrigações suplementares durante o desenvolvimento do milho, ano agrícola 2012/13. ¹ Estádios fenológicos de acordo com a escala de Ritchie et al. (1993). O (N) indica os manejos de nitrogênio em cobertura nos estádios V5-6 e V11-12. O (●) indica a primeira e segunda época de amostragens do solo nos estádios V7-8 e V14-15, respectivamente. A (↓) indica a diferenciação dos volumes de irrigação no estágio V7-8.	25
Figura 7. Valores de pH no solo em função de manejos de nitrogênio em cobertura e de camadas de solo para os volumes de irrigação de 20 mm (a) e 100 mm (b) na primeira época de amostragem, realizada aos dez dias após a primeira adubação nitrogenada de cobertura do milho irrigado. Nessa época de amostragem, foram aplicadas no estágio V5-6 as doses de 150 e 300 kg N ha ⁻¹ . As barras, na horizontal, representam a DMS do teste de Tukey, com nível de 5% de significância.	29

Figura 8. Valores de pH no solo em função de manejos de nitrogênio em cobertura e camadas de solo, na segunda época de amostragem realizada aos dez dias após a segunda adubação nitrogenada de cobertura do milho irrigado, na média de volumes de irrigação. ⁽¹⁾ O parcelamento da aplicação de 300 kg N ha⁻¹ em cobertura foi realizado nos estádios V5-6 e V11-12. ⁽²⁾ A aplicação da dose única de N em cobertura foi realizada no estádio V5-6. As barras, na horizontal, representam a DMS do teste de *Tukey*, com nível de 5% de significância. 32

Figura 9. Valores de pH em função de volumes de irrigação e camadas de solo, na segunda época de amostragem de solo, realizada aos dez dias após a segunda adubação nitrogenada de cobertura do milho irrigado, na média de manejos de nitrogênio em cobertura. As barras, na horizontal, representam a DMS do teste de *Tukey*, com nível de 5% de significância. 33

Figura 10. Nitrogênio amoniacal no solo em função de manejos de nitrogênio em cobertura e de camadas de solo para os volumes de irrigação simulados de 20 mm (a) e 100 mm (b) na primeira época de amostragem, realizada aos dez dias após a primeira adubação nitrogenada de cobertura do milho irrigado. Nessa época de amostragem, foram aplicadas no estádio V5-6 as doses de 150 e 300 kg N ha⁻¹. As barras, na horizontal, representam a DMS do teste de *Tukey*, com nível de 5% de significância. 34

Figura 11. Nitrogênio amoniacal no solo em função de manejos de nitrogênio em cobertura e camadas de solo para os volumes de irrigação de 20 mm (a) e 100 mm (b) na segunda época de amostragem, realizada aos dez dias após a segunda adubação nitrogenada de cobertura no milho irrigado. ⁽¹⁾ O parcelamento da aplicação de 300 kg N ha⁻¹ em cobertura foi realizado nos estádios V5-6 e V11-12. ⁽²⁾ A aplicação da dose única de N em cobertura foi realizada no estádio V5-6. As barras, na horizontal, representam a DMS do teste de *Tukey*, com nível de 5% de significância. 37

Figura 12. Nitrogênio nítrico no solo em função de manejos de nitrogênio em cobertura e de camadas de solo para os volumes de irrigação de 20 mm (a) e 100 mm (b) na primeira época de amostragem, realizada aos dez dias após a primeira adubação nitrogenada de cobertura do milho irrigado. Nessa época de amostragem, tinham sido aplicadas no estádio V5-6 as doses de 150 e 300 kg N ha⁻¹. As barras, na horizontal, representam a DMS do teste de *Tukey*, com nível de 5% de significância. 38

Figura 13. Nitrogênio nítrico no solo em função de manejos de nitrogênio em cobertura e de camadas de solo para os volumes de irrigação de 20 mm (a) e 100 mm (b) na segunda época de amostragem, realizada aos dez dias após a segunda adubação nitrogenada de cobertura no milho irrigado. ⁽¹⁾ O parcelamento da aplicação de 300 kg N ha⁻¹ em cobertura foi realizado nos estádios V5-6 e V11-12. ⁽²⁾ A aplicação da dose única de N em cobertura foi realizada no estádio V5-6. As barras, na horizontal, representam a DMS do teste de *Tukey*, com nível de 5% de significância. 40

Figura 14. Cálcio trocável em função de volumes de irrigação e camadas de solo, na primeira época de amostragem, realizada aos dez dias após a

primeira adubação nitrogenada de cobertura do milho irrigado, na média de manejos de nitrogênio em cobertura. As barras, na horizontal, representam a DMS do teste de *Tukey*, com nível de 5% de significância. 42

Figura 15. Cálcio trocável no solo em função de manejos de nitrogênio em cobertura e de camadas de solo para os volumes de irrigação de 20 mm (a) e 100 mm (b) na segunda época de amostragem, realizada aos dez dias após a segunda adubação nitrogenada de cobertura no milho irrigado. ⁽¹⁾ O parcelamento da aplicação de 300 kg N ha⁻¹ em cobertura foi realizada no estádio V5-6 e V11-12. ⁽²⁾ A aplicação da dose única de N em cobertura foi realizada no estádio V5-6. As barras, na horizontal, representam a DMS do teste de *Tukey*, com nível de 5% de significância. 44

Figura 16. Magnésio trocável em função de volumes de irrigação de 20 e 100 mm e camadas de solo, na primeira época de amostragem de solo, realizada aos dez dias após a primeira adubação nitrogenada de cobertura do milho irrigado, na média de manejos de nitrogênio em cobertura. As barras, na horizontal, representam a DMS do teste de *Tukey*, com nível de 5% de significância. 47

Figura 17. Magnésio trocável no solo em função de manejos de nitrogênio em cobertura e camadas de solo para os volumes de irrigação de 20 mm (a) e 100 mm (b) na segunda época de amostragem, realizada aos dez dias após a segunda adubação nitrogenada de cobertura no milho irrigado. ⁽¹⁾ O parcelamento da aplicação de 300 kg N ha⁻¹ em cobertura foi realizado nos estádios V5-6 e V11-12. ⁽²⁾ A aplicação da dose única de N em cobertura foi realizada no estádio V5-6. As barras, na horizontal, representam a DMS do teste de *Tukey*, com nível de 5% de significância. 49

Figura 18. Potássio no solo em função de manejos de nitrogênio em cobertura e camadas de solo na primeira época de amostragem realizada aos dez dias após a primeira adubação nitrogenada de cobertura do milho irrigado, na média de volumes de irrigação. Nessa época de amostragem, foram aplicadas no estádio V5-6 as doses de 150 e 300 kg N ha⁻¹. As barras, na horizontal, representam a DMS do teste de *Tukey*, com nível de 5% de significância. 51

Figura 19. Potássio no solo em função de manejos de nitrogênio em cobertura e camadas de solo para os volumes de irrigação de 20 mm (a) e 100 mm (b) na segunda época de amostragem, realizada aos dez dias após a segunda adubação nitrogenada de cobertura no milho irrigado. ⁽¹⁾ O parcelamento da aplicação de 300 kg N ha⁻¹ em cobertura foi realizado nos estádios V5-6 e V11-12. ⁽²⁾ A aplicação da dose única de N em cobertura foi realizada no estádio V5-6. As barras, na horizontal, representam a DMS do teste de *Tukey*, com nível de 5% de significância. 53

RELAÇÃO DE APÊNDICES

Apêndice 1. Análises da variância para os atributos químicos do solo na primeira época de amostragem.	70
Apêndice 2. Análises da variância para os atributos químicos do solo na segunda época de amostragem.....	72
Apêndice 3. Análises da variância para as características agronômicas do milho.	74

1. INTRODUÇÃO

O milho é uma cultura exigente em nutrientes, especialmente o nitrogênio, sendo que, na maioria das vezes, a quantidade naturalmente disponível no solo é insuficiente para suprir a demanda da cultura. Assim, o uso de fontes externas desse nutriente representa um dos maiores custos no cultivo do milho.

Dentre os fertilizantes nitrogenados, a ureia é o mais utilizado, por ser mais concentrado (46% de N) e apresentar menor custo por unidade de nutriente, o que favorece também o transporte e sua aplicação na lavoura. Contudo, na maioria das pesquisas e independentemente da cultura, o aproveitamento do N proveniente deste fertilizante pelas culturas agrícolas é, em média, de 50% ou menos.

O Rio Grande do Sul é o sexto maior produtor de milho do país, cultivando cerca de um milhão de hectares, com produtividade média de 5,2 Mg ha⁻¹ (EMBRAPA, 2013). Este cereal é cultivado na maior parte das áreas em sistema plantio direto, sendo a aveia-preta a principal planta de cobertura do solo no inverno. A palha dessa gramínea tem alta relação entre carbono e nitrogênio (C/N), ocasionando imobilização temporária do N mineral pelos microrganismos e diminuindo sua disponibilidade no solo, o que acarreta em maiores doses de fertilizantes nitrogenados para suprir as necessidades de espécies gramíneas.

Nos últimos anos, a quantidade de N aplicado no milho aumentou acentuadamente, devido principalmente ao melhoramento genético das cultivares, que incrementou a resposta das plantas a maiores doses de adubos nitrogenados. Essa mudança, sob o ponto de vista agrônomo, resultou na obtenção de altos patamares de produtividade, almejados tanto por técnicos como produtores. Dessa forma, a aplicação de altas doses de N no milho já é

prática rotineira em lavouras que buscam altos índices de produtividade. Essa aplicação tem sido realizada nos estádios iniciais de desenvolvimento do milho (V4-5), período em que a cultura tem acentuado crescimento vegetativo. Porém, como o sistema radicular é ainda pouco desenvolvido, pode ocorrer perda de N, sobretudo na forma de nitrato (NO_3^-) por lixiviação. O NO_3^- pode percolar no perfil do solo e contaminar águas superficiais e subterrâneas. Isto ocorre devido à predominância de cargas negativas na camada superficial do solo e à baixa interação química do NO_3^- com os minerais do solo, que fazem com que esse ânion percole acompanhando o movimento descendente da água.

Como alternativa para minimizar a lixiviação de NO_3^- no perfil do solo, o parcelamento da adubação nitrogenada de cobertura tem sido uma estratégia eficiente. Isso é resultante da melhor sincronização entre a aplicação e o período de alta demanda do nutriente. Entretanto, deve-se ressaltar que o parcelamento contribui para onerar o custo de produção, devido ao gasto adicional com a aplicação.

Neste contexto, são escassos os estudos a campo que avaliem o efeito de diferentes volumes de irrigação após a aplicação da adubação nitrogenada em cobertura no cultivo do milho. Esta pesquisa avaliou a dinâmica do nitrogênio no perfil de um Argissolo influenciada pelo parcelamento da adubação nitrogenada de cobertura e volume de irrigação durante o cultivo e seus reflexos no rendimento do milho.

2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Dinâmica do nitrogênio no solo

Na natureza, o N pode ocorrer em oito estados de valência ou níveis de oxidação, como: NH_4^+ , NH_3 (amônio e amônia; valência -3), N_2 (nitrogênio elementar; valência 0), N_2O (óxido nitroso; valência +1), NO (óxido nítrico; valência +2), NO_2^- (nitrito, valência +3), NO_2 (dióxido de nitrogênio; valência +4) e NO_3^- (nitrato; valência +5), o que lhe permite desempenhar seu complexo papel nos processos vitais (Trivelin & Franco, 2011). Na Figura 1, é apresentado um esquema do ciclo do N no sistema solo-planta-atmosfera, evidenciando a complexidade das transformações desse elemento.

O ciclo do N no milho apresenta entradas (fontes) e saídas (drenos), cujo balanço pode refletir em curto, médio e longo prazo na produtividade das culturas. As principais entradas de N no milho são a adição de fertilizantes minerais e a fertilização orgânica. As saídas são devidas à remoção e à exportação pelas culturas, à volatilização da amônia, à desnitrificação (que corresponde à conversão de NO_3^- a N_2O e, então, a N_2) e à lixiviação de NO_3^- , para as camadas mais profundas, além da área de exploração do sistema radicular das culturas.

O estudo da dinâmica do N no cultivo do milho não é simples, tendo em vista que o aproveitamento do N de fertilizantes pelas plantas é, geralmente, menor do que 50 % (Trivelin & Franco, 2011).

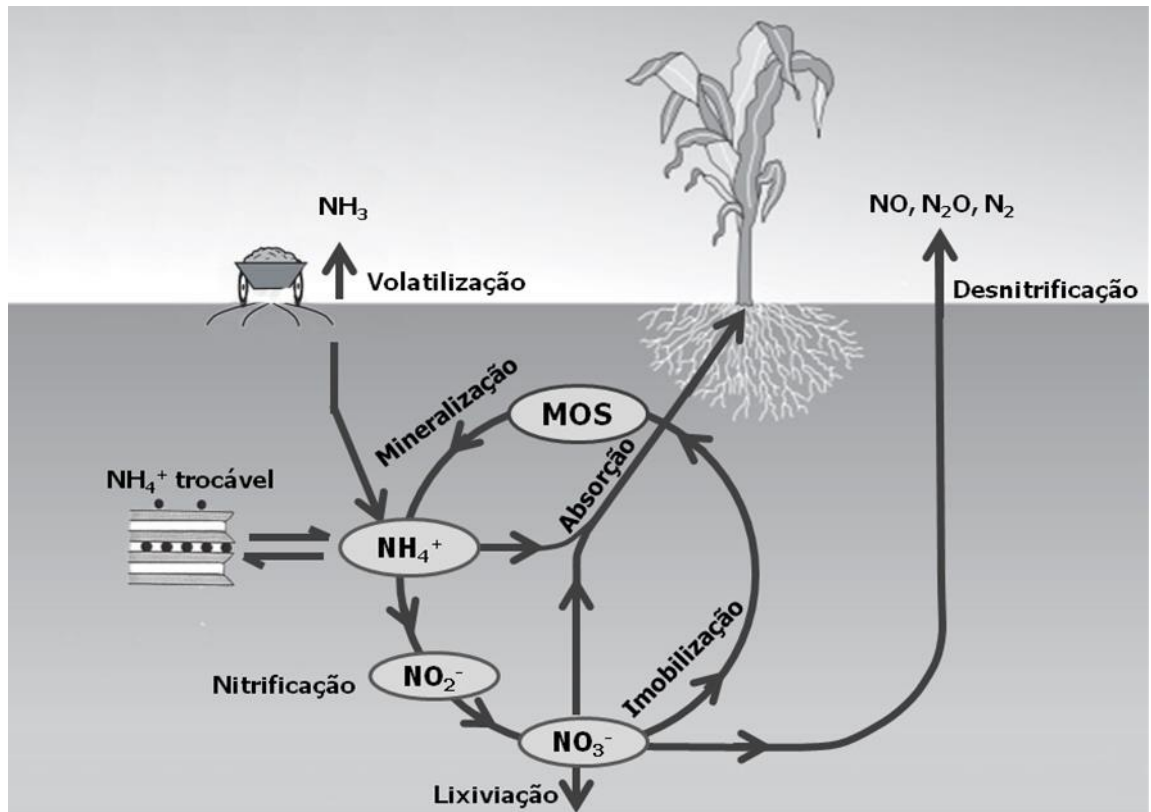


Figura 1. Ciclo resumido do nitrogênio no solo.

2.1.1 Mineralização e imobilização do N

Em geral, em solos, apenas uma pequena fração, normalmente inferior a 5% da quantidade de N total, está em forma mineral, nítrica (NO_3^-) ou amoniacal (NH_4^+), que são as formas de N assimiladas pelas plantas e pelos organismos do solo. Mais de 95% do N do solo encontra-se na forma orgânica (Ceretta, 1995), sendo somente uma pequena parte mineralizada pela microbiota do solo durante o ciclo de uma determinada cultura (Stevenson, 1982), a qual poderá se tornar disponível às plantas (Keendey, 1982).

Para ser absorvido pelas plantas, o N orgânico presente na matéria orgânica do solo deve ser antes transformado para a forma mineral. Nesse processo (mineralização), há conversão do N orgânico primeiramente para NH_4^+ . Este processo é realizado por diversos microrganismos heterotróficos do solo, que utilizam os compostos orgânicos como fonte de carbono, nitrogênio e energia. As condições ótimas para mineralização do N orgânico do solo são aquelas que favorecem a atividade dos microrganismos: pH de 6,0 a 7,0

condições aeróbicas, umidade em torno de 50 a 70% da capacidade de retenção de água pelo solo e temperatura entre 40 e 60 °C (Moreira & Siqueira, 2002).

Do ponto de vista eletroquímico, a mineralização do N orgânico geralmente aumenta o pH do meio, devido ao consumo de prótons (H^+). Inicialmente, a ação de enzimas extracelulares (proteínases, peptidases, etc.), convertem polímeros em monômeros, os quais são transportados para o interior das células onde são metabolizados, resultando na produção de NH_3 , que é liberado da célula para a solução do solo. A amônia produzida nessa reação se equilibra no solo consumindo H^+ e formando NH_4^+ , conforme reação a seguir: $[NH_3 + H^+ \leftrightarrow NH_4^+]$ (Moreira & Siqueira, 2002).

A imobilização do N é um processo que ocorre concomitantemente com a mineralização, porém no sentido inverso. A imobilização é definida como a transformação do N inorgânico (NH_4^+ , NH_3 , NO_3^- , NO_2^-) em formas orgânicas microbianas (Cantarella, 2007). A microbiota assimila os compostos inorgânicos nitrogenados, incorporando-os nos aminoácidos que irão participar da síntese de proteínas de suas células durante a formação de biomassa no solo (Camargo et al., 1999). Com a redução gradativa do carbono dos resíduos, inicia-se o processo de predação e morte dos microrganismos por falta de fonte de energia. Nesta etapa, o N acumulado na biomassa microbiana começa a ser reciclado, ficando novamente disponível às plantas (Bartz, 1998).

Os processos de mineralização-imobilização representam um subciclo dentro do ciclo do N no solo. A prevalência de um processo sobre o outro depende da razão entre os teores de carbono e nitrogênio (relação C/N) do material em decomposição (Figura 2). Se esta relação for baixa, em geral menor que 25 a 30, há liberação rápida de NH_4^+ , que pode ser absorvido pelas plantas. Acima desses valores de relação C/N, ocorre imobilização temporária do N pelos microrganismos. A condição de equilíbrio, na qual a mineralização é aproximadamente igual à imobilização, ocorre quando a relação C/N do substrato está na faixa de 20 a 30 (Moreira & Siqueira, 2002).

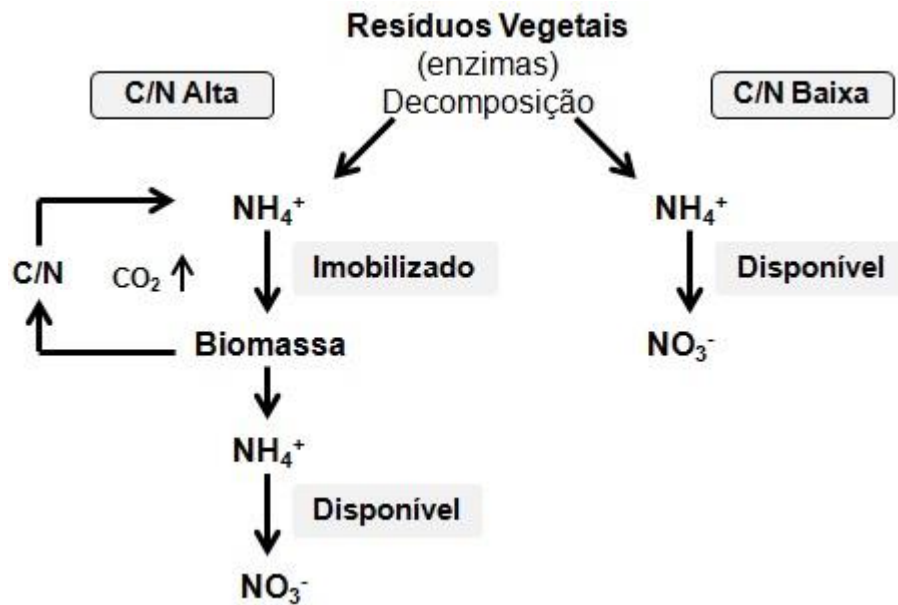


Figura 2. Fluxos da decomposição dos resíduos orgânicos pelos microrganismos. Fonte: Bissani et al. (2008).

A magnitude e a duração da imobilização microbiana do N do solo têm consequências agronômicas importantes, pois afetam a disponibilidade de nitrogênio às culturas, com implicações no modo, época e dose de fertilizante a ser aplicado (Cantarella, 2007). Logo, a adição ao solo de materiais orgânicos pobres em N, como resíduos de gramíneas (C/N alta), faz com que os microrganismos recorram ao N inorgânico disponível na solução do solo para sustentar o crescimento da população, promovida pela abundância de carbono orgânico lábil. Se, por outro lado, os resíduos forem ricos em N (C/N baixa), como os de leguminosas, as necessidades microbianas serão facilmente preenchidas e o N excedente é liberado na forma mineral (Figura 2).

2.1.2 Nitrificação

A nitrificação pode ser definida como uma oxidação biológica em que o NH_4^+ , tanto o proveniente da mineralização da matéria orgânica do solo, quanto o de fertilizantes amídicos ou amoniacais, é convertido a NO_3^- por microrganismos do solo. Os principais fatores reguladores da nitrificação são o oxigênio e o pH do solo. A nitrificação ocorre em valores de pH entre 5,0 e

10,0, com valor ótimo por volta de 8,5 (Sarahwat, 2008). A nitrificação predomina em solos oxigenados, sendo que o NH_4^+ existente é convertido em NO_3^- em três ou quatro semanas, aproximadamente, dependendo do pH do solo (Cantarella, 2007; Sousa & Lobato, 2002). Do mesmo modo, Gomes et al. (1998) observaram que para o sulfato de amônio em condições aeróbicas, o amônio foi totalmente transformado para a forma nítrica após 20 a 30 dias de sua aplicação.

Essa transformação é efetuada em duas etapas: na primeira, o NH_4^+ é convertido em nitrito (NO_2^-) por bactérias do gênero *Nitrosomonas* e, na segunda etapa, o NO_2^- é oxidado a NO_3^- por bactérias do gênero *Nitrobacter*. A nitrificação microbiana do NH_4^+ a NO_3^- é realizada por bactérias quimioautotróficas, que usam a nitrificação como fonte de energia para fixar o CO_2 (Moreira & Siqueira, 2006).

Para que a nitrificação ocorra, condições ótimas de população de microrganismos nitrificantes, pH, temperatura, oxigênio, umidade e disponibilidade do substrato são importantes. A temperatura ótima para a nitrificação situa-se entre 25 a 35°C, condição na qual há melhor desenvolvimento das bactérias responsáveis por esse processo (Sarahwat, 2008). A alta umidade, com reduzida aeração do solo, prejudica a nitrificação, que é dependente de oxigênio. A taxa de nitrificação no solo é máxima na umidade relativa à capacidade de campo (Sarahwat, 2008).

Do ponto de vista da química do solo, a reação de nitrificação libera hidrogênio (H^+), o qual resulta em acidificação do solo. A magnitude da acidificação ocasionada pela nitrificação depende, entretanto, da origem do NH_4^+ e do destino do NO_3^- resultante da reação (Figura 3). Na mineralização do N, há inicialmente o consumo de um próton, tendo como produto o NH_4^+ . Posteriormente, cada molécula de NH_4^+ é transformada em NO_3^- pelo processo de nitrificação, liberando dois prótons para o meio (Figura 3a). Se o NO_3^- for absorvido pelas plantas, o balanço da acidez passa a ser neutro, pois para cada íon de NO_3^- absorvido a planta excreta um íon de OH^- ou HCO_3^- para manter a eletroneutralidade. Contudo, se o NO_3^- for lixiviado, o processo de nitrificação originará um saldo de um íon H^+ para cada íon NH_4^+ nitrificado (Ernani, 2008). A mesma dinâmica vale para o caso do N oriundo de fontes amídicas (como é o caso da ureia).

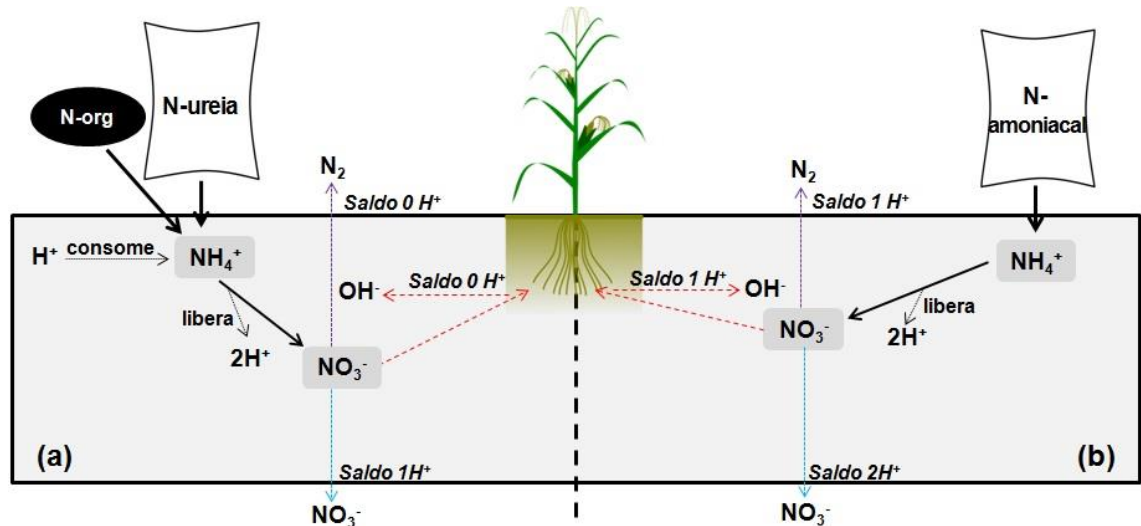


Figura 3. Representação esquemática dos processos e as causas da acidez do solo ocasionada pela matéria orgânica do solo e fonte amídica de N (a) e fonte amoniacal de N (b), desconsiderando a assimilação direta do NH₄⁺ pelas plantas. Fonte: Adaptado de Helyar & Porter (1989).

O NH₄⁺ que é proveniente de um fertilizante nitrogenado de fonte amoniacal (Figura 3b) sempre terá caráter acidificante, podendo resultar no saldo de um ou dois íons H⁺ para cada molécula de NH₄⁺ nitrificada, respectivamente, se o NO₃⁻ gerado na nitrificação for absorvido pelas plantas ou lixiviado (Ernani, 2008).

Com a percolação do NO₃⁻ no perfil, ocorre necessariamente o arraste de um cátion acompanhante (como Na⁺, K⁺, Ca²⁺ ou Mg²⁺), para manter a eletroneutralidade da solução do solo, acentuando ainda mais a acidificação do solo. Sendo assim, quando altas quantidades de fertilizantes nitrogenados são adicionadas, o pH pode diminuir ao longo do tempo, principalmente em solos arenosos ou de baixo poder tampão, nos quais haja intensa lixiviação de nitrato. Em solos argilosos e com altos teores de matéria orgânica, esse efeito acidificante é pouco significativo, principalmente quando a lixiviação de nitrato for pequena (Ernani, 2008).

2.1.3 Volatilização de amônia

A perda de nitrogênio por volatilização de amônia (NH_3) para a atmosfera é um dos principais fatores responsáveis pela baixa eficiência dos adubos nitrogenados, sobretudo para a ureia aplicada sobre a superfície do solo (Bouwmeester et al., 1985). A NH_3 perdida por volatilização é proveniente da mineralização da matéria orgânica ou do fertilizante aplicado, sendo este o fenômeno mais intenso, mediante o aumento no pH do solo (Melo, 1978). De modo geral, as perdas de N por volatilização variam de 30-70% do N aplicado a lanço, em sistema plantio direto (Lara Cabezas et al., 1997a), apresentando um pico no sexto dia após aplicação da ureia em cobertura (Sangoi et al., 2003).

Para que ocorra a volatilização do N da ureia, primeiramente, esta, ao ser aplicada ao solo, é hidrolisada a NH_4^+ pela ação da enzima urease, como mostrado na reação $[\text{CO}(\text{NH}_2)_2 + 3\text{H}_2\text{O} \rightarrow 2\text{NH}_4^+ + 2\text{OH}^- + \text{CO}_2]$ (Bolan & Hedley, 2003). Esta reação origina aumento temporal do pH na zona de aplicação, o que afeta o equilíbrio entre amônia e amônio conforme a seguinte reação $[\text{NH}_4^+ + \text{OH}^- \leftrightarrow \text{NH}_3 + \text{H}_2\text{O}]$. Logo, em condições de pH alcalino, o equilíbrio é deslocado para a direita da reação, predominando a forma gasosa NH_3 (Cantarella, 2007).

Uma alternativa para minimizar as perdas de N por volatilização e aumentar assim sua eficiência é o tratamento prévio desse fertilizante com inibidores da urease (Scivittaro et al., 2010), que atuam sobre a molécula da ureia por um período pré-determinado, minimizando a volatilização de NH_3 . Eles agem retardando as reações que levam à volatilização de NH_3 , até que a ureia possa ser dissolvida e incorporada ao solo pela chuva. Outra maneira de reduzir ou eliminar perdas por volatilização é a incorporação da ureia no solo pela irrigação, devido à alta solubilidade desse fertilizante. Segundo Kissel et al. (2004), em um solo franco-arenoso, 10 a 20 mm de irrigação são considerados suficientes para incorporar a ureia e reduzir ou mesmo eliminar perdas de NH_3 em áreas de solo descoberto. Contudo, a presença de restos culturais tende a aumentar a exigência da lâmina de água a ser aplicada.

Os restos culturais podem também limitar o contato direto dos grânulos da ureia com o solo, limitando sua difusão no solo (Rodrigues & Kiehl, 1992) e favorecendo sua volatilização (Lara Cabeza, et al., 1997b). Por outro lado, em

sistema de plantio direto, o aumento da matéria orgânica nas camadas superficiais do solo favorece a retenção do NH_4^+ , pelo incremento da capacidade de troca de cátions do solo, e limita o aumento do pH, ao aumentar a capacidade de tamponamento do solo, podendo, deste modo, limitar a volatilização da NH_3 (Rojas, 2009).

2.1.4 Desnitrificação

A desnitrificação consiste na redução do NO_3^- para formas gasosas que se perdem para a atmosfera (N_2 e N_2O). Este é o principal processo biológico pelo qual o N reativo retorna à atmosfera na forma de N_2 . Esta reação ocorre somente em solos com baixa disponibilidade de O_2 , porque os microrganismos anaeróbios utilizam o nitrato como receptor de elétrons na cadeia respiratória (Cantarella, 2007). Do ponto de vista da química do solo, a desnitrificação consome prótons e alcaliniza o solo, revertendo parte da acidez produzida durante a nitrificação, conforme a reação: $[2\text{NO}_3^- + 5\text{H}_2 + 2\text{H}^+ \rightarrow \text{N}_2 + 6\text{H}_2\text{O}]$.

Este processo ocorre mais pronunciadamente em solos saturados, mas também pode ocorrer naqueles não saturados, em sítios anaeróbios localizados no interior de agregados do solo (Cantarella, 2007). Sistemas conservacionistas, que preservam a palha ou restos vegetais na superfície do solo, geralmente têm maiores perdas de N por desnitrificação por manterem o solo úmido por mais tempo e por fornecerem mais carbono, comparativamente ao sistema convencional de cultivo, com revolvimento do solo. Além disso, em solos normalmente bem drenados, a desnitrificação pode ocorrer como resultado do preparo inadequado, compactando-o e dando origem a áreas encharcadas pelo acúmulo da água das chuvas ou da irrigação (Sousa & Lobato, 2004).

O estabelecimento de sítios anaeróbios no solo varia em função da estrutura e umidade do solo. Devido a esses fatores, a desnitrificação também varia muito no tempo e no espaço. Mudanças de curto prazo, como fortes chuvas e irrigação, são fenômenos que estão associados a aumentos temporários nas taxas de desnitrificação em um determinado solo (Robertson, 2000).

As perdas por desnitrificação em solos em condições aeróbicas são, em geral, medidas com alto grau de incerteza, variando de 5 a 25% do N aplicado (Meisinger et al., 2008). A maior parte do nitrogênio desnitrificado está na forma de N_2 , embora uma pequena parcela seja liberada como N_2O . O Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC) estimou que cerca de 1% do N proveniente de fertilizantes nitrogenados seja emitido como N_2O (Eggleston et al., 2006).

2.1.5 Lixiviação de nitrogênio

Nos últimos anos, a quantidade de N aplicado na cultura do milho aumentou devido principalmente ao melhoramento genético dos híbridos, tornando as cultivares mais exigentes e requerendo, portanto, maiores quantidades de N para se obter altas produtividades (Matson et al., 1998). Sob o ponto de vista agrônomo, este aumento na quantidade de N utilizado é interessante, porque na maioria das vezes se reflete em maiores produtividades. Mas, do ponto de vista ambiental, é um agravante, caso não sejam adotadas práticas de manejo que visem controlar ou reduzir as perdas de NO_3^- para o lençol freático.

Essa questão é de suma importância, porque no milho o N é o nutriente exigido em maior quantidade e a quase totalidade do N mineral, nos solos sem restrição de oxigênio, se encontra na solução e na forma de NO_3^- , íon com pouca interação com a fase sólida do solo. Assim, o N lixiviado pode atingir o lençol freático e contaminar águas subterrâneas, tornando-se um problema ambiental e de saúde pública. A Organização Mundial de Saúde recomenda que a água potável não apresente concentração maior do que 50 mg L^{-1} de NO_3^- (ou 10 mg L^{-1} de N- NO_3^-) e este limite tem sido adotado por muitos países, que têm estabelecido legislação para controlar a concentração de NO_3^- nas águas (Howarth & Marino, 2006). Dessa forma, ainda que esta questão seja incipiente no Brasil, em muitos países a prevenção já atinge a esfera da propriedade agrícola, implicando que os agricultores devem adequar suas práticas de manejo de fertilizantes nitrogenados para atender a esse padrão (Wortmann, 2006).

A lixiviação consiste no movimento vertical de íons ou de moléculas no perfil do solo para profundidades abaixo daquelas exploradas pelas raízes. É o processo mais importante que ocorre com o nitrogênio em áreas com alta precipitação pluviométrica, principalmente nos solos de países de clima tropical e subtropical (Ernani, 2008). As quantidades de NO_3^- no perfil, susceptíveis à perda, são muito variáveis: dependem da quantidade de nitrogênio adicionado, do tipo de adubo, da taxa de mineralização do nitrogênio nativo, da remoção pelas colheitas, do tipo de cultura e do volume de água percolada. Esses fatores são influenciados pelas características do solo (CTC, pH, textura, estrutura, matéria orgânica, relação C/N, etc.) e pelas condições meteorológicas (precipitação, principalmente) (Reichardt & Timm, 2012).

Além dos fatores citados, o preparo do solo também tem influência na magnitude do processo de lixiviação. O potencial de lixiviação de NO_3^- pode ser maior em solo sob plantio direto em comparação ao plantio convencional, pela maior infiltração de água no solo (Hill, 1990) e porosidade contínua (Azooz & Arshad, 1996), principalmente em períodos chuvosos. Segundo Sainz Rozas et al. (2000), o fluxo preferencial de água no solo ocorre pelos macroporos e pode transportar significativa quantidade de NO_3^- de recente adição ao solo. No entanto, o fertilizante que se difunde entre os agregados, nos microporos, estaria mais protegido de subseqüentes lixiviações, principalmente, em solos argilosos. Em solos arenosos que, em geral, não apresentam fluxo preferencial, a lixiviação de nitrato pode ocorrer de forma uniforme através do perfil do solo (Sainz Rozas et al., 2000). Sexton et al. (1996) observaram que o NO_3^- lixiviado aumentou rapidamente quando as doses de N aplicadas na cultura do milho excederam 100 kg ha^{-1} em um solo arenoso; para doses de N acima de 250 kg ha^{-1} , o NO_3^- lixiviado aumentou exponencialmente.

Em anos com precipitações pluviométricas bem distribuídas, a lixiviação pode não ser problema, por haver um balanço entre a água adicionada e a evapotranspiração da cultura. Porém, quando as chuvas são intensas, ela é preocupante e, para minimizá-la, há preferência pela aplicação parcelada dos fertilizantes nitrogenados. Estimativas da movimentação de NO_3^- são apresentadas por alguns autores. Wild (1972) observou que a lixiviação do NO_3^- atingiu a taxa de $0,5 \text{ mm mm}^{-1}$ de chuva em um Alfissol bem estruturado da Nigéria. Em um solo arenoso da Carolina do Norte (EUA), a taxa variou de 1

a 5 mm mm^{-1} de chuva (Terry & McCants, 1970). No Brasil, Suhet et al. (1986) citam que, decorridos setenta dias após a adubação, a maior parte dos 200 kg N ha^{-1} adicionados na forma de ureia, encontrava-se em camadas mais profundas do solo (60 a 90 cm). Com base em dados experimentais, esses autores, estimaram um índice de lixiviação de NO_3^- entre 1,0 e 1,5 mm de descida no perfil do solo por mm de chuva ocorrida em solos argilosos.

Do ponto de vista eletroquímico, existe grande diferença entre a adsorção ao solo de NO_3^- e a de outros oxianions, como o PO_4^{3-} , o SO_4^{2-} e o H_2BO_3^- , pelos sítios que têm carga positiva na superfície, como os óxidos de Fe e Al. O NO_3^- não é adsorvido especificamente, sua adsorção é apenas eletrostática, dependendo exclusivamente da carga do solo (Alcântara & Camargo, 2005). Além disso, o nitrato é muito suscetível à competição com outros ânions, como o fosfato, que é normalmente adicionado à superfície do solo por meio de fertilizantes e outros insumos (Kinjo & Pratt, 1971). Nos solos em geral, a quantidade de NO_3^- na solução do solo é muito maior que a do íon fosfato. O ânion fosfato tem preferência pelos sítios de adsorção, sendo esta preferência relacionada à carga compartilhada (Figura 4). A carga compartilhada é determinada pela relação entre a valência do átomo central pelo número de oxigênios coordenados pelo átomo. Quanto menor a carga compartilhada, maior é a carga negativa efetiva residente em cada átomo de oxigênio e mais forte é a ligação com os colóides do solo, que têm carga positiva na superfície (McBride, 1994).

Assim, o fosfato tem maior afinidade pelos sítios de adsorção, favorecendo a permanência do nitrato livre na solução do solo. A baixa adsorção do nitrato na superfície dos colóides deve-se, também, à matéria orgânica, que é a principal fonte de carga elétrica negativa em solos altamente intemperizados. O mesmo ocorre em solos com predominância de minerais de argila do tipo 2:1, que também têm cargas negativas. Assim, a matéria orgânica e as argilas repelem o íon nitrato, o que favorece o deslocamento desse ânion com a água que percola no perfil do solo (Kinjo et al., 1978). A menor capacidade de troca de ânions dos horizontes superficiais deve-se ao efeito físico da matéria orgânica do solo, ao bloquear os sítios de carga positiva das superfícies dos óxidos de Fe e Al (Marcano-Martinez & McBride, 1989).

Black & Waring (1976) verificaram intensa mobilidade de NO_3^- na camada de 0 a 15 cm, confirmando a hipótese de haver baixa adsorção de NO_3^- nesta zona, devido à maior densidade de cargas negativas decorrentes da presença de matéria orgânica. Constataram, também, que a mobilidade se tornava maior quanto maior a dose de N aplicado.



Figura 4. Diagrama esquemático do compartilhamento de carga pelos átomos de P^{+5} e N^{+5} com o oxigênio. Fonte: McBride (1994).

A adsorção de nitrato em solos de carga variável tende a aumentar em profundidade e este fenômeno está associado ao incremento da quantidade de cargas elétricas positivas nesta direção (Dyenia, 2000), sobretudo em solos altamente intemperizados. Isso porque esses solos podem apresentar balanço positivo de cargas ($\Delta\text{pH}>0$) nas camadas subsuperficiais, em razão da pouca atuação da matéria orgânica e da presença de óxidos de ferro e alumínio com carga líquida positiva. Esse cenário tende a dificultar a lixiviação desse anião (Araújo et al., 2004), implicando em diminuição da eutrofização de aquíferos nesses ambientes. Cahn et al. (1992) verificaram que a adsorção de NO_3^- variou de pequenas proporções na camada de 0 a 15 cm até 25-50% na camada 90 a 120 cm, ou seja, a adsorção de NO_3^- aumentou com a profundidade.

Gava (2003), em uma revisão de trabalhos sobre perda de N por lixiviação, entre os anos de 1978 e 1999, observou que em 78% dos experimentos conduzidos em diferentes solos e culturas, fertilizados em média com a dose de 92 kg N ha^{-1} , o total de perda de N por lixiviação foi pequeno: $1,26 \text{ kg ha}^{-1}$ em média. Coelho et al. (1991) observaram perdas por lixiviação de apenas 4% do N aplicado como ureia (60 kg N ha^{-1}) na cultura do milho em Latossolo Vermelho-Escuro. Assim, com base nesse e em outros resultados da literatura, esses autores sugerem que as perdas por lixiviação não constituem,

de forma generalizada, o principal fator que afeta o aproveitamento do N de fertilizantes pelo milho.

No Brasil, existem poucos trabalhos que relatam perdas de NO_3^- por lixiviação em sistemas agrícolas. Cantarella (2007) reuniu vários trabalhos da literatura brasileira, mostrando que, de modo geral, as perdas de NO_3^- por lixiviação relatadas para a cultura de milho têm sido baixas. As explicações mais prováveis são o uso de doses de N relativamente baixas, a textura argilosa dos solos e o parcelamento da adubação nitrogenada, no qual a maior parte do N é aplicada no período de ativa absorção de N pelas plantas. A imobilização de N pela microbiota do solo também colabora para reduzir esse tipo de perda (Coelho et al., 1991).

2.1.6 Lixiviação de cátions básicos

O manejo adequado da adubação nitrogenada é importante tanto do ponto de vista econômico (perda de nutrientes) como do ambiental (risco de contaminação do lençol freático). Em períodos de alta intensidade de precipitações pluviométricas, pode haver drenagem do excesso de água, o que favorece a movimentação descendente de ânions. O nitrato por ser mais abundante nos solos, é provavelmente o ânion mais importante nos processos de lixiviação de cátions básicos no perfil do solo. Este ânion provém da nitrificação do íon amônio, seja ele originado da matéria orgânica do solo ou de adubos nitrogenados (Raij, 1991).

Em decorrência disso, este ânion pode funcionar como “carregador” dos cátions básicos solúveis (Ca, Mg, Na e K) no perfil do solo. Estes cátions somente lixiviam se estiverem eletricamente neutros, ou seja, só há lixiviação de cátions se eles estiverem acompanhados de um ânion.

Uma das consequências da lixiviação dos cátions básicos solúveis é a acidificação do solo, seguida pela substituição por prótons (H^+) e/ou cátions ácidos (como o Al^{3+}) no complexo de troca catiônica (Ziglio et al., 1999). Os íons H^+ competem com os cátions por sítios de adsorção (Helyar, K., 2003) e os íons como Al^{3+} e Fe^{3+} (valência +3), por exemplo, são mais fortemente atraídos para as proximidades das partículas com cargas negativas, em

detrimento do sódio e potássio (valência +1) e do cálcio e magnésio (valência +2). Com isso, o alumínio e o ferro permanecem mais no solo, enquanto os outros cátions tendem a serem lixiviados (Bohnen, 2000), ocorrendo diminuição nos valores de pH e aumento da saturação por alumínio, responsáveis pela queda da produtividade das culturas (Raij, 1981).

Nesse sentido, após 16 meses da adição de ureia como fonte de N, Cahn et al. (1993) observaram intensa lixiviação de Ca^{2+} e Mg^{2+} e acidificação das camadas superficiais do solo. Já no trabalho de Di & Cameron (2004), ficou evidenciada a participação do nitrato na lixiviação de cátions básicos no perfil do solo. Esses autores trabalharam com a aplicação de inibidores de nitrificação (diciandiamida), resultando na redução em 50, 52 e 65% da lixiviação de Ca, Mg e K, respectivamente. Blevins et al. (1983) observaram que, após 10 anos de cultivo de milho no sistema de semeadura direta, sem aplicação de calcário, ocorrem perdas acentuadas de Ca trocável do solo. A diminuição na concentração desse nutriente foi de 55 para 12 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$, na camada de 0-5 cm do solo, e de 60 para 19 $\text{mmol}_c \text{dm}^{-3}$, na camada de 5-15 cm, quando as doses de nitrato de amônio aplicadas em cobertura foram aumentadas de 0 para 336 kg ha^{-1} de N. Estes autores atribuíram a exaustão de Ca^{2+} das camadas mais superficiais do solo à presença de íons acompanhantes gerados pela adubação nitrogenada, que promoveram a lixiviação dos cátions de caráter básico.

2.2 Nitrogênio na planta

Dezessete elementos são considerados essenciais para o crescimento e desenvolvimento das plantas, dentre estes o nitrogênio é um dos nutrientes minerais requeridos em maior quantidade pelas plantas e o que mais limita o crescimento e o desenvolvimento. Ele faz parte de proteínas, ácidos nucleicos e muitos outros importantes constituintes celulares, incluindo membranas e diversos hormônios vegetais. Mediante deficiência de nitrogênio, as plantas apresentam sintomas típicos, como clorose gradual nas folhas mais velhas, em função de quantidades reduzidas de clorofila, e redução no crescimento da planta (Souza & Fernandes, 2006).

O N está disponível no solo em diversas formas, incluindo NH_4^+ , NO_3^- , aminoácidos, peptídeos e formas complexas insolúveis. As espécies vegetais diferem na sua preferência por fontes de N, mas o absorvem principalmente sob as formas inorgânicas, como NO_3^- ou NH_4^+ .

Na planta, as formas amoniacal e nítrica exercem diferentes efeitos no crescimento, na produção de biomassa e na reprodução (Lane & Bassirirad, 2002). Em plantas de milho supridas com mistura de N- NO_3^- e N- NH_4^+ , observou-se maior crescimento (Xu et al., 1992; Stromberger et al., 1994) e maiores rendimentos de grãos e de biomassa (Warncke & Barber, 1973) do que aquelas supridas exclusivamente ou predominantemente com nitrato. Uma das razões pelas quais se obtém rendimentos mais altos com a absorção de uma parte do N como NH_4^+ é que este cátion é assimilado diretamente pela planta para formação de aminoácidos. Já o ânion NO_3^- deve ser reduzido a NH_4^+ para assimilação do N pela planta. A redução de NO_3^- no interior da planta requer energia (o NO_3^- é reduzido a NH_4^+ que, depois, é convertido em aminoácidos na planta). Esta energia é proporcionada por carboidratos, os quais podem ser utilizados para o crescimento ou para a formação do grão.

O nitrogênio absorvido da solução do solo é incorporado na planta na forma de aminoácidos. À medida que aumenta o fornecimento de N, as proteínas sintetizadas a partir de aminoácidos promovem o crescimento das folhas, aumentando a área fotossintética (Dechen & Nachtigall, 2007). A taxa de absorção de N aumenta proporcionalmente com o aumento do crescimento até atingir seu pico máximo entre o início do florescimento e o início do enchimento de grãos (Fornasier Filho, 2007). Estima-se que a necessidade de N para produção de uma tonelada de grãos de milho é de 18 a 20 kg N, dos quais 15 kg migram aos grãos, portanto exportados da área (Fancelli, 2000).

2.3 Manejo da adubação nitrogenada no milho em sistema plantio direto

Manejar adequadamente a adubação nitrogenada no milho envolve um complexo processo de tomada de decisão, tais como: condições edafoclimáticas, sistema de cultivo (plantio direto ou convencional), época de

semeadura (época normal ou safrinha), responsividade do material genético, rotação e sucessão de culturas, época e modo de aplicação, fontes de nitrogênio e aspectos econômicos e operacionais (Acosta, 2009). Isso enfatiza a regra de que as recomendações de nitrogênio devem ser cada vez mais específicas e não generalizadas. Diante deste cenário, o manejo de adubação nitrogenada difere do manejo dos demais nutrientes, porque a tomada de decisão envolve aspectos técnicos, econômicos e ambientais (Ceretta & Silveira, 2002), uma vez que esse nutriente está sujeito a perdas por erosão, lixiviação, desnitrificação e volatilização (Amado et al., 2002).

Atualmente, pode-se dizer que os aspectos mais importantes no manejo da adubação nitrogenada na cultura do milho, inserida no sistema de plantio direto, refere-se à época de aplicação e à necessidade de seu parcelamento (Coelho, 2007). Manejar a adubação quanto à época de aplicação e parcelamento das doses significa compatibilizar a dinâmica do N no solo com a fisiologia da planta. Desta forma, para a tomada de decisão alguns aspectos devem ser considerados, como a demanda de N pelo milho durante seu desenvolvimento. A absorção de N pelo milho é intensa no período de crescimento vegetativo (entre os 25 a 45 dias), quando a planta chega a acumular cerca de 43% do que necessita. Nas fases de crescimento vegetativo pleno (8 a 10 folhas ao florescimento), a planta ainda irá absorver mais de 31% de suas necessidades totais, o que mostra a importância da adequada disponibilidade do N no solo até que seja atingido o período de florescimento (Muzilli et al., 1989).

Outro aspecto a ser considerado diz respeito às doses de N a serem aplicadas, pois doses maiores que 120 kg ha^{-1} exigem maiores cuidados no manejo. O N tem uma dinâmica no solo que difere particularmente dos demais nutrientes, especialmente em relação à sua grande mobilidade por predominar na forma mineral como NO_3^- em solos de sequeiro, ânion sujeito a intensa lixiviação (Ceretta et al., 2007). Assim, a observação desses aspectos possibilita várias alternativas de épocas de aplicação de N na cultura do milho, como a aplicação antes do início do cultivo (pré-semeadura), por ocasião da semeadura (adubação de base) ou durante o ciclo da cultura (adubação de cobertura).

A aplicação de N em pré-semeadura foi uma alternativa de manejo introduzida com a adoção do sistema plantio direto e a semeadura do milho em sucessão à aveia preta. Esta estratégia baseia-se no argumento de que o N pode ser imobilizado momentaneamente pela matéria orgânica, em especial pelos resíduos com alta relação C/N, e se tornar disponível para a cultura do milho posteriormente nos estádios de maior demanda, pois os fatores que favorecem a mineralização do N retido na fração orgânica (alta temperatura e umidade) são os mesmos que promovem o crescimento do milho (Cantarella & Duarte, 2004). A alternativa de se aplicar o N em pré-semeadura do milho tem despertado grande interesse, porque apresenta algumas vantagens operacionais, como maior flexibilidade no período de execução da adubação, pelo maior rendimento operacional de máquinas, pela maior facilidade de distribuição a lanço, economia de tempo e de mão-de-obra, menor custo operacional de máquinas e redução no gasto de combustível, lubrificante e reparos (Ceretta, 1998; Coelho et al., 2003).

Como regra geral, os fertilizantes nitrogenados são aplicados de forma parcelada. Normalmente, uma parte da dose recomendada é aplicada na linha por ocasião da semeadura, pelo uso de fórmulas de NPK, e o restante da dose é aplicada a lanço, em superfície, após a emergência das plantas em uma (estádio V4) ou duas aplicações (estádio V4 e V8) de cobertura, conforme estágio de desenvolvimento da planta (Ceretta et al., 2007). Esta estratégia de parcelamento da aplicação permite diminuir as perdas por lixiviação após a semeadura e tem maior coincidência com as fases de maior necessidade das culturas.

3. HIPÓTESES E OBJETIVOS

Hipóteses

A mobilidade do nitrogênio mineral no perfil do solo é afetada pelo volume de irrigação e manejo da adubação nitrogenada de cobertura. Há maiores perdas de N-NO_3^- por lixiviação com a aplicação de altos volumes de irrigação e quando a adubação nitrogenada de cobertura é realizada em uma única aplicação. Nessa situação, haverá também maior deslocamento de cátions básicos no perfil do solo.

Objetivos

a) Verificar como os manejos da adubação nitrogenada de cobertura e os volumes de irrigação aplicados aos nove dias após a primeira adubação nitrogenada de cobertura no milho afetam o deslocamento do nitrogênio mineral no perfil do solo.

b) Avaliar como o parcelamento da adubação nitrogenada de cobertura e os volumes de irrigação aplicados aos nove dias após a primeira adubação nitrogenada de cobertura afetam o rendimento de grãos do milho.

c) Avaliar como a mobilidade do nitrato afeta o deslocamento de cátions básicos no perfil do solo durante o cultivo do milho.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1 Localização e caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido a campo, durante o ano agrícola 2012/13, na Estação Experimental Agronômica, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, no município de Eldorado do Sul (30^o 05' latitude Sul, 51^o 39' longitude Oeste e altitude de 42 m), região ecoclimática da Depressão Central do Estado do Rio Grande do Sul.

O clima da região é subtropical úmido, de verão quente, do tipo fundamental "Cfa", conforme classificação climática de Köppen. A temperatura média anual é de 18,8 °C, sendo a média das mínimas de 13,9 °C e a média das máximas de 24,4 °C. A precipitação média anual é de 1.455 mm, apresentando, frequentemente, períodos de deficiência hídrica entre os meses de novembro a março, período que abrange o florescimento, a formação e o enchimento de grãos de milho na semeadura realizada em outubro (Bergamaschi et al., 2013).

A área experimental está sendo cultivada em sistema de semeadura direta desde 1992. Na primavera/verão, é realizada a rotação entre as culturas de soja e milho, sendo que metade da área experimental é cultivada com milho e o restante com soja. No outono/inverno, são cultivados nabo forrageiro (*Raphanus sativus*), ervilhaca comum (*Vicia sativa*) ou aveia preta (*Avena strigosa*) como coberturas antecessoras ao milho e aveia preta ou aveia branca (*Avena sativa*) como culturas antecessoras à soja.

O solo da área experimental é classificado como Argissolo Vermelho Distrófico típico (Streck et al., 2008), com textura superficial franco argilo arenosa.

Alguns atributos químicos e físicos do solo por ocasião da instalação do experimento no ano agrícola 2012/13 são apresentados nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1. Caracterização química do solo por camada do Argissolo Vermelho Distrófico típico antes da aplicação dos manejos de nitrogênio em cobertura e volumes de irrigação (estádio V5-6) no ano agrícola 2012/13

Camada	pH	MO	Cátions trocáveis			H+Al	CTC _{pH7,0}	K	V	m	N-NH ₄ ⁺	N-NO ₃ ⁻
			Ca	Mg	Al							
-- cm --	H ₂ O	g kg ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹				mg dm ⁻³	----	%	----	-- mg kg ⁻¹ --	
0 a 5	5,1	27,6	4,2	1,5	0,3	4,3	10,5	210	59	4	16,2	17,8
5 a 10	5,0	17,0	3,1	1,1	0,4	4,2	8,9	163	53	7	14,5	9,4
10 a 15	4,6	14,5	2,1	0,9	1,2	5,3	8,6	130	38	27	6,8	11,4
15 a 20	4,3	15,4	1,9	1,0	2,3	7,0	10,1	112	31	42	10,3	10,0
20 a 30	4,2	16,3	1,8	0,9	3,7	10,1	13,0	98	22	56	5,0	6,7
30 a 40	4,2	16,0	1,8	0,9	4,3	11,3	14,3	94	21	59	7,8	8,0

pH em água; MO: matéria orgânica; Ca, Mg, K, Al determinados conforme Tedesco et al. (1995). V: percentual da saturação por bases; m: percentual da saturação por Al.

Tabela 2. Atributos físicos do solo por camada do Argissolo Vermelho Distrófico típico da área experimental no ano agrícola 2012/13

Camada	Ds	Porosidade			Textura		
		Macro	Micro	Total	Argila ¹	Silte	Areia
----- cm -----	g cm ⁻³	m ³ m ³			----- % -----		
0 a 5	1,46	0,12	0,31	0,43	26	33	42
5 a 10	1,72	0,08	0,26	0,33	26	19	55
10 a 15	1,65	0,10	0,27	0,36	28	18	54
15 a 20	1,66	0,09	0,27	0,36	32	18	51
20 a 30	1,58	0,10	0,29	0,37	36	19	45
30 a 40	1,57	0,09	0,30	0,38	43	16	41

Ds: densidade do solo, ¹ Método da pipeta (Embrapa, 1997).

4.2 Manejo do experimento, delineamento experimental e tratamentos

Antecedendo à instalação do experimento, no cultivo de inverno, foi realizada a semeadura da aveia preta na primeira quinzena de abril, com adubação de base de 200 kg ha⁻¹ da fórmula 05-30-15. A adubação nitrogenada de cobertura foi realizada no perfilhamento em única aplicação com ureia, distribuída na forma manual a lanço (45 kg N ha⁻¹). A dessecação da aveia preta foi realizada aos quarenta e cinco dias antes da semeadura do

milho (31/08/2012), sendo que a mesma apresentou rendimento de massa seca de $5,5 \text{ Mg ha}^{-1}$.

Em sucessão ao cultivo da aveia preta, foi realizada em 15/10/2012 a semeadura do milho na linha em sistema de semeadura direta, com auxílio de semeadora manual (saraquá), com espaçamento entrelinhas de 0,50 m utilizando-se o híbrido Pioneer 30R50H, com tecnologia Bt e RR. O ajuste das densidades de plantas foi efetuado no estágio V2-3, aos 15 DAE, pelo desbaste manual para obtenção de uma população final ao redor de 80.000 plantas ha^{-1} . A adubação na semeadura foi baseada na análise do solo e seguiu as indicações técnicas para a obtenção de altos rendimentos (CQFS - RS/SC, 2004). Desta forma, a adubação de base para o milho constou de 30, 120 e 120 kg ha^{-1} de N, P_2O_5 e K_2O , respectivamente, utilizando 600 kg ha^{-1} da fórmula comercial 05-20-20. A adubação de base com 30 kg N ha^{-1} foi realizada em todos os manejos de N, para o estabelecimento inicial das plantas de milho.

O experimento foi conduzido no delineamento blocos ao acaso, em um bifatorial, disposto em parcelas subdivididas, com quatro repetições. Nas parcelas principais (35 x 4 m) foram aplicados dois volumes de irrigação e nas subparcelas (5 x 4 m) três manejos de nitrogênio em cobertura. Os manejos de nitrogênio em cobertura foram realizados ao acaso nas parcelas principais. Neste trabalho, os manejos de nitrogênio considerados foram à testemunha (sem nitrogênio em cobertura), aplicação única de 300 kg N ha^{-1} e aplicação parcelada de 300 kg N ha^{-1} em cobertura ($150 + 150 \text{ kg N ha}^{-1}$), aplicados nos estádios V5-6 na escala de Ritchie et al. (1993) (primeira adubação nitrogenada de cobertura) e V11-12 (segunda adubação nitrogenada de cobertura) na cultura do milho irrigado (Tabela 3). A fonte de N utilizada foi à ureia com inibidor da urease (Super N®), na concentração de 0,05%. As adubações nitrogenadas foram realizadas manualmente, a lanço, sendo que após foi efetuada uma irrigação por aspersão de 20 mm para dissolver os grânulos e favorecer a incorporação ao solo do N proveniente da ureia.

Nas parcelas principais, foram aplicados os volumes de irrigação de 20 e 100 mm, aos nove dias após a primeira adubação nitrogenada de cobertura (estádio V7-8), pelo sistema de irrigação por aspersão (Figura 5). A quantidade de água aplicada foi aferida pela leitura indicada por quatro pluviômetros

dispostos nas parcelas principais. Este período de nove dias após a adubação nitrogenada para diferenciação dos volumes de irrigação corresponde a um intervalo que pressupondo ocorra à transformação do amônio em nitrato (nitrificação).

Tabela 3. Manejos de adubação de nitrogênio no ciclo de desenvolvimento do milho irrigado

Denominação dos manejos em cobertura	Dose total aplicada	Manejo da adubação		
		Base	1ª cobertura	2ª cobertura
		----- kg N ha ⁻¹ -----		
Testemunha	30	30	0	0
300 kg N ha ⁻¹ (Dose parcelada) ⁽¹⁾	330	30	150	150
300 kg N ha ⁻¹ (Dose única) ⁽²⁾	330	30	300	0

⁽¹⁾ A dose parcelada de nitrogênio em cobertura foi realizada com a aplicação de 150 kg N ha⁻¹ nos estádios V5-6 e V11-12. ⁽²⁾ A dose única de nitrogênio foi realizada apenas no estádio V5-6.

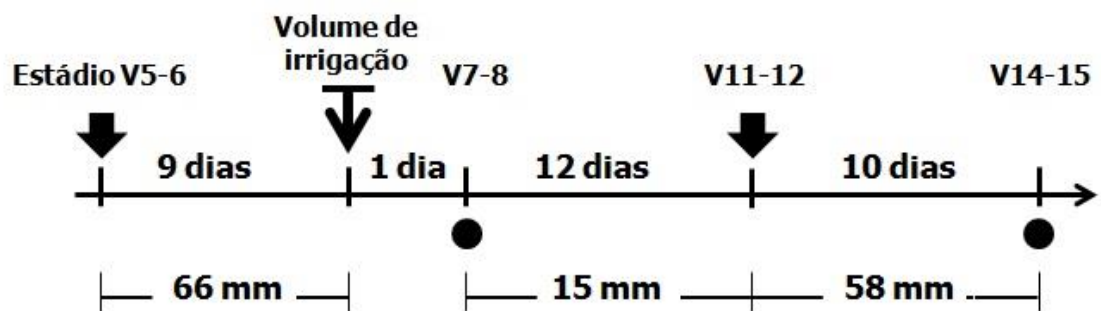


Figura 5. Manejo de nitrogênio em cobertura, volume de irrigação e época de amostragem do solo ao longo do ciclo do milho irrigado. A primeira adubação nitrogenada de cobertura (↓) foi realizada no estádio V5-6 com as doses de 0, 150 e 300 kg N ha⁻¹. A segunda adubação nitrogenada de cobertura (↓) foi realizada no estádio V11-12, com aplicação de 150 kg N ha⁻¹ na dose parcelada. O (●) indica a primeira e segunda época de amostragens do solo, realizada nos estádios V7-8 e V14-15, respectivamente. A (↓) indica a diferenciação dos volumes de irrigação 20 e 100 mm no estádio V7-8.

Durante o ciclo do milho, foram realizadas irrigações suplementares, pela irrigação por aspersão. Na Figura 6, estão indicadas a distribuição e o volume das precipitações e irrigações suplementares no ciclo do milho. No total, foram realizadas dezoito irrigações, aplicando-se uma lâmina em torno de 25 mm, resultando uma aplicação total de 439 mm de água. Esta, somada aos

371 mm de precipitação pluviométrica que ocorreu ao longo do ciclo resultaram no fornecimento de 810 mm de água.

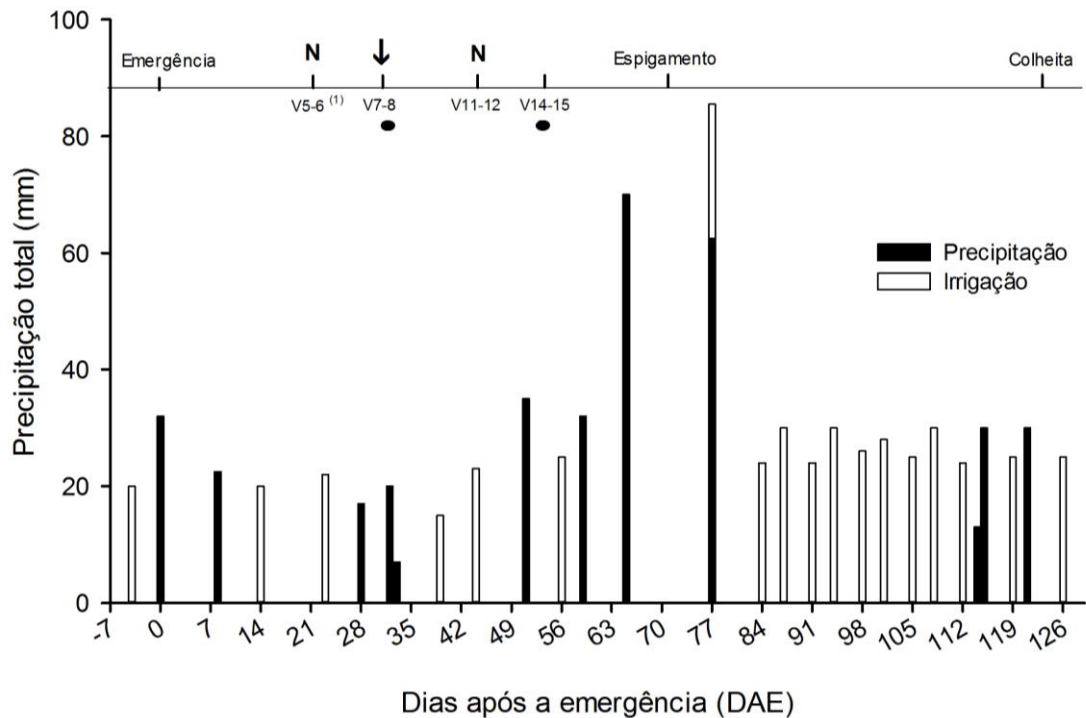


Figura 6. Distribuição das precipitações pluviométricas e irrigações suplementares durante o desenvolvimento do milho, ano agrícola 2012/13. ¹ Estádios fenológicos de acordo com a escala de Ritchie et al. (1993). O (N) indica os manejos de nitrogênio em cobertura nos estádios V5-6 e V11-12. O (●) indica a primeira e segunda época de amostragens do solo nos estádios V7-8 e V14-15, respectivamente. A (↓) indica a diferenciação dos volumes de irrigação no estágio V7-8.

4.3 Amostragem e determinações no solo e na planta

Foram realizadas duas amostragens do solo para as determinações químicas do solo, sendo elas realizadas após o estabelecimento do milho (Figura 5). Nos meses de novembro (23/11) e dezembro (15/12) de 2012 foram realizadas as amostragens, totalizando 288 amostras de solo (2 épocas x 24 parcelas x 6 profundidades).

A primeira época de amostragem do solo (estádio V7-8) ocorreu dez após a aplicação da primeira adubação nitrogenada de cobertura e um dia

após a diferenciação dos volumes de irrigação (20 e 100 mm) (Figura 5). A segunda época de amostragem do solo (estádio V14-15) ocorreu dez dias após a segunda adubação nitrogenada de cobertura.

As amostras de solo foram coletadas com trado holandês, nas camadas de 0,0 - 0,05; 0,05 - 0,10; 0,10 - 0,15; 0,15 - 0,20; 0,20 - 0,30 e 0,30 - 0,40 m. Em cada subparcela, foram amostradas seis subamostras, em dois pontos centrais, sendo dois pontos sobre a linha de adubação e quatro pontos laterais na entrelinha. Estas subamostras foram posteriormente misturadas para compor uma amostra composta. Imediatamente após a coleta, as amostras de solo foram acondicionadas em caixas térmicas contendo gelo. Para análise de Ca e Mg trocáveis, K disponível e pH-H₂O, as amostras foram submetidas à secagem em estufa de circulação forçada de ar à temperatura de 55±5°C, até atingir peso constante. Após secas e peneiradas em peneira de 2 mm, foram analisadas.

As determinações de N mineral nas amostras do solo foram realizadas por meio de arraste de vapor em semimicro Kjeldhal, segundo Tedesco et al. (1995), sendo o N-mineral extraído das amostras úmidas do solo com solução KCl 1 mol L⁻¹. Uma alíquota de 20 ml da solução extraída com KCl foi usada para determinação do N-mineral. Numa primeira destilação, foi adicionado MgO para determinação de N-NH₄⁺ e, posteriormente, numa segunda destilação da mesma amostra, foi adicionada Liga Devarda para a determinação de N-NO₃⁻.

Os teores de cálcio e magnésio trocável foram extraídos com KCl 1 mol L⁻¹, o de potássio disponível foi extraído com HCl 0,05 mol L⁻¹ e H₂SO₄ 0,0125 mol L⁻¹ (Mehlich-1) e o pH-H₂O (relação 1:1) conforme metodologias descritas por Tedesco et al. (1995).

No espigamento, ocorrido aos 72 dias após a emergência, foram coletadas quatro plantas representativas na área útil de cada subparcela para determinação do N acumulado nesse estágio e o rendimento da massa seca da parte aérea. As plantas foram secadas em estufa de circulação forçada de ar à temperatura de 55±5°C, até atingir peso constante.

O N acumulado nas plantas (colmo+folhas+espigas) por ocasião do espigamento no milho foi determinado por digestão ácida e destilação de arraste de vapor em semimicro Kjeldhal, conforme metodologia descrita por Tedesco et al. (1995).

O rendimento de grãos foi obtido pela colheita manual das espigas das plantas da área útil de cada subparcela (em média, 10 m²). As espigas foram secas em estufa a 55±5°C, sendo os resultados expressos com 13% de umidade.

4.4 Análise estatística

Os resultados obtidos foram submetidos à análise da variância (ANOVA), com posterior aplicação do teste de médias *Tukey* ($p < 0,05$), conforme os seguintes modelos:

a) pH, N-NH₄⁺, N-NO₃⁻, Ca, Mg e K do solo

$$Y_{ijkl} = \mu + B_i + I_j + \text{erro a (ij)} + M_k + I_j M_k + \text{erro b (ijk)} + C_l + \text{erro c (il)} + I_j C_l + M_k C_l + I_j M_k C_l + \text{erro d (ijkl)}$$

onde: μ = média geral do experimento; B = blocos (i=1,2,3); I = irrigação (j=1,2); M = manejo de N em cobertura (k=1,2,3); C = camada (l=1,2,3,4,5,6) e Erro = erro experimental.

b) Rendimento de matéria seca e quantidade de nitrogênio acumulado na parte aérea no espigamento e rendimento de grãos

$$Y_{ijk} = \mu + B_i + I_j + \text{erro a (ij)} + M_k + I_j M_k + \text{erro b (ijk)}$$

onde: μ = média geral do experimento; B = blocos (i=1,2,3); I = irrigação (j=1,2); M = manejo de N em cobertura (k=1,2,3) e Erro = erro experimental.

Para os atributos do solo, foi feita uma análise estatística separada para cada época de amostragem, por não haver sentido prático de sua comparação com as demais variáveis em estudo.

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A discussão dos resultados terá, como enfoque principal, as relações entre o manejo da adubação nitrogenada de cobertura e os volumes de irrigação com alteração do pH do solo e dos teores de nitrogênio mineral (N-NH₄⁺ e N-NO₃⁻), cálcio trocável, magnésio trocável e potássio disponível no solo. Inicialmente, serão apresentados os aspectos relacionados a pH e nitrogênio mineral. Na sequência, serão tratados os efeitos da percolação do N-NO₃⁻ no movimento de cátions básicos (Ca, Mg e K) no perfil do solo. Por fim, serão apresentados o rendimento da matéria seca e a quantidade de N acumulado por hectare na parte aérea no espigamento e rendimento de grãos.

5.1 pH do solo

Independentemente de épocas de amostragens do solo, volumes de irrigação, modo de aplicação do N em cobertura e camadas de solo avaliadas, observou-se que o pH do solo foi menor do que 5,0, enquadrado na faixa “*Muito baixo*”, conforme a CQFS RS/SC (2004). Isso indica a necessidade de aplicação de calcário para favorecer as condições ideais para o cultivo de milho em sistema plantio direto consolidado, ou seja, pH entre 5,5 e 6,0 (CQFS RS/SC, 2004).

O pH-H₂O inicial do experimento foi mais elevado nas camadas próximas à superfície do solo reduzindo gradativamente à medida que aumenta a profundidade (Tabela 1). Em decorrência dos baixos valores de pH em profundidade, há um acréscimo do Al trocável, o que é esperado devido ao fato

de que à medida que diminui o pH abaixo de 5,5 os teores de Al^{3+} trocável aumentam sensivelmente (Volkweiss, 1989).

Na primeira época de amostragem de solo (estádio V7-8), realizada aos dez dias após a primeira adubação nitrogenada de cobertura, houve interação tripla ($p < 0,05$) de volumes de irrigação, manejo de nitrogênio em cobertura e camada de solo para os valores de pH do solo (Figura 7). Nessa época de amostragem do solo, a segunda adubação nitrogenada de cobertura não tinha sido aplicada. Assim, na primeira época foram avaliados os efeitos de três doses de N (0, 150 e 300 kg ha^{-1}) em cobertura e os dois volumes de irrigação (20 e 100 mm). De modo geral, os maiores valores de pH do solo foram verificados nas camadas mais superficiais (0-5 e 5-10 cm) para ambos os volumes de irrigação (Figura 7a, b).

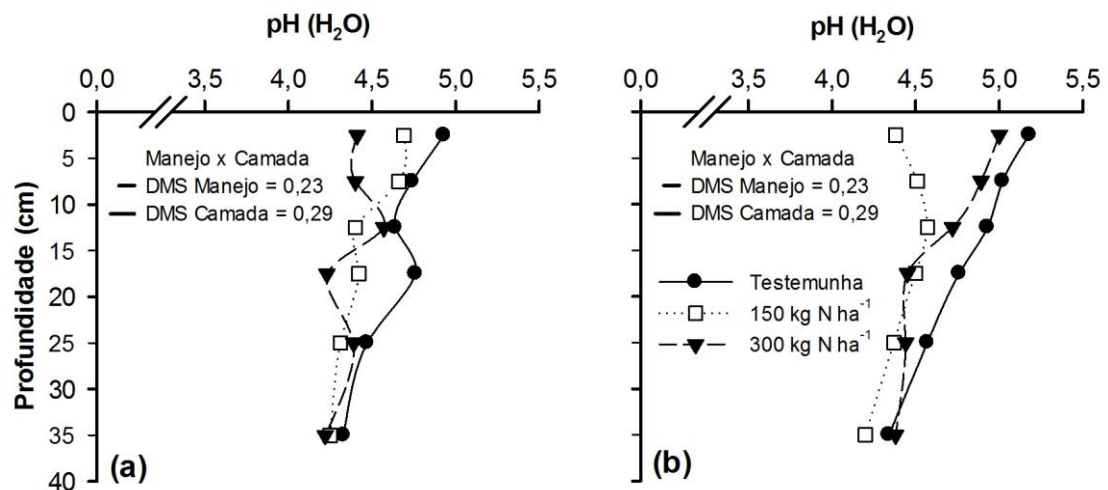


Figura 7. Valores de pH no solo em função de manejos de nitrogênio em cobertura e de camadas de solo para os volumes de irrigação de 20 mm (a) e 100 mm (b) na primeira época de amostragem, realizada aos dez dias após a primeira adubação nitrogenada de cobertura do milho irrigado. Nessa época de amostragem, foram aplicadas no estágio V5-6 as doses de 150 e 300 kg N ha^{-1} . As barras, na horizontal, representam a DMS do teste de *Tukey*, com nível de 5% de significância.

Esse resultado difere do esperado, uma vez que a lixiviação de NO_3^- é o principal fator causador de acidificação e se esperaria menor valor de pH em superfície do que em camadas mais profundas do solo. Entretanto, o maior teor de matéria orgânica do solo nessas camadas (Tabela 1) resulta em

tamponamento do pH do solo, que é a capacidade de resistir a mudança do pH (Silva et al., 2010).

No menor volume de irrigação (20 mm), a aplicação da maior dose (300 kg N ha⁻¹) de N em cobertura diminuiu o pH do solo na camada superficial em relação à testemunha sem aplicação de N em cobertura, dez dias após a primeira adubação nitrogenada de cobertura (Figura 7a). O decréscimo nos valores de pH foi de 0,5 unidade na camada de 0-5 cm e de 0,3 unidade na camada de 5-10 cm. Lange et al. (2006) observaram decréscimo no pH do solo até 20 cm de profundidade com a aplicação de 160 kg N ha⁻¹ em cobertura na forma de ureia, em um Latossolo Vermelho Distrófico típico cultivado com milho.

Estes resultados estão de acordo com a maioria dos trabalhos existentes na literatura. Um dos fatores mais importantes de acidificação do solo é o processo de nitrificação do amônio oriundo da matéria orgânica e/ou dos fertilizantes nitrogenados, que liberam dois íons H⁺ na solução do solo para cada molécula de NH₄⁺ transformada em NO₃⁻ (Raij, 1991). Além disso, a acidificação do solo também está associada à depleção de cátions básicos, devida à lixiviação de NO₃⁻ (Bouman et al., 1995). A remoção desses cátions aumenta as concentrações de íons H⁺ e Al³⁺ no complexo sortivo, aumentando suas concentrações na solução do solo. Conforme Raij (2011), a aplicação de 100 kg N ha⁻¹, na forma de ureia, necessita de uma contrapartida de 180 kg ha⁻¹ de CaCO₃ (PRNT = 100) para neutralizar a acidez formada.

Os resultados obtidos para o pH do solo quando se aplicou um volume de irrigação equivalente a 100 mm foram diferentes ao relatado para o volume de 20 mm. O decréscimo no valor do pH foi maior para a menor dose de nitrogênio aplicada (150 kg N ha⁻¹) em relação à testemunha sem aplicação de N em cobertura até a profundidade de 20 cm (Figura 7b). Esperava-se que a aplicação de 300 kg N ha⁻¹ em dose única fosse diminuir o pH do solo, o que não se verificou. Ao contrário, nesta dose, o pH do solo não diferiu ($p > 0,05$) até a profundidade de 15 cm quando comparado com a testemunha sem aplicação de N em cobertura (Figura 7b). A ausência do efeito dessa maior dose de N sobre o pH do solo pode estar relacionada a uma possível desnitrificação do NO₃⁻. Este processo consome prótons e alcaliniza o solo, revertendo à acidez produzida durante a nitrificação.

Comparando as doses de N (150 e 300 kg ha⁻¹) em cobertura nessa época de amostragem, verifica-se que na aplicação da maior dose, o pH do solo foi maior nas camadas de 0-5 e 5-10 cm em relação à menor dose e aplicação do maior volume de irrigação (100 mm) (Figura 7b). Provavelmente, este acréscimo do pH do solo é devido à exsudação de hidroxilas (OH⁻) pelas gramíneas ao absorverem o NO₃⁻, para manter a eletroneutralidade, promovendo, desta maneira, aumento do pH do solo (Raven, 1985). Por outro lado, nas mesmas camadas, mas no menor volume de irrigação (20 mm), o pH do solo foi menor com a aplicação da maior dose de N (300 kg ha⁻¹) em relação à menor dose (150 kg ha⁻¹) (Figura 7a).

Para as camadas mais profundas (maiores que 10 cm de profundidade), não houve diferença ($p > 0,05$) nos valores de pH do solo, independentemente da dose aplicada (150 e 300 kg N ha⁻¹) e volumes de irrigação (Figura 7a, b).

Na segunda época de amostragem do solo (estádio V14-15), realizada aos dez dias após a segunda adubação nitrogenada de cobertura, foram verificadas interações duplas ($p < 0,05$) de manejos de N em cobertura e camadas de solo, volumes de irrigação e camadas de solo e volumes de irrigação e manejo de N em cobertura para pH do solo (Figuras 8 e 9; Tabela 4). Nessa época de amostragem, esse atributo não foi influenciado pelos volumes de irrigação (20 e 100 mm). O volume de água (irrigação + precipitação) que ingressou no intervalo da aplicação da segunda adubação nitrogenada de cobertura e a segunda época de amostragem do solo foi de 58 mm de água.

No parcelamento da dose de 300 kg N ha⁻¹ em cobertura, independentemente dos volumes de irrigação o pH do solo foi menor até 15 cm de profundidade em comparação à testemunha sem aplicação de N em cobertura e à aplicação única de N (300 kg N ha⁻¹) (Figura 8). Como discutido anteriormente, o processo de nitrificação do NH₄⁺ libera dois prótons (H⁺) para cada molécula de NH₄⁺ transformada em NO₃⁻. Assim, a aplicação de N em cobertura realizada dez dias antes da amostragem do solo possivelmente resultou nesse decréscimo dos valores de pH do solo. Conyers et al. (1996) verificaram que, após doze anos de condução, a aplicação anual de 100 kg ha⁻¹ de N na forma de ureia parcelada em três aplicações no trigo proporcionou

um decréscimo médio de 0,4 unidade de pH do solo em relação ao solo que não recebeu N mineral (Fenton & Helyar, 2002).

O pH do solo não diferiu ($p > 0,05$) entre a aplicação única de N (300 kg N ha^{-1}) em cobertura em relação à testemunha nas camadas de 15-20, 20-30 e 30-40 cm, independentemente do volume de irrigação (Figura 8). Esses resultados estão em desacordo com os obtidos por Costa et al. (2008), que observaram acidificação do solo nas camadas 20-40 cm com a aplicação de 300 kg N ha^{-1} em cobertura na forma de ureia, em um Latossolo Vermelho distrófico de textura argilosa sob pastagem de capim-marandu.

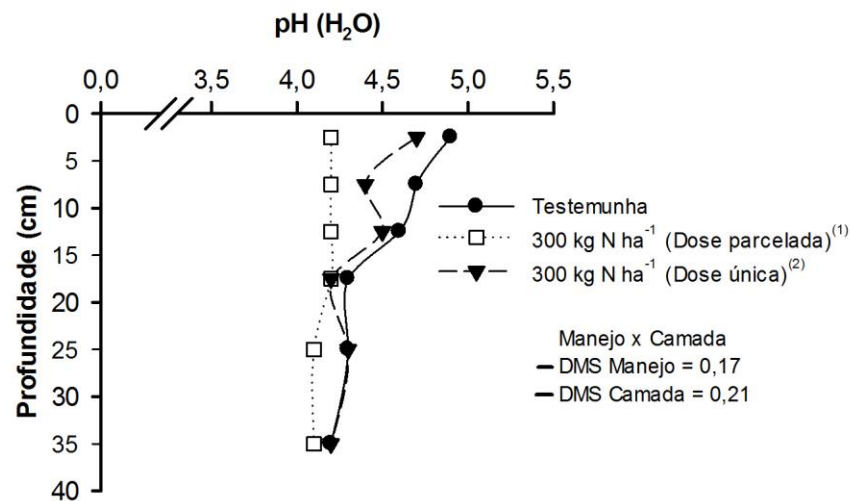


Figura 8. Valores de pH no solo em função de manejos de nitrogênio em cobertura e camadas de solo, na segunda época de amostragem realizada aos dez dias após a segunda adubação nitrogenada de cobertura do milho irrigado, na média de volumes de irrigação. ⁽¹⁾ O parcelamento da aplicação de 300 kg N ha^{-1} em cobertura foi realizado nos estádios V5-6 e V11-12. ⁽²⁾ A aplicação da dose única de N em cobertura foi realizada no estádio V5-6. As barras, na horizontal, representam a DMS do teste de *Tukey*, com nível de 5% de significância.

Independentemente do manejo de N em cobertura, o pH do solo aumentou em 0,3 unidades na camada de 10-15 cm com a aplicação do maior volume de irrigação (100 mm) em relação ao menor volume de irrigação (20 mm) (Figura 9). Contudo, nas camadas de 0-5, 5-10, 15-20, 20-30 e 30-40 cm o pH não diferiu ($p > 0,05$) em função de volumes de irrigação.

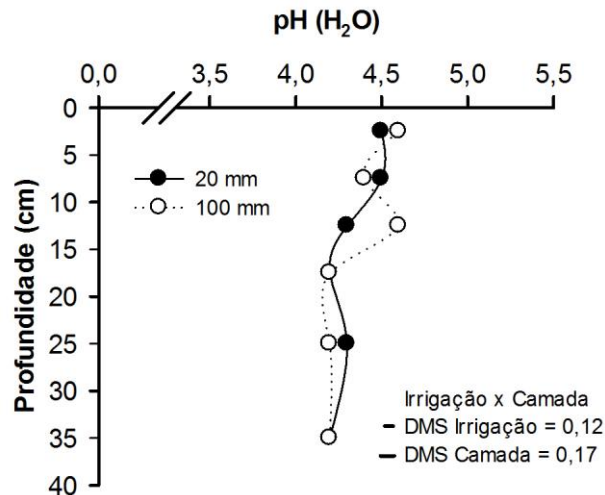


Figura 9. Valores de pH em função de volumes de irrigação e camadas de solo, na segunda época de amostragem de solo, realizada aos dez dias após a segunda adubação nitrogenada de cobertura do milho irrigado, na média de manejos de nitrogênio em cobertura. As barras, na horizontal, representam a DMS do teste de *Tukey*, com nível de 5% de significância.

Na dose de 300 kg N ha^{-1} em cobertura, seja em aplicação única ou de forma parcelada (150 kg N ha^{-1}) o pH do solo foi menor no menor volume de irrigação (20 mm), na média de camadas de solo (Tabela 4). Os decréscimos nos valores do pH do solo foram de 0,4 e 0,3 unidade, para a aplicação única e parcelada de N, respectivamente. Já no maior volume de irrigação (100 mm), apenas a aplicação parcelada de N em cobertura diminuiu o pH do solo (0-40 cm).

Tabela 4. Valor de pH em função de volumes de irrigação e manejos de nitrogênio em cobertura na segunda época de amostragem do solo, realizada dez dias após a segunda adubação nitrogenada de cobertura do milho irrigado, na média de camadas de solo

Volume de irrigação ⁽¹⁾	Testemunha ⁽²⁾	Adubação de 300 kg N ha^{-1}	
		Única ⁽³⁾	Parcelada ⁽⁴⁾
----- mm -----	----- pH (H ₂ O) -----		
20	4,6 Aa	4,3 Bb	4,2 Ba
100	4,4 Aa	4,5 Aa	4,2 Ba

⁽¹⁾ Os volumes de irrigação foram diferenciados no estágio V7-8. ⁽²⁾ Sem nitrogênio em cobertura. ⁽³⁾ Aplicação única de 300 kg N ha^{-1} no estágio V5-6. ⁽⁴⁾ Aplicação parcelada de 150 kg N ha^{-1} nos estádios V5-6 e V11-12. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula, na linha, e pela mesma letra minúscula, na coluna, não diferem entre si pelo teste de *Tukey* a 5%.

Comparando os volumes de irrigação para a aplicação em dose única, verifica-se que no maior volume de irrigação (100 mm) o pH no perfil do solo foi menor em relação ao menor volume de irrigação (20 mm) (Tabela 4). Este comportamento não foi observado para a aplicação parcelada de N e testemunha sem aplicação de N em cobertura.

5.2 Teores de amônio (N-NH_4^+) e nitrato (N-NO_3^-) no perfil do solo

Os teores iniciais de N-NH_4^+ e N-NO_3^- no perfil do solo foram maiores nas camadas superficiais (0-5 e 5-10 cm), e decresceram nas camadas mais profundas (Tabela 1).

Na primeira época de amostragem de solo (estádio V7-8), realizada aos dez dias após a primeira adubação nitrogenada de cobertura houve interação tripla ($p < 0,05$) de volumes de irrigação, manejos de N em cobertura e camadas de solo para os teores de N-NH_4^+ e N-NO_3^- no perfil do solo (Figuras 10 e 12).

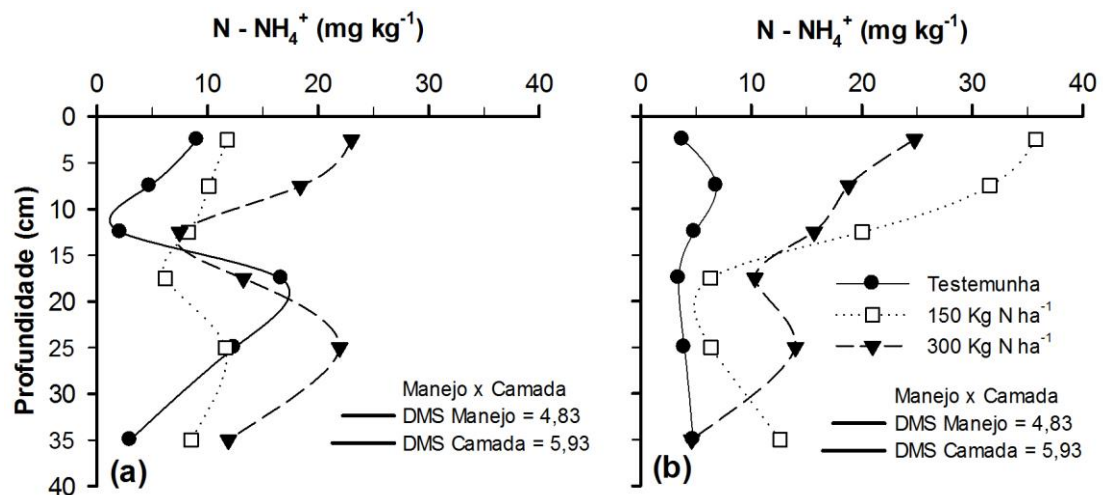


Figura 10. Nitrogênio amoniacal no solo em função de manejos de nitrogênio em cobertura e de camadas de solo para os volumes de irrigação simulados de 20 mm (a) e 100 mm (b) na primeira época de amostragem, realizada aos dez dias após a primeira adubação nitrogenada de cobertura do milho irrigado. Nessa época de amostragem, foram aplicadas no estágio V5-6 as doses de 150 e 300 kg N ha⁻¹. As barras, na horizontal, representam a DMS do teste de *Tukey*, com nível de 5% de significância.

Nessa amostragem, a segunda adubação nitrogenada de cobertura ainda não tinha sido aplicada. Assim, foram avaliados os efeitos de três doses de N (0, 150 e 300 kg ha⁻¹) em cobertura e dois volumes de irrigação (20 e 100 mm). A aplicação das doses de 150 e 300 kg N ha⁻¹ em cobertura resultou em maiores teores de N-NH₄⁺ nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-15 cm em relação à testemunha sem aplicação de N em cobertura, em ambos os volumes de irrigação (Figura 10). Esse resultado é esperado, uma vez que a ureia (fonte amídica) aplicada é hidrolisada pela enzima urease presente no solo e em resíduos vegetais, produzindo NH₄⁺. Costa et al. (2008) observaram aumento linear nos teores de NH₄⁺ no solo com o incremento de doses de N na camada de 0-20 cm, utilizando fonte amídica.

No menor volume de irrigação (20 mm), os teores de N-NH₄⁺ nas camadas superficiais do solo (0-5 e 5-10 cm) aumentaram à medida que aumentou a dose de N aplicada (Figura 10a). Esse resultado é similar ao verificado por Bonfim-da-Silva (2005) e Batista (2006). Além disso, o maior teor de NH₄⁺ com a aplicação da maior dose de N pode estar relacionado ao baixo pH do solo na camada superficial (pH=4,4). De acordo com Bussink (1992), em condições de pH ácido, a espécie química predominante é NH₄⁺. Isto pode ser explicado pelo processo de nitrificação, que é mediado pelas bactérias dos gêneros *Nitrosomonas* e *Nitrobacter*, sendo essas muito sensíveis a valores de pH menores que 6,0 e têm atividade nula em pH menor que 4,5 (Moreira & Siqueira, 2006).

Por outro lado, no maior volume de irrigação (100 mm), a dose de 150 kg N ha⁻¹ em cobertura resultou em maior teor de N-NH₄⁺ nas duas camadas superficiais (0-5 e 5-10 cm) quando comparada com a dose de 300 kg N ha⁻¹ e com a testemunha sem aplicação de N em cobertura (Figura 10b).

A maior dose de N (300 kg ha⁻¹) em cobertura resultou em maior teor N-NH₄⁺ em relação à menor dose (150 kg ha⁻¹) e a testemunha sem aplicação de N em cobertura na camada de 20-30 cm para ambos os volumes de irrigação, o que não foi verificado na camada de 30-40 cm (Figura 10a, b). Deve-se ressaltar que, logo após a adubação de cobertura, foi aplicada uma lâmina de água por irrigação para incorporar a ureia ao solo, contribuindo para a diminuição da volatilização de N como NH₃, o que pode ter aumentado o teor de NH₄⁺ no solo. Em experimento em colunas, Singh et al. (1984) observaram

que, em solo de textura franco arenosa, a ureia lixiviou com a água de irrigação e as maiores concentrações foram observadas na frente de umedecimento. De acordo com Araújo et al. (2004), a lixiviação de NH_4^+ é uma realidade com a aplicação de doses usualmente recomendadas de adubos nitrogenados, mesmo em Latossolos muito argilosos e com altos teores de óxidos de ferro e gibbsita. Conforme Sparks (1995), a lixiviação de N na forma NH_4^+ é reduzida pela adsorção desse cátion no complexo de carga negativa do solo, embora a capacidade de adsorção do NH_4^+ , de acordo com a serie liotrópica, seja menor em relação à de outros cátions como Ca e Mg.

Apesar de não ter sido realizada a análise estatística entre épocas de amostragem do solo, verifica-se que, na segunda época de amostragem do solo os teores de N-NH_4^+ na camada superficial foram numericamente inferiores aos verificados na primeira amostragem, independentemente de manejo de N em cobertura e volume de irrigação (Figura 11). Possivelmente, as condições de temperatura e aeração favoreceram a conversão de N-NH_4^+ a N-NO_3^- , o que justifica as menores concentrações de N-NH_4^+ . Condições ótimas de nitrificação ocorrem quando a concentração de oxigênio do ar é cerca de 20%, semelhante à do ar atmosférico, o que é esperado na camada de solo de 0 a 20 cm, e a temperatura varia entre 30-35°C, com ótimo a 25°C (Sarahwat, 2008). De acordo com Villas Bôas et al. (1999), o NH_4^+ no solo é transformado biologicamente em NO_3^- , após uma a três semanas, com a temperatura do solo oscilando entre 25 e 30 °C. Além disso, essa diminuição do N-NH_4^+ pode ter decorrido dos processos de lixiviação e absorção pelas plantas.

Na segunda época de amostragem de solo (estádio V14-15), realizada aos dez dias após a segunda adubação nitrogenada de cobertura houve interação tripla ($p < 0,05$) de volumes de irrigação, manejos de N em cobertura e camadas de solo para os teores de N-NH_4^+ e N-NO_3^- no perfil do solo (Figuras 11 e 13). Nessa época de amostragem, esses atributos não foram influenciados pelos volumes de irrigação (20 e 100 mm).

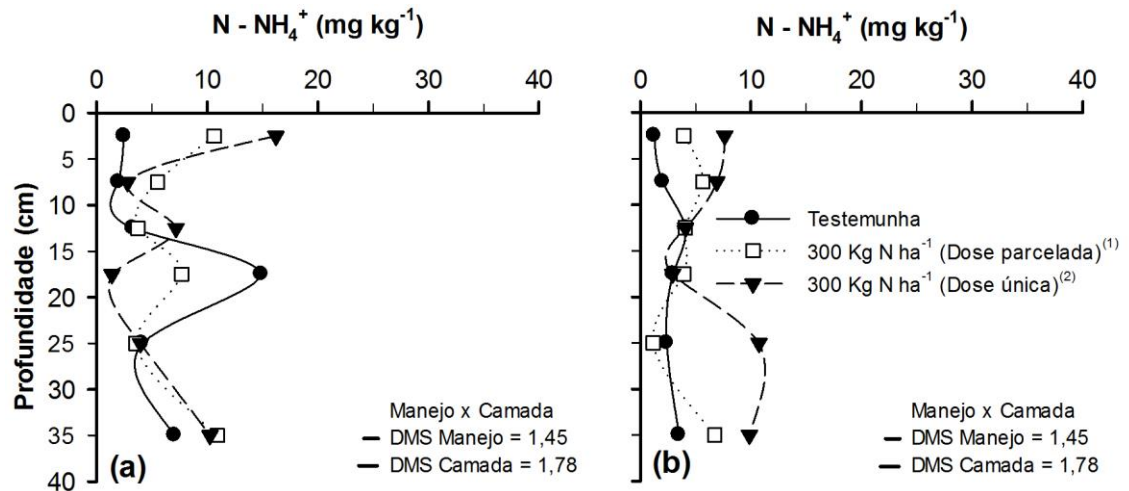


Figura 11. Nitrogênio amoniacal no solo em função de manejos de nitrogênio em cobertura e camadas de solo para os volumes de irrigação de 20 mm (a) e 100 mm (b) na segunda época de amostragem, realizada aos dez dias após a segunda adubação nitrogenada de cobertura no milho irrigado. ⁽¹⁾ O parcelamento da aplicação de 300 $kg\ N\ ha^{-1}$ em cobertura foi realizado nos estádios V5-6 e V11-12. ⁽²⁾ A aplicação da dose única de N em cobertura foi realizada no estágio V5-6. As barras, na horizontal, representam a DMS do teste de *Tukey*, com nível de 5% de significância.

A aplicação única de 300 $kg\ N\ ha^{-1}$ em cobertura aumentou os teores de $N-NH_4^+$ em relação à aplicação parcelada e à testemunha sem aplicação de N em cobertura na camada superficial (0-5 cm) em ambos volumes de irrigação (Figura 11a, b). Esperava-se que o parcelamento da aplicação de N em cobertura resultasse em maiores teores de $N-NH_4^+$ nessa camada em relação à aplicação única, devido à aplicação da ureia ter sido realizada dez dias antes da amostragem de solo.

O resultado verificado para o $N-NH_4^+$ na camada subsuperficial (20-30 cm) na primeira época de amostragem se repetiu na segunda época de amostragem do solo no maior volume de irrigação simulado (100 mm) (Figuras 10 e 11b). A aplicação de 300 $kg\ N\ ha^{-1}$ em cobertura em dose única aumentou os teores de $N-NH_4^+$ na camada de 20-30 cm de solo quando comparada com a aplicação parcelada e com a testemunha sem adubação de N em cobertura.

Os volumes de irrigação e os manejos de nitrogênio em cobertura alteraram os teores de $N-NO_3^-$ no perfil do solo, similarmente ao verificado para o $N-NH_4^+$. Na primeira época de amostragem de solo (estádio V7-8), realizada dez dias após a primeira adubação nitrogenada de cobertura, a aplicação da

maior dose de N (300 kg ha^{-1}) em cobertura aumentou os teores de N-NO_3^- em todas as camadas de solo avaliadas quando comparada a testemunha sem N em cobertura, para ambos os volumes de irrigação (Figura 12a, b).

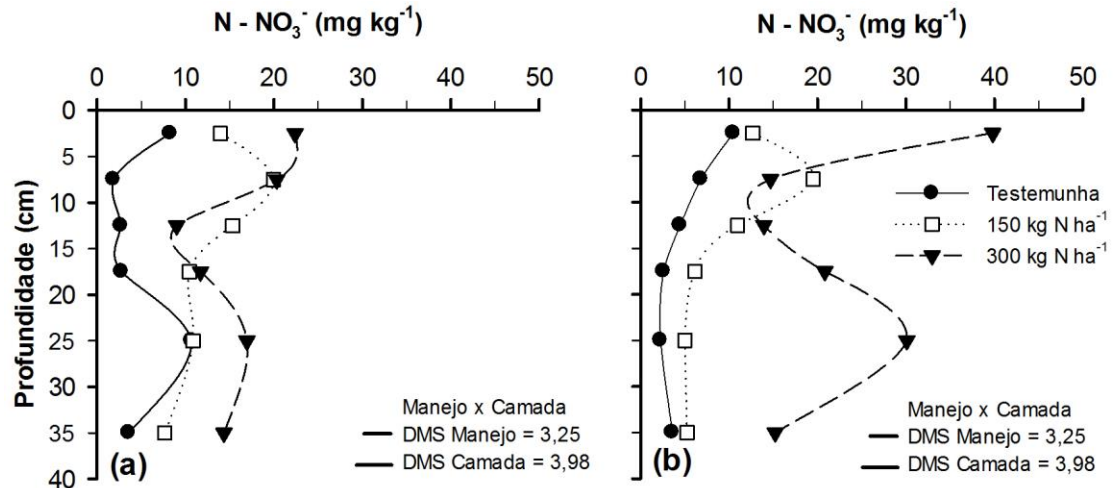


Figura 12. Nitrogênio nítrico no solo em função de manejos de nitrogênio em cobertura e de camadas de solo para os volumes de irrigação de 20 mm (a) e 100 mm (b) na primeira época de amostragem, realizada aos dez dias após a primeira adubação nitrogenada de cobertura do milho irrigado. Nessa época de amostragem, tinham sido aplicadas no estágio V5-6 as doses de 150 e 300 kg N ha^{-1} . As barras, na horizontal, representam a DMS do teste de Tukey, com nível de 5% de significância.

A percolação de N-NO_3^- para as camadas subsuperficiais (20-30 e 30-40 cm) foi evidenciada pelos teores encontrados dez dias após a aplicação da maior dose (300 kg N ha^{-1}) em cobertura, para ambos os volumes de irrigação (Figura 12a, b). O aumento do teor de N-NO_3^- , em ambos os volumes de irrigação, é consequência dos 86 e 166 mm de água (precipitação pluvial + irrigação) que ingressaram no sistema, no intervalo entre a primeira adubação nitrogenada de cobertura e a primeira época de amostragem de solo. Além disso, a aplicação da maior dose (300 kg ha^{-1}) de N em cobertura foi realizada na fase inicial de desenvolvimento do milho (estádio V5-6), período em que as plantas apresentavam sistema radicular pouco desenvolvido.

Esse aumento do teor de N-NO_3^- na camada 20-30 cm deve-se à alta mobilidade do íon NO_3^- , que é praticamente pouco retido no solo, o que, dependendo da carga elétrica do solo, facilita sua lixiviação e promove perdas

desse nutriente no solo, oferecendo ainda risco de contaminação do lençol freático (Alcântara & Camargo, 2005; Fey et al., 2010). Além disso, a menor capacidade de troca de ânions dos horizontes superficiais pode ter sido devida ao efeito físico da matéria orgânica do solo, ao bloquear os sítios de carga positiva das superfícies dos óxidos de ferro e alumínio (Marcano-Martinez & McBride, 1989).

Na segunda época de amostragem do solo (estádio V14-15), realizada aos dez dias após a segunda adubação nitrogenada de cobertura, o parcelamento da dose de N (300 kg ha^{-1}) em cobertura aumentou os teores de N-NO_3^- nas camadas de 0-5 e 5-10 cm em relação à aplicação em dose única e a testemunha sem aplicação de N em cobertura, no menor volume de irrigação (20 mm) (Figura 13a). Por outro lado, no maior volume de irrigação (100 mm), a aplicação em dose única (300 kg N ha^{-1}) em cobertura aumentou os teores de N-NO_3^- em relação ao parcelamento da dose de N e a testemunha na camada mais superficial (0-5 cm) (Figura 13b).

Em ambos os volumes de irrigação, os teores de N-NO_3^- nas camadas de 20-30 e 30-40 cm foram maiores com a aplicação em dose única (300 kg ha^{-1}) de N em cobertura quando comparado com a testemunha sem aplicação de N em cobertura (Figura 13a, b). É provável que parte do N aplicado via fertilizante mineral não foi aproveitada pelo milho, uma vez que o N-NO_3^- foi encontrado abaixo de 20 cm de profundidade. Costa (2008) observou que 70% das raízes do milho, independentemente do sistema de preparo do solo, se concentrou na camada de 0-15 cm, corroborando com dados obtidos por Silva et al. (2000). Assim, os maiores teores de N-NO_3^- observados nas camadas de 20-30 e 30-40 cm podem estar relacionados à textura do solo desse estudo. Segundo Mazurana et al. (2011), a taxa de infiltração de água no Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico, com textura franco-argilosa, em sistema plantio direto, é de aproximadamente $26,5 \text{ mm h}^{-1}$.

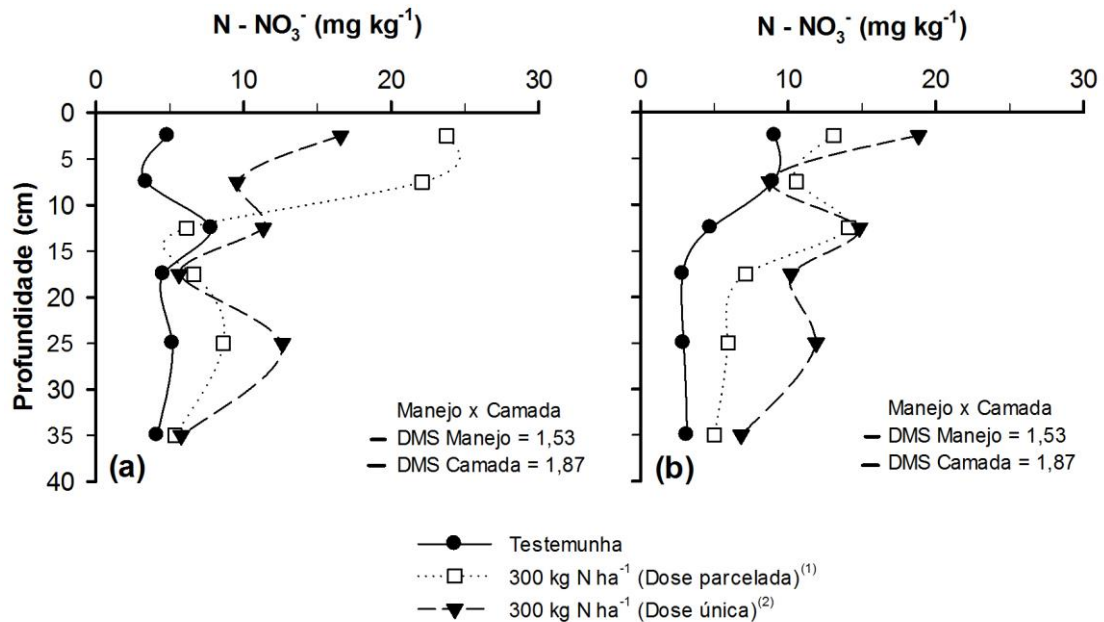


Figura 13. Nitrogênio nítrico no solo em função de manejos de nitrogênio em cobertura e de camadas de solo para os volumes de irrigação de 20 mm (a) e 100 mm (b) na segunda época de amostragem, realizada aos dez dias após a segunda adubação nitrogenada de cobertura no milho irrigado. ⁽¹⁾ O parcelamento da aplicação de 300 kg N ha⁻¹ em cobertura foi realizado nos estádios V5-6 e V11-12. ⁽²⁾ A aplicação da dose única de N em cobertura foi realizada no estágio V5-6. As barras, na horizontal, representam a DMS do teste de Tukey, com nível de 5% de significância.

No parcelamento do N (150 +150 kg ha⁻¹) em duas épocas de cobertura, os teores de $N-NO_3^-$ foram menores nas camadas 20-30 e 30-40 cm quando comparado com a aplicação em dose única (300 kg ha⁻¹) de N em ambos os volumes de irrigação e épocas de amostragem (Figura 12 e 13). Isso pode ser comprovado pelo maior acúmulo de $N-NO_3^-$ na camada superficial, fato verificado em ambos os volumes de irrigação, aos dez dias após a segunda adubação nitrogenada de cobertura. Os resultados reforçam a recomendação feita por Ernani (1999) e Bortolini (2000) de que, em solos arenosos, que apresentam maior facilidade de lixiviação de NO_3^- , a fertilização nitrogenada em altas doses deve ser manejada em maior número de aplicações do que em solos argilosos. Primavesi et al. (2006) verificaram que o parcelamento de até cinco aplicações de ureia para a dose de 500 kg N ha⁻¹, nos períodos das chuvas, em pastagens de capim “coast-cross”, não proporcionou perdas significativas de NO_3^- para o lençol freático. Segundo Coelho (1994), com

parcelamento da adubação nitrogenada pode-se aumentar a eficiência do uso do nitrogênio, reduzindo as perdas por lixiviação.

As observações deste experimento são pontuais, tanto sob o aspecto espacial como temporal e, por se tratar de um sistema aberto, processos tais como diferenças sazonais de umidade do solo e variações de temperatura do solo, não foram quantificados e, certamente, contribuíram para afetar os teores de N-NH_4^+ e N-NO_3^- no perfil do solo.

5.3 Teores de cátions no perfil do solo

Na sequência, serão apresentados e discutidos os resultados referentes à influência de manejos do N em cobertura e volumes de irrigação nos teores de cálcio e magnésio trocáveis e no potássio disponível no perfil do solo. Diferentemente do que ocorre com outros nutrientes, como o nitrogênio e o enxofre, que podem ser perdidos por volatilização, ou fósforo, que pode ficar menos disponível pela quimiossorção, cálcio, magnésio e potássio não apresentam formas voláteis e os mecanismos de adsorção específica são pouco significativos (Benites et al., 2010). Logo, as saídas desses nutrientes em sistemas agrícolas ocorrem principalmente pelas colheitas ou pelos processos de lixiviação e erosão. Além disso, a mobilidade vertical desses cátions no solo é influenciada por vários fatores tais como: doses de corretivo, tempo de reação, precipitação, condições físicas do solo, capacidade tampão do solo e presença de ânions, orgânicos ou inorgânicos (Quaggio, 2000).

Diante disso, a maior ênfase foi dada ao N-NO_3^- por ser o ânion inorgânico mais abundante no solo e, provavelmente, o mais importante no processo de lixiviação dos cátions básicos.

5.3.1 Cálcio e magnésio trocáveis

Independentemente da época de amostragem do solo, volume de irrigação, manejo de N em cobertura, os teores de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocáveis no

perfil do solo, se enquadram na classe “*Média*” e “*Alta*”, respectivamente, conforme a CQFS RS/SC (2004).

Os maiores teores iniciais de Ca^{2+} e Mg^{2+} trocável foram observados na camada superficial (0-5 e 5-10 cm) com decréscimo desses teores no perfil do solo (Tabela 1).

Na primeira época de amostragem do solo (estádio V7-8), realizada dez dias após a primeira adubação nitrogenada de cobertura, houve efeito somente para a interação dupla ($\rho < 0,05$) de volume de irrigação e camadas de solo para o Ca^{2+} trocável (Figura 14). O manejo de nitrogênio em cobertura não apresentou interação com nenhum fator, logo, é apresentado o efeito simples para o Ca^{2+} trocável (Tabela 5). Nessa época de amostragem do solo, a segunda adubação nitrogenada de cobertura não tinha sido aplicada. Assim, na primeira época de amostragem foram avaliados os efeitos de três doses de N (0, 150 e 300 kg ha^{-1}) em cobertura e dois volumes de irrigação (20 e 100 mm).

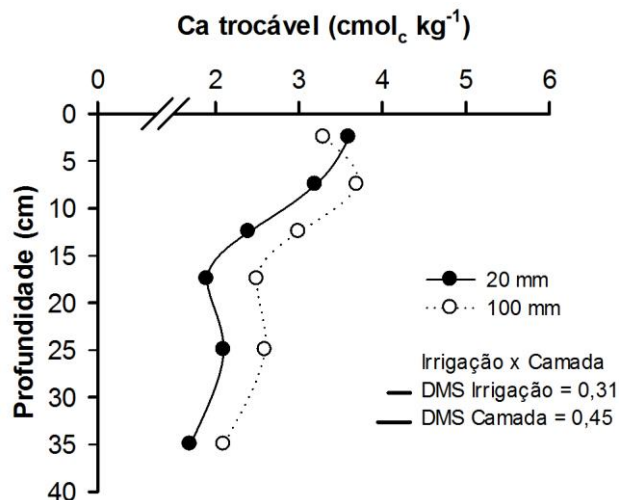


Figura 14. Cálcio trocável em função de volumes de irrigação e camadas de solo, na primeira época de amostragem, realizada aos dez dias após a primeira adubação nitrogenada de cobertura do milho irrigado, na média de manejos de nitrogênio em cobertura. As barras, na horizontal, representam a DMS do teste de *Tukey*, com nível de 5% de significância.

Independentemente dos manejos de N em cobertura e volumes de irrigação, os maiores teores de Ca^{+2} e Mg^{2+} trocáveis foram observados nas camadas superficiais (0-5 e 5-10 cm) (Figura 14 e 16). Os maiores teores

desses nutrientes na camada superficial no sistema plantio direto são devidos ao acúmulo de matéria orgânica (Tabela 1) e a reciclagem desses nutrientes por resíduos vegetais das culturas deixados na superfície do solo (Bayer & Mielniczuk, 1997).

No maior volume de irrigação (100 mm) os teores de Ca^{2+} trocável foram menores na camada 0-5 cm em comparação ao menor volume de irrigação (20 mm) (Figura 14). Por outro lado, nas demais camadas os teores de Ca^{2+} trocável foram menores no volume de irrigação de 20 mm (Figura 14). Esse resultado foi inesperado, pois o maior volume de irrigação deveria ter diminuído os teores Ca^{2+} trocável nessas camadas, considerando que o nitrato que lixívia no perfil do solo pode carrear cátions, principalmente K^+ , Ca^{2+} e Mg^{2+} para camadas mais profundas, pois os elementos químicos necessitam estar eletricamente neutros na solução do solo (Ernani, 2008).

Na primeira época de amostragem do solo, os teores de Ca^{2+} trocável não diferiram ($p > 0,05$) entre os manejos de N em cobertura (Tabela 5). Possivelmente, este resultado pode estar relacionado ao pequeno intervalo entre a primeira adubação nitrogenada de cobertura (estádio V5-6) e a primeira época de amostragem do solo (estádio V7-8), que influenciaram na conversão de N-NH_4^+ para N-NO_3^- . Deve-se ressaltar que o Ca é retido no complexo de troca com mais força que o Mg e o K, sendo o cátion predominante na CTC dos solos. Isso se explica por sua posição na série liotrópica ($\text{Al}^{3+} > \text{Ca}^{2+} > \text{Mg}^{2+} > \text{K}^+ = \text{NH}_4^+ > \text{Na}^+$), decorrente do seu raio iônico hidratado (Melo et al., 2009). Conforme Tisdale et al. (1993), o raio hidratado desses cátions se distingue da seguinte forma: $\text{K}^+ = 0,53 \text{ nm}$, $\text{Ca}^{2+} = 0,96 \text{ nm}$ e o $\text{Mg}^{2+} = 1,08 \text{ nm}$. A valência e o raio iônico hidratado são as propriedades que definem a dinâmica desses íons no solo, refletindo na força de atração na superfície dos colóides com carga contrária. A força de atração é crescente com a valência do íon, porém quanto maior o raio iônico hidratado, menor é a força de adsorção e, portanto, maior a mobilidade do solo. Assim, o K^+ é mais móvel por ser monovalente, seguido do Mg^{2+} , por ter raio iônico hidratado maior do que o do Ca^{2+} (Benites et al., 2010).

Tabela 5. Cálcio trocável no solo em função de manejos de nitrogênio em cobertura na primeira época de amostragem do solo, realizada aos dez dias após a primeira adubação nitrogenada de cobertura do milho irrigado, na média dos volumes de irrigação e camadas de solo

Adubação nitrogenada de cobertura	Cálcio trocável
kg ha ⁻¹	cmol _c kg ⁻¹
Testemunha ⁽¹⁾	2,73
150 ⁽²⁾	2,63
300	2,66
Média	2,67 ^{ns}

⁽¹⁾ Sem nitrogênio em cobertura. ⁽²⁾ Aplicação de 150 e 300 kg N ha⁻¹ no estágio V5-6. ns: não significativo.

Na segunda época de amostragem do solo (estádio V14-15), realizada dez dias após a segunda adubação nitrogenada de cobertura, houve interação tripla ($p < 0,05$) de volume de irrigação, manejos de N em cobertura e camadas de solo para o Ca²⁺ trocável (Figura 15). Nessa época de amostragem, esse atributo não foi influenciado pelos volumes de irrigação (20 e 100 mm).

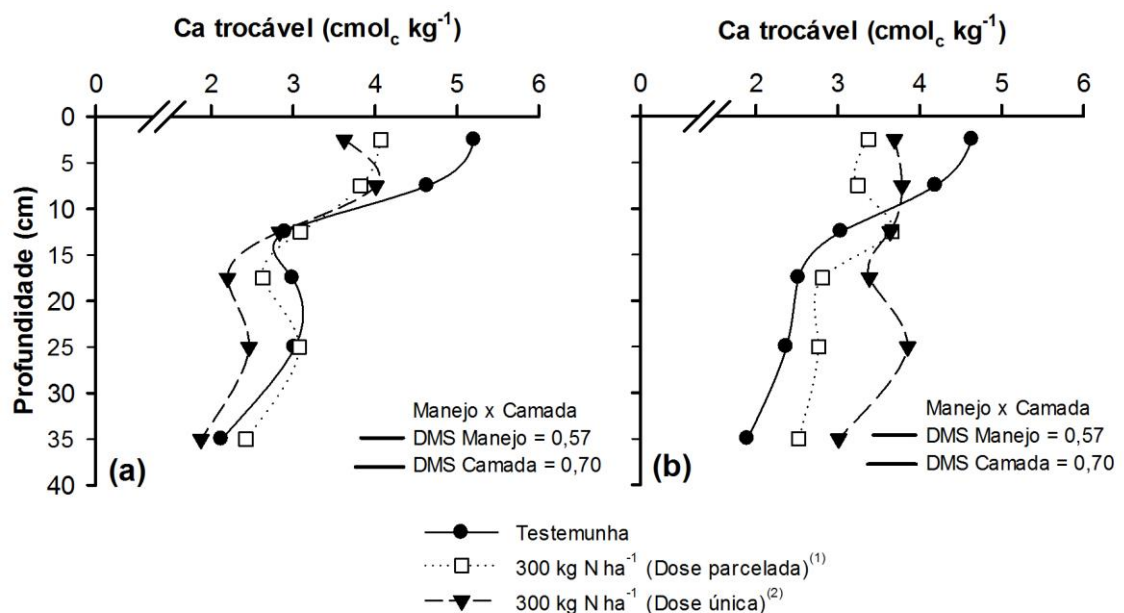


Figura 15. Cálcio trocável no solo em função de manejos de nitrogênio em cobertura e de camadas de solo para os volumes de irrigação de 20 mm (a) e 100 mm (b) na segunda época de amostragem, realizada aos dez dias após a segunda adubação nitrogenada de cobertura no milho irrigado. ⁽¹⁾ O parcelamento da aplicação de 300 kg N ha⁻¹ em cobertura foi realizada no estágio V5-6 e V11-12. ⁽²⁾ A aplicação da dose única de N em cobertura foi realizada no estágio V5-6. As barras, na horizontal, representam a DMS do teste de Tukey, com nível de 5% de significância.

A aplicação de N em cobertura diminuiu os teores de Ca^{2+} trocável nas camadas superficial (0-5 e 5-10 cm) em comparação à testemunha sem aplicação de N em cobertura, em ambos os volumes de irrigação (Figura 15a, b). Possivelmente, esse decréscimo ocorreu devido ao acúmulo de Ca^{2+} nas raízes e parte aérea do milho, proporcionado pelo maior desenvolvimento das plantas.

No menor volume de irrigação (20 mm), os teores de Ca^{2+} trocável não diferiram nas camadas de 10-15, 15-20, 20-30 e 30-40 cm entre a aplicação parcelada da dose de 300 kg N ha^{-1} em cobertura e testemunha sem aplicação de N em cobertura (Figura 15a). Entretanto, no maior volume de irrigação (100 mm), apenas nas camadas de 15-20 e 20-30 cm foi observado este comportamento (Figura 15b).

A aplicação de 300 kg N ha^{-1} em cobertura em dose única aumentou os teores de Ca^{2+} trocável nas camadas de 10-15, 15-20, 20-30 e 30-40 cm quando comparada com a testemunha sem adubação de N em cobertura no maior volume de irrigação (100 mm) (Figura 15b). Possivelmente, o ânion NO_3^- , proveniente da mineralização dos resíduos orgânicos e ou do fertilizante nitrogenado, promoveu a movimentação descendente desse cátion no perfil do solo, pela associação iônica na solução do solo com a neutralização momentânea de cargas (Pearson et al., 1962; Oliveira et al., 2002a). Corroborando com esses resultados, a aplicação de N em cobertura e o volume de irrigação de 100 mm aumentaram o Ca^{2+} trocável nas camadas inferiores do perfil do solo (Tabela 6). A mobilidade vertical do Ca no perfil do solo é desejável, uma vez que sua presença nas camadas subsuperficiais do solo promove o crescimento radicular.

No menor volume de irrigação (20 mm), o parcelamento da aplicação da dose de 300 kg N ha^{-1} em cobertura aumentou os teores de Ca^{2+} trocável na camada 20-30 cm de profundidade em relação à aplicação única de 300 kg N ha^{-1} em cobertura (Figura 15a). Por outro lado, no maior volume de irrigação (100 mm), a aplicação única de 300 kg N ha^{-1} em cobertura incrementou os teores de Ca^{2+} trocável nas camadas 15-20 e 20-30 cm em comparação ao parcelamento da dose de 300 kg N ha^{-1} (Figura 15b). Oliveira et al. (2002b), avaliando doses de N em cobertura (na forma de ureia) e o efeito dos resíduos num solo arenoso, durante onze meses cultivado com cana-de-açúcar,

constatarem perdas médias de 320 kg ha⁻¹ de Ca por lixiviação. Os autores relatam que durante o ciclo de cultivo o volume total de água foi de 2.015 mm, fato que favoreceu o deslocamento desse cátion. Malavolta & Violante Netto (1989) citam que a lixiviação de Ca no perfil é mais intensa em solos de textura arenosa a média e que, se no solo ocorrer a presença de maiores quantidades de ânions, estes podem neutralizar as cargas positivas do Ca, arrastando-o para camadas mais profundas no solo.

Tabela 6. Coeficientes de correlação linear entre os teores de cátions básicos e nitrato nas diferentes camadas de solo e volumes de irrigação de 20 e 100 mm em duas épocas de amostragem de solo

Camadas --- (cm) ---	----- 20 mm -----			----- 100 mm -----		
	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺	Ca ²⁺	Mg ²⁺	K ⁺
Estádio V7-8						
0-5	-0,30 ^{ns}	-0,17 ^{ns}	-0,42 ^{ns}	0,57 ^{ns}	0,82*	0,10 ^{ns}
5-10	0,15 ^{ns}	0,19 ^{ns}	0,72*	-0,27 ^{ns}	0,70*	0,04 ^{ns}
10-15	0,38 ^{ns}	0,54 ^{ns}	-0,73*	-0,41 ^{ns}	0,27 ^{ns}	0,81*
15-20	-0,29 ^{ns}	-0,21 ^{ns}	-0,58 ^{ns}	-0,02 ^{ns}	0,51 ^{ns}	0,77*
20-30	0,05 ^{ns}	-0,39 ^{ns}	-0,48 ^{ns}	0,25 ^{ns}	-0,04 ^{ns}	0,58 ^{ns}
30-40	-0,12 ^{ns}	-0,32 ^{ns}	0,67*	0,66*	0,19 ^{ns}	0,56 ^{ns}
Estádio V14-15						
0-5	-0,74*	-0,76*	-0,85*	-0,50 ^{ns}	-0,12 ^{ns}	-0,91*
5-10	-0,61 ^{ns}	-0,12 ^{ns}	-0,54 ^{ns}	-0,05 ^{ns}	0,25 ^{ns}	-0,04 ^{ns}
10-15	-0,27 ^{ns}	-0,47 ^{ns}	-0,41 ^{ns}	0,57 ^{ns}	0,55 ^{ns}	-0,62 ^{ns}
15-20	-0,29 ^{ns}	-0,35 ^{ns}	-0,52 ^{ns}	0,91*	0,71*	-0,30 ^{ns}
20-30	-0,51 ^{ns}	0,18 ^{ns}	0,14 ^{ns}	0,95*	0,75*	-0,84*
30-40	-0,01 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,21 ^{ns}	0,91*	0,68*	0,04 ^{ns}

* significativo a 5 % pelo teste t. ns: não significativo.

Assim como o Ca²⁺ trocável, o Mg²⁺ trocável no perfil do solo também foi afetado pelos manejos de N em cobertura e volumes de irrigação. Na primeira época de amostragem de solo (estádio V7-8), realizada aos dez dias após a primeira adubação nitrogenada de cobertura, houve interações duplas ($p < 0,05$) de volumes de irrigação e camadas de solo e volumes de irrigação e manejo de nitrogênio em cobertura para o Mg²⁺ trocável. Nessa época de amostragem do solo, a segunda adubação nitrogenada de cobertura não tinha sido aplicada. Assim, na primeira época de amostragem foram avaliados os efeitos de três doses de N (0, 150 e 300 kg ha⁻¹) em cobertura.

O maior volume de irrigação (100 mm) diminuiu o teor de Mg²⁺ trocável na camada de 0-5 cm em comparação ao menor volume de irrigação (20 mm)

(Figura 16). Contudo, na camada de 10-15 cm verificou-se um aumento do teor de Mg^{2+} trocável com o maior volume de irrigação (100 mm). Possivelmente, esse acréscimo no teor de Mg^{2+} trocável na camada de 10-15 cm no maior volume de irrigação (100 mm) deve-se à percolação desse cátion da camada de 0-5 cm.

Os teores de Mg^{2+} trocável nas camadas de 15-20, 20-30 e 30-40 cm não diferiram ($p > 0,05$) entre os volumes de irrigação, aos dez dias após a primeira adubação nitrogenada de cobertura (Figura 16).

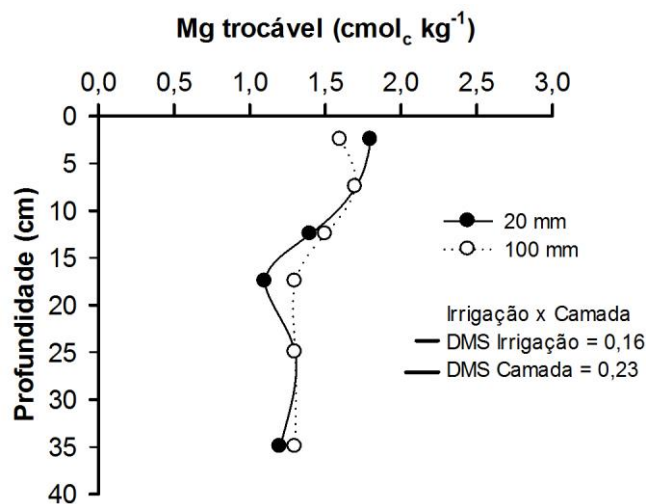


Figura 16. Magnésio trocável em função de volumes de irrigação de 20 e 100 mm e camadas de solo, na primeira época de amostragem de solo, realizada aos dez dias após a primeira adubação nitrogenada de cobertura do milho irrigado, na média de manejos de nitrogênio em cobertura. As barras, na horizontal, representam a DMS do teste de Tukey, com nível de 5% de significância.

A aplicação única de 300 kg N ha^{-1} em cobertura aumentou os teores de Mg^{2+} trocável no perfil do solo quando comparado com a aplicação parcelada e à testemunha sem aplicação de N em cobertura no maior volume de irrigação (100 mm) (Tabela 7). Por outro lado, no menor volume de irrigação (20 mm), a aplicação parcelada aumentou o Mg^{2+} trocável no perfil do solo em relação à aplicação única de 300 kg N ha^{-1} em cobertura (Tabela 7).

Comparando os volumes de irrigação para a aplicação em dose única, verifica-se que o maior volume de irrigação (100 mm) aumentou os teores de Mg^{2+} trocável na média de camada de solo em relação ao menor volume de irrigação (20 mm) (Tabela 7). Entretanto, o parcelamento do N (300 kg ha^{-1}) em

cobertura e a testemunha sem aplicação de N em cobertura não diferiram ($p>0,05$) para os volumes de irrigação.

Tabela 7. Magnésio trocável no solo em função de volumes de irrigação e manejos de nitrogênio em cobertura na primeira época de amostragem do solo, realizada aos dez dias após a primeira adubação nitrogenada de cobertura do milho, na média de camada de solo

Volume de irrigação ⁽¹⁾ ----- mm -----	Testemunha ⁽²⁾ ----- cmol _c kg ⁻¹ -----	Dose de adubação (kg N ha ⁻¹)	
		300 ⁽³⁾	150 ⁽⁴⁾
20	1,4 ABa	1,3 Bb	1,5 Aa
100	1,4 Ba	1,6 Aa	1,4 Ba

⁽¹⁾ Os volumes de irrigação foram diferenciados no estágio V7-8. ⁽²⁾ Sem nitrogênio em cobertura. ⁽³⁾ Aplicação única de 300 kg N ha⁻¹ no estágio V5-6. ⁽⁴⁾ Aplicação de 150 kg N ha⁻¹ no estágio V5-6. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula, na linha, e pela mesma letra minúscula, na coluna, não diferem entre si pelo teste de *Tukey* a 5%.

Na segunda época de amostragem do solo (estádio V14-15), realizada dez dias após a segunda adubação nitrogenada de cobertura, houve interação tripla ($p<0,05$) de volumes de irrigação, manejo de N em cobertura e camadas de solo para o Mg²⁺ trocável (Figura 17).

O teor de Mg²⁺ trocável foi menor com a aplicação única de 300 kg N ha⁻¹ em cobertura nas camadas de 0-5 e 5-10 cm em relação à testemunha sem aplicação de N em cobertura no menor volume de irrigação (20 mm) (Figura 17a). Entretanto, nas mesmas camadas, mas no maior volume de irrigação (100 mm), o teor de Mg²⁺ trocável foi similar entre a aplicação única de 300 kg N ha⁻¹ em cobertura e a testemunha sem aplicação de N em cobertura (Figura 17b).

O modo de aplicação do N (aplicação única e parcelada) em cobertura não afetou os teores de Mg²⁺ trocável nas camadas de 10-15, 15-20, 20-30 e 30-40 cm no menor volume de irrigação (20 mm) (Figura 17a). Por outro lado, no maior volume de irrigação (100 mm), a aplicação única de 300 kg N ha⁻¹ em cobertura aumentou os teores de Mg²⁺ trocável nas camadas de 15-20, 20-30 e 30-40 cm em relação ao parcelamento de 300 kg N ha⁻¹ (Figura 17b). Corroborando com esses resultados, constata-se uma correlação positiva entre NO₃⁻ e Mg²⁺ trocável no solo (Tabela 6). Deve-se enfatizar que a descida do

Mg^{2+} trocável no perfil do solo não significou perda total, pois houve acúmulo desse cátion na camada subsuperficial. O acúmulo do Mg^{2+} foi favorecido, em parte, pelos maiores teores de argila nessas camadas (Tabela 1).

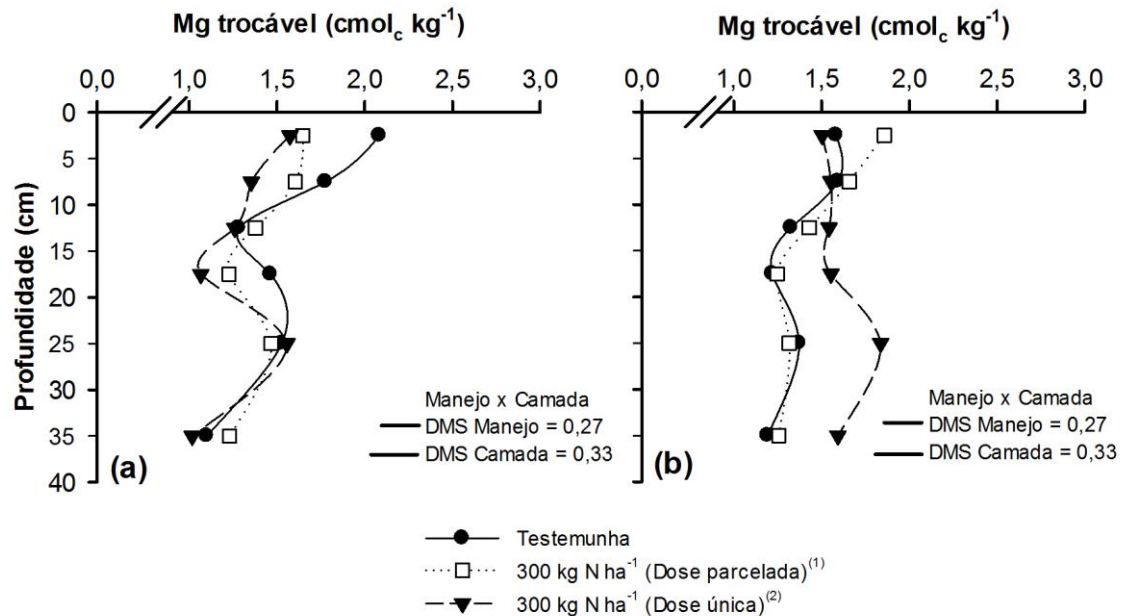


Figura 17. Magnésio trocável no solo em função de manejos de nitrogênio em cobertura e camadas de solo para os volumes de irrigação de 20 mm (a) e 100 mm (b) na segunda época de amostragem, realizada aos dez dias após a segunda adubação nitrogenada de cobertura no milho irrigado. ⁽¹⁾ O parcelamento da aplicação de 300 kg N ha⁻¹ em cobertura foi realizado nos estádios V5-6 e V11-12. ⁽²⁾ A aplicação da dose única de N em cobertura foi realizada no estágio V5-6. As barras, na horizontal, representam a DMS do teste de Tukey, com nível de 5% de significância.

Esse fato ameniza, em parte, o efeito do uso de altas doses de N e o excesso hídrico. Além disso, Raji (2011) comenta que as perdas dos cátions básicos do solo por lixiviação ocorrem com a introdução no sistema de fontes de acidez ou doadores de prótons (H^+), basicamente o NH_4^+ ou materiais com N que liberam o NH_4^+ . Portanto, ocorre o aparecimento de H^+ , prontamente incorporado ao solo em forma não dissociada, bloqueando cargas negativas e liberando bases em quantidades equivalentes. O $N-NO_3^-$ não adsorvido no solo permanece em solução quando os cátions são liberados, aumentando o teor de sais na solução, que ficam livres para acompanhar a água de percolação. Assim, a acidificação do solo pode ser vista pela remoção de cátions básicos

do perfil do solo até o limite do sistema radicular (Raij, 2011). Com base nesses dados, pode-se inferir que alta dose de fertilizante nitrogenado e alto volume hídrico potencializam a descida do Mg^{2+} trocável nas camadas subsuperficiais.

Adomaitis et al. (2013) encontraram perda de 80 kg ha^{-1} ano de Mg^{2+} , lixiviado para as camadas subsuperficiais do solo (até 80 cm de profundidade) pela aplicação anual de altas doses de fertilizantes minerais ($222, 192$ e 192 kg ha^{-1} de N, P_2O_5 e K_2O) por quarenta anos.

5.3.2 Potássio disponível

Os teores de K disponível no perfil do solo são enquadrados na classe “Alto” (CQFRS/SC, 2004). Esses teores podem ser devidos às sucessivas adubações potássicas durante 22 anos. Além disso, esse alto valor pode provir da intemperização do material de origem do solo, que é rico em feldspato de K (Meurer et al., 1996). Os teores iniciais de K^+ disponível foram maiores na camada superficial (0-5 cm) com decréscimo desses teores no perfil do solo (Tabela 1).

Na primeira época de amostragem de solo (estádio V7-8), realizada aos dez dias após a primeira adubação nitrogenada de cobertura, houve interações duplas ($p < 0,05$) manejo de nitrogênio em cobertura e camadas de solo e volumes de irrigação e manejos de nitrogênio em cobertura. Nessa época de amostragem do solo, a segunda adubação nitrogenada de cobertura não tinha sido aplicada. Assim, na primeira época de amostragem foram avaliados os efeitos de três doses de N ($0, 150$ e 300 kg ha^{-1}) em cobertura e dois volumes de irrigação (20 e 100 mm).

A aplicação da maior dose de N (300 kg ha^{-1}) em cobertura não diferiu ($p > 0,05$) os teores de K^+ disponível no solo nas camadas de 0-5, 5-10, 10-15 e 15-20 cm em comparação à testemunha sem aplicação de N em cobertura (Figura 18). Contudo, com a aplicação da dose de 150 kg N ha^{-1} em cobertura os teores de K^+ disponível foram menores nas camadas de 0-5, 5-10 e 15-20 cm em relação à testemunha sem aplicação de N em cobertura.

Apesar das variações na distribuição do teor de K^+ disponível no perfil do solo ser independente do manejo do N em cobertura, houve acúmulo desse

nutriente nas camadas de 0-5, 5-10 e 10-15 cm, aos dez dias após a primeira adubação nitrogenada de cobertura (Figura 18). A adição do adubo potássico superficialmente ou na linha de semeadura, o contínuo aporte de resíduos e o mínimo revolvimento do solo propiciam grande concentração de K na superfície do solo (Anghinoni, 2007). Além disso, o K pode ser quase totalmente liberado a partir da palha antes de decomposição do tecido, pois está presente em órgãos da planta como um íon e não está vinculado a compostos orgânicos (Marschner, 1995).

A aplicação de N em cobertura aumentou os teores de K^+ disponível na camada de 30-40 cm, aos dez dias após a primeira adubação nitrogenada de cobertura em relação à testemunha sem aplicação de nitrogênio em cobertura (Figura 18). Provavelmente, a baixa interação do K com as cargas negativas do solo e os baixos valores de pH do solo afetaram o deslocamento desse nutriente no perfil do solo. Conforme Quaggio (2000), os baixos valores de pH, como no caso deste experimento, aumentaram a lixiviação de K, mesmo em solo argiloso normalmente considerado pouco propício para essa ocorrência. Deste modo, em solos minerais ácidos, a lixiviação de cátions segue a ordem: $K^+ > Mg^{2+} > Ca^{2+} > Al^{3+}$ (Raij, 1989).

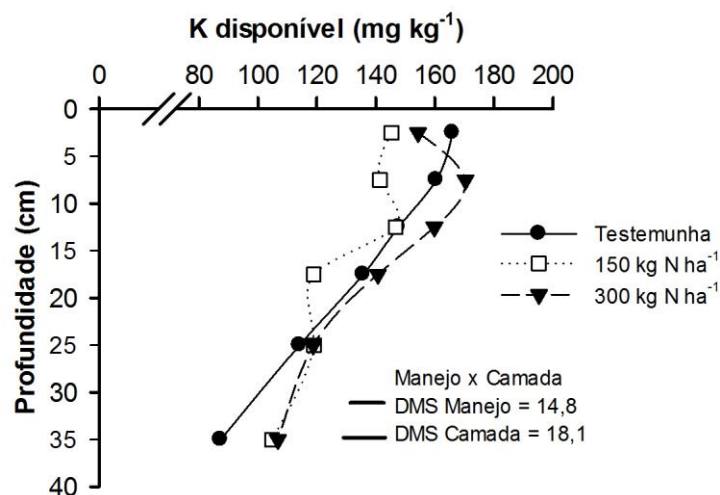


Figura 18. Potássio no solo em função de manejos de nitrogênio em cobertura e camadas de solo na primeira época de amostragem realizada aos dez dias após a primeira adubação nitrogenada de cobertura do milho irrigado, na média de volumes de irrigação. Nessa época de amostragem, foram aplicadas no estágio V5-6 as doses de 150 e 300 kg N ha⁻¹. As barras, na horizontal, representam a DMS do teste de Tukey, com nível de 5% de significância.

No maior volume de irrigação (100 mm), a aplicação única de N em cobertura aumentou os teores de K^+ disponível na média de camadas de solo em relação à aplicação parcelada de N e a testemunha sem aplicação de nitrogênio (Tabela 8). Este efeito pode estar associado ao aumento do pH do solo (Figura 7b), que aumenta o número de cargas elétricas negativas do solo (Albuquerque et al., 2000), e assim, parte do K da solução passa a ser adsorvido eletrostaticamente às cargas criadas, tornando menos suscetível à lixiviação (Ernani et al., 2007). Contudo, no menor volume de irrigação (20 mm) não foi verificada diferença entre os manejos de nitrogênio em cobertura.

Os teores de K^+ disponível na média de camadas do solo não foram afetados pelos volumes de irrigação em ambos os manejos de nitrogênio (aplicação única e parcelada) em cobertura (Tabela 8). Entretanto, na ausência de N em cobertura (testemunha), os volumes de irrigação afetaram os teores de K^+ disponível no perfil do solo. Nesse manejo, o maior volume de irrigação (100 mm) diminuiu o teor de K^+ disponível no perfil do solo em relação ao menor volume de irrigação (20 mm).

Tabela 8. Teor de potássio em função de volume de irrigação e manejos de nitrogênio em cobertura na primeira época de amostragem do solo, realizada aos dez dias após a primeira adubação nitrogenada de cobertura do milho irrigado, na média de camadas de solo

Volume de irrigação ⁽¹⁾	Testemunha ⁽²⁾	Dose de adubação (kg N ha ⁻¹)	
		300 ⁽³⁾	150 ⁽⁴⁾
----- mm -----	----- mg kg ⁻¹ -----		
20	146 Aa	137 Aa	130 Aa
100	125 Bb	146 Aa	129 Ba

⁽¹⁾ Os volumes de irrigação foram diferenciados no estágio V7-8. ⁽²⁾ Sem nitrogênio em cobertura. ⁽³⁾ Aplicação única de 300 kg N ha⁻¹ no estágio V5-6. ⁽⁴⁾ Aplicação de 150 kg N ha⁻¹ no estágio V5-6. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula, na linha, e pela mesma letra minúscula, na coluna, não diferem entre si pelo teste de *Tukey* a 5%.

Na segunda época de amostragem do solo (estádio V14-15), realizada aos dez dias após a segunda adubação nitrogenada de cobertura, houve interação tripla ($p < 0,05$) de volumes de irrigação, manejo de N em cobertura e camadas de solo para o Mg^{2+} trocável (Figura 19). Nessa época de amostragem, esse atributo não foi influenciado pelos volumes de irrigação (20 e 100 mm).

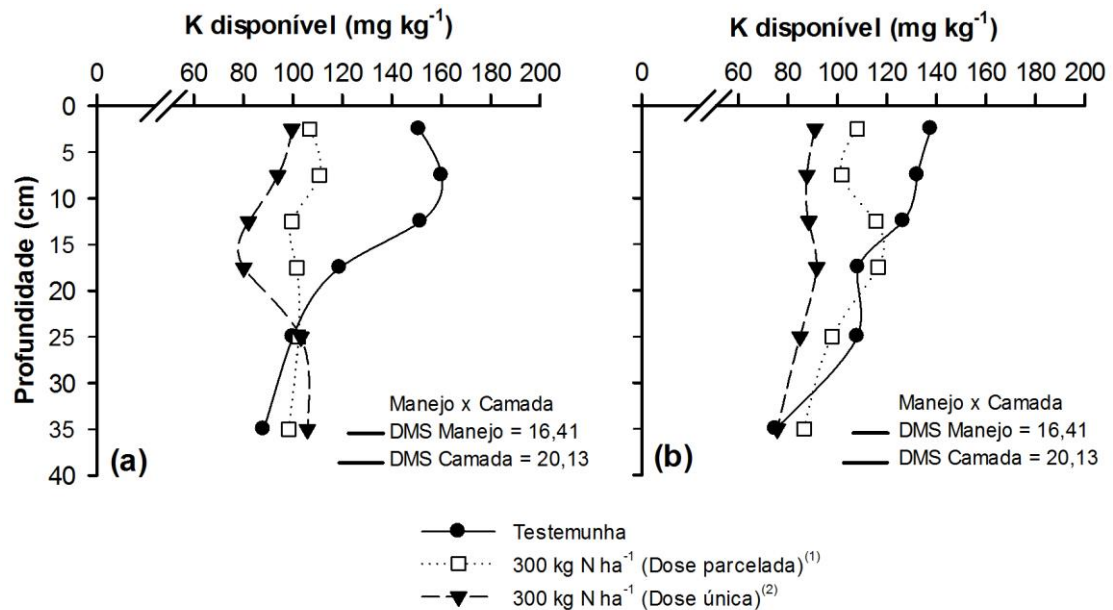


Figura 19. Potássio no solo em função de manejos de nitrogênio em cobertura e camadas de solo para os volumes de irrigação de 20 mm (a) e 100 mm (b) na segunda época de amostragem, realizada aos dez dias após a segunda adubação nitrogenada de cobertura no milho irrigado. ⁽¹⁾ O parcelamento da aplicação de 300 kg N ha⁻¹ em cobertura foi realizado nos estádios V5-6 e V11-12. ⁽²⁾ A aplicação da dose única de N em cobertura foi realizada no estádio V5-6. As barras, na horizontal, representam a DMS do teste de *Tukey*, com nível de 5% de significância.

A aplicação única de 300 kg N ha⁻¹ em cobertura diminuiu os teores de K⁺ disponível nas camadas de 0-5, 5-10, 10-15 e 15-20 cm em relação à testemunha sem aplicação de nitrogênio em cobertura, no menor volume de irrigação (20 mm) (Figura 19a). Possivelmente, o decréscimo observado deve-se à alta demanda inicial de K pelo milho. Segundo Karlen et al. (1988), as plantas, em geral, acumulam cerca de 40% de todo o K necessário para seu desenvolvimento em apenas 52 dias após a emergência. Além disso, o acúmulo de resíduos vegetais na superfície do solo, em razão da baixa mobilização do solo, em sistemas conservacionistas tem contribuído para a maior proliferação de raízes nas camadas superficiais (Yibirin et al., 1993). Por outro lado, no maior volume de irrigação (100 mm), esse comportamento foi similar nas camadas de 0-5, 5-10, 10-15, 15-20 e 20-30 cm (Figura 19b).

No menor volume de irrigação (20 mm), a aplicação única de 300 kg N ha⁻¹ em cobertura aumentou o teor de K⁺ disponível na camada de 30-40 cm em relação à testemunha sem aplicação de nitrogênio em cobertura (Figura

19a). Contudo, para a mesma camada, mas no maior volume de irrigação (100 mm), o teor de K^+ disponível não foi afetado com a aplicação única de 300 kg N ha^{-1} em relação à testemunha sem aplicação de N em cobertura (Figura 19b).

5.4 Características agronômicas

Não foi constatada interação ($p < 0,05$) entre os volumes de irrigação e o manejo de N em cobertura quanto aos seus efeitos sobre o rendimento de matéria seca da parte aérea e N acumulado no espigamento e o rendimento de grãos, sendo então discutidos os efeitos simples pelas médias desses fatores (Tabela 9).

O milho apresentou resposta à aplicação de N em cobertura para essas três variáveis analisadas. Entretanto, deve-se ressaltar que o parcelamento do nitrogênio em cobertura não foi vantajoso quando comparado com a aplicação única de N em cobertura (Tabela 9). Essa ausência de resposta ao parcelamento está de acordo com os resultados encontrados por Fontoura & Bayer (2009), ao observarem que, em sete anos de experimento, o parcelamento da adubação nitrogenada não se refletiu em aumento de rendimento em relação à aplicação em dose única. Além disso, a melhoria da fertilidade do solo com o passar do tempo, principalmente no sistema plantio direto, pode ter contribuído para a redução na magnitude de importância do modo de aplicação dos fertilizantes (Ceretta et al., 2007). Possivelmente, a ausência de resposta para o rendimento de grãos quanto ao modo de aplicação deve-se ao fato de que logo após a aplicação do N as parcelas foram irrigadas, reduzindo-se as perdas por volatilização. Ao irrigar a área logo após a aplicação da ureia ocorre redução substancial da volatilização de NH_3 , em consequência do aumento do contato entre o fertilizante e as partículas de solo. Com isso, há aumento da adsorção de NH_4^+ às cargas negativas do solo (Silva et al., 1995).

Tabela 9. Rendimento de matéria seca e quantidade de nitrogênio acumulado na parte aérea no espigamento e rendimento de grãos de milho em função de manejos de nitrogênio em cobertura e volumes de irrigação

Volume de irrigação ⁽¹⁾	Testemunha ⁽²⁾	Adubação de 300 kg N ha ⁻¹		Média
		Única ⁽³⁾	Parcelada ⁽⁴⁾	
----- mm -----	----	Rendimento matéria seca da parte aérea (Mg ha ⁻¹) ----		
20	14,10	18,54	19,97	17,54 a
100	13,73	17,90	19,73	17,12 a
Média	13,92 B	18,22 A	19,85 A	
	-----	N acumulado no espigamento (kg ha ⁻¹) -----		
20	128	346	339	271 a
100	152	304	321	259 a
Média	140 B	325 A	330 A	
	-----	Rendimento de grãos (Mg ha ⁻¹) -----		
20	8,61	15,14	15,42	13,05 a
100	10,02	15,16	15,17	13,45 a
Média	9,32 B	15,15 A	15,29 A	

⁽¹⁾ Os volumes de irrigação foram diferenciados no estágio V7-8. ⁽²⁾ Sem nitrogênio em cobertura. ⁽³⁾ Aplicação única de 300 kg N ha⁻¹ no estágio V5-6. ⁽⁴⁾ Aplicação parcelada de 150 kg N ha⁻¹ nos estádios V5-6 e V11-12. Médias seguidas pela mesma letra maiúscula, na linha, e pela mesma letra minúscula, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Tukey a 5%.

A aplicação de N em cobertura, seja em dose única ou parcelada, aumentou o rendimento de matéria seca da parte aérea e N acumulado no espigamento e o rendimento de grãos quando comparado à testemunha sem aplicação de N em cobertura (Tabela 9). Provavelmente, essa menor absorção deve estar associada à predominância de processos de imobilização em relação à mineralização do N. A maior imobilização microbiana ocorre nas camadas superficiais do solo no sistema plantio direto (Vargas & Scholles, 1998), podendo ser suficientemente altas para, isoladamente, afetar a absorção de N pelas plantas.

O maior rendimento de grãos proporcionado pela adubação nitrogenada (Tabela 9) provavelmente se deu em virtude do nitrogênio ter favorecido o crescimento da planta e o incremento da área foliar, resultando em maior síntese de fotoassimilados. Assim, a adubação nitrogenada deve ter favorecido a translocação de N e fotoassimilados dos órgãos vegetativos, sobretudo das folhas para os grãos.

É importante ressaltar que, embora a área experimental apresente pH < 5,0, a produtividade de grãos atingiu altos patamares, produzindo em média cerca de 9,3 Mg ha⁻¹ na testemunha sem N em cobertura (Tabela 9). As prováveis explicações para isto são a complexação do Al por ligantes

orgânicos, os elevados níveis de fertilidade e a utilização de irrigação no experimento. A adoção do plantio direto por longo período (22 anos), por ter favorecido o acúmulo de matéria orgânica e de nutrientes na camada superficial do solo, devido ao baixo revolvimento nesse sistema, pode ter promovido a atenuação da fitotoxidez de Al devido a sua complexação por ligantes orgânicos (Salet et al., 1999) e à diminuição da atividade das formas tóxicas de Al pela maior concentração iônica na solução do solo (Salet, 1998; Giongo, 2002). Evidencia-se, assim, a contribuição do sistema plantio direto consolidado como responsável pelo incremento da produtividade.

6. CONCLUSÕES

Considerando as condições em que o trabalho foi desenvolvido e com base em apenas um ano de avaliação, pode-se concluir que:

- a) Na segunda época de amostragem do solo, no maior volume de irrigação (100 mm) o nitrato, cálcio e magnésio percolaram no perfil do solo com a aplicação única em cobertura de 300 kg N ha^{-1} .
- b) O parcelamento da adubação nitrogenada para altos rendimentos no milho é uma alternativa eficiente para diminuir os teores de nitrato nas camadas subsuperficiais do solo.
- c) A aplicação única e parcelada de nitrogênio em cobertura e os volumes de irrigação não afetam o rendimento de matéria seca e quantidade de nitrogênio acumulado na parte aérea no espigamento e o rendimento de grãos de milho.

7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ACOSTA, J. A. A. **Dinâmica do nitrogênio sob sistema plantio direto e parâmetros para o manejo da adubação nitrogenada no milho**. 2009. 171 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

ADOMAITIS, T. et al. Leaching of base cations as affected by a forty-year use of mineral fertilisation. **Zemdirbyste-Agriculture**, Lithuania, v. 100, n. 2, p. 119-126, 2013.

ALBUQUERQUE, J. A. et al. Propriedades físicas e eletroquímicas de um Latossolo Bruno afetadas pela calagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 295-300, 2000.

ALCÂNTARA, M. A. K. D.; CAMARGO, O. A. D. Adsorção de nitrato em solos com cargas variáveis. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 4, p. 369-376, 2005.

AMADO, T.; MIELNICZUK, J.; AITA, C. Recomendação de adubação nitrogenada para o milho no RS e SC adaptada ao uso de culturas de cobertura do solo, sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 1, p. 241-248, 2002.

ANGHINONI, I. Fertilidade do solo e seu manejo em sistema plantio direto. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do Solo**, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 873-928.

ARAÚJO, A. R. D. et al. Movimentação de nitrato e amônio em colunas de solo. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 28, n. 3, p. 537-541, 2004.

AZOOZ, R.; ARSHAD, M. Soil infiltration and hydraulic conductivity under long-term no-tillage and conventional tillage systems. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 76, n. 2, p. 143-152, 1996.

BARTZ, H. R. Dinâmica dos nutrientes e adubação em sistemas de produção sob plantio direto. In: FRIES, M. R. (Ed.). **Plantio Direto em solos arenosos: alternativas para a sustentabilidade agropecuária**. Santa Maria: Ed. Pallotti, 1998. p. 52-81.

BATISTA, K. **Nitrogênio e enxofre na implantação do capim-marandu em substituição ao capim-braquiária em degradação num solo com baixa matéria orgânica**. 2006. 125 f. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

BENITES, V. M. et al. Potássio, cálcio e magnésio. In: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. (Ed.). **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes** Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2010. p. 132-204.

BERGAMASCHI, H. et al. **Boletins agrometeorológicos da estação experimental agrônômica da UFRGS - série histórica 1970/2012**. Disponível em:

<http://www.ufrgs.br/agronomia/joomla/files/EEA/Serie_Meteorologica_da_EEA-UFRGS.pdf>. Acesso em: 10/01/2014.

BISSANI, C. A. et al. **Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas**. 2 ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. 344 p.

BLACK, A.; WARING, S. Nitrate leaching and adsorption in a krasnozem from redland bay. II - Soil factors influencing adsorption. **Australian Journal of Soil Research**, Australia, v. 14, n. 2, p. 181-188, 1976.

BLEVINS, R. L. et al. Changes in soil properties after 10 years continuous non-tilled and conventionally tilled corn. **Soil Tillage Research**, Amsterdam, v. 3, n. 2, p. 135-146, 1983.

BOHNEN, H. Acidez do solo: origem e evolução. In: KAMINSKI, J. (Coord.). **Uso de corretivos da acidez do solo no plantio direto**. Pelotas: Núcleo Regional Sul da Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2000. p. 9-19.

BOLAN, N. S.; HEDLEY, M. J. Role of carbon, nitrogen, and sulfur cycles in soil acidification. In: RENDEL, Z. (Ed.). **Handbook of soil acidity**. New York: Marcel Dekker, 2003. p. 29-56.

BONFIM-DA-SILVA, E. M. **Nitrogênio e enxofre na recuperação de pastagem de capim-Braquiária em degradação em Neossolo Quartzarênico com expressiva matéria orgânica**. 2005. 123 f. Tese (Doutorado) - Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2005.

BORTOLINI, C. G. **Eficiência do método de adubação nitrogenada em pré-
semeadura do milho implantado em semeadura direta após aveia preta**. 2000. 48 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

BOUMAN, O. T. et al. Soil acidification from long-term use of anhydrous ammonia and urea. **Soil Science Society of American Journal**, Madison, v. 59, n. 5, p. 1488-1494, 1995.

BOUWMEESTER, R. J. B.; VLEK, P. L. G.; STUMPE, J. M. Effect of Environmental Factors on Ammonia Volatilization from a Urea-Fertilized Soil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 49, n. 2, p. 376-381, 1985.

BUSSINK, D. W. Ammonia volatilization from grassland receiving nitrogen fertilizer and rotationally grazed by dairy cattle. **Fertilizer Research**, New York, v. 33, n. 3, p. 257-265, 1992.

CAHN, M. D.; BOULDIN, D. R.; CRAVO, M. S. Nitrate sorption in the profile of an acid soil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 143, n. 2, p. 179-183, 1992.

CAHN, M. D. et al. Cation and nitrate leaching in an Oxisol of the Brazilian Amazon. **Agronomy Journal**, Madison, v. 85, n. 2, p. 334-340, 1993.

CAMARGO, F. A. O. et al. Nitrogênio orgânico do solo. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. (Ed.). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Porto Alegre: Gênese, 1999. p. 117-138.

CANTARELLA, H. Nitrogênio. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do Solo** Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 375-470.

CANTARELLA, H.; DUARTE, A. P. Manejo da fertilidade do solo para a cultura do milho. In: GALVÃO, J. C. C.; MIRANDA, G. V. (Eds.). **Tecnologia de produção de milho**. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 2004. p. 139-182.

CERETTA, C. A. **Fracionamento de N orgânico, substâncias húmicas e caracterização de ácidos húmicos de solo em sistemas de cultura sob plantio direto**. 1995. 127 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995.

CERETTA, C. A. Adubação nitrogenada no sistema plantio direto: Sucessão aveia/milho. In: CONFERÊNCIA ANUAL DE PLANTIO DIRETO, 2, 1998, Ijuí. **Anais...** Passo Fundo: Aldeia Norte. p.49-62.

CERETTA, C. A.; SILVA, L. S.; PAVINATO, A. Manejo da adubação. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do Solo**. Viçosa: SBCS, 2007. p. 851-872.

CERETTA, C. A.; SILVEIRA, M. J. Adubação nitrogenada no Sistema Plantio Direto. In: CURSO DE FERTILIDADE DO SOLO EM PLANTIO DIRETO, 5., 2002, Guarapuava. **Resumos...** Guarapuava: Aldeia Norte, 2002. p.115-127.

COELHO, A. M. Fertirrigação. In: COSTA, E. F.; VIEIRA, R. F.; VIANA, P. A. (eds). **Quimigação: Aplicação de produtos químicos e biológicos via irrigação**. Sete Lagoas: Embrapa/CNMS, 1994. p. 201-227.

COELHO, A. M. **Manejo da adubação nitrogenada na cultura do milho**. Sete Lagoas: Embrapa Milho e Sorgo, 2007. 11 p. (Circular Técnica, 96).

COELHO, A. M.; CRUZ, J. C.; PEREIRA FILHO, I. A. **Rendimento de milho no Brasil: Chegamos ao máximo?**. Piracicaba: Potafos, 2003. 12 p. (Encarte Técnico, 101).

COELHO, A. M. et al. Balanço de nitrogênio ^{15}N em Latossolos Vermelhos Escuro, sob a vegetação do cerrado, cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 15, n. 2, p. 187-193, 1991.

CONYERS, M. K.; HEENAN, D. P.; POILE, G. J. et al. Influence of dryland agricultural management practices on the acidification of a soil profile. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v. 37, n. 2-3, p. 127-141, 1996.

COSTA, K. A. D. P. et al. Doses e fontes de nitrogênio em pastagem de capim-marandu: I - alterações nas características químicas do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 4, p. 1591-1599, 2008.

COSTA, S. E. V. G. A. **Distribuição de fósforo, de potássio e de raízes e rendimento de milho em sistemas de manejo do solo e da adubação em longo prazo**. 2008. 116 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2008.

CQFS-RS/SC. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. Comissão de Química e Fertilidade do Solo - RS/SC. **Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10 ed. Porto Alegre: SBCS: Núcleo Regional Sul: UFRGS, 2004. 400 p.

DECHEN, A. R.; NACHTIGALL, G. R. Elementos requeridos à nutrição de plantas. In: NOVAIS, R. F. et al. (Ed.). **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 91-132.

DI, H. J.; CAMERON, K. C. Effects of the nitrification inhibitor dicyandiamide on potassium, magnesium and calcium leaching in grazed grassland. **Soil Use and Management**, Malden, v. 20, p. 2-7, 2004.

DYNIA, J. F. Nitrate retention and leaching in variable charge soils of a watershed in São Paulo State, Brazil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 31, n. 5-6, p. 777-791, 2000.

EGGLESTON, H. S. et al. **Agriculture, forestry and other land use**. Disponível em: <<http://www.ipcc-nggip.iges.or.jp/public/2006gl/vol4.html>>. Acesso em: 06/01/2014.

EMBRAPA. **Manual de métodos e análise de solo**. 2 ed. Rio de Janeiro: Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997. 212 p.

EMBRAPA. **Indicações técnicas para o cultivo de milho e de sorgo no Rio Grande do Sul safras 2013/2014 e 2014/2015**. Brasília: Embrapa, 2013. 124 p.

ERNANI, P. R. Nutrição e produtividade de espécies vegetais em sistemas de plantio direto e convencional. In: REUNIÃO TÉCNICA CATARINENSE: MILHO & FEIJÃO, 2, 1999, Lages. **Resumos...** Lages: UDESC/EPAGRI, 1999. p.19-30.

ERNANI, P. R. **Química do solo e disponibilidade de nutrientes**. Lages: Paulo Ernani, 2008. 230 p.

ERNANI, P. R. et al. Mobilidade vertical de cátions influenciada pelo método de aplicação de cloreto de potássio em solos com carga variável. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 31, p. 393-402, 2007.

FANCELLI, A. L. **Nutrição e adubação de milho**. Piracicaba: Departamento de Agricultura, ESALQ/USP, 2000. 43 p.

FENTON, G.; HELYAR, K. The role of the nitrogen and carbon cycle in soil acidification. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 98, p. 1-12. 2002. (Encarte Técnico Potafos).

FEY, R. et al. Relações entre lixiviação de nitrato e produção de biomassa do milho com dejetos suínos provenientes de diferentes tratamentos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 5, n. 2, p. 212-218, 2010.

FONTOURA, S. M. V.; BAYER, C. Adubação nitrogenada para alto rendimento de milho em plantio direto na região centro-sul do Paraná. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 33, n. 6, p. 1721-1732, 2009.

FORNASIERI FILHO, D. **Manual da cultura do milho**. Jaboticabal: Funep, 2007. 576 p.

GAVA, G. J. C. **Compartimentalização do nitrogênio no sistema solo-planta na implantação da semeadura direta no ciclo da cultura do milho**. 2003. 125 f. Tese (Doutorado) - Centro de Energia Nuclear na Agricultura, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

GIONGO, V. **Características químicas da solução de solo no sistema plantio direto e relação entre alumínio e silício em genótipos de milho**. 2002. 98 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência de Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

GOMES, T. M. et al. Avaliação da concentração e distribuição de nitrito, amônio e nitrato provenientes da uréia aplicada via sistema de irrigação por gotejamento. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 9, p. 73-79, 1998.

HELYAR, K. **Manejo da acidez do solo a curto e a longo prazos**. Piracicaba: Potafós, 2003. 12 p. (Encarte Técnico, 104).

HELYAR, K. R.; PORTER, W. M. Soil acidification, its measurement and the processes involved. In: ROBSON, A. D. (Ed.) **Soil acidity and plant growth**. Sydney: Academic Press, 1989. p. 61-101.

HILL, R. L. Long-term conventional and no-tillage effects on selected soil physical properties. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 54, n. 1, p. 161-166, 1990.

HOWARTH, R. W.; MARINO, R. Nitrogen as the limiting nutrient for eutrophication in coastal marine ecosystems: evolving views over three decades. **American Society of Limnology and Oceanography**, v. 51, p. 364-376, 2006.

KARLEN, D. L.; FLANNERY, R. L.; SADLER, E. J. Aerial accumulation and partitioning of nutrients by corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 80, n. 2, p. 232-242, 1988.

KEENEY, D. R. Nitrogen management for maximum efficiency and minimum pollution. In: STEVENSON, F. J. (Ed.). **Nitrogen in agricultural soils**. Madison: Soil Science Society of America, 1982. p. 605-649.

KINJO, T.; KIEHL, E. J.; PRATT, P. F. Movimento do nitrato em colunas de terra de um Latossolo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 2, n. 2, p. 106-109, 1978.

KINJO, T.; PRATT, P. F. Nitrate Adsorption: II. In Competition with Chloride, Sulfate, and Phosphate. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 35, n. 5, p. 725-728, 1971.

KISSEL, D. E. et al. Rainfall timing and ammonia loss from urea in a loblolly pine plantation. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 68, n. 5, p. 1744-1750, 2004.

LANE, D. R.; BASSIRIRAD, H. Differential responses of tallgrass prairie species to nitrogen loading and varying ratios of NO_3^- to NH_4^+ . **Functional Plant Biology**, Victoria, v. 29, n. 10, p. 1227-1235, 2002.

LANGE, A. et al. Alterações em atributos do solo decorrentes da aplicação de nitrogênio e palha em sistema semeadura direta na cultura do milho. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 2, p. 460-467, 2006.

LARA CABEZAS, W. A. R.; KORNDORFER, G. H.; MOTTA, S. A. Volatilização de N-NH_3 na cultura de milho: I. Efeito da irrigação e substituição parcial da uréia por sulfato de amônio. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, n. 3, p. 481-487, 1997a.

LARA CABEZAS, W. A. R.; KORNDORFER, G. H.; MOTTA, S. A. Volatilização de N-NH_3 na cultura de milho: II. Avaliação de fontes sólidas e fluidas em sistema de plantio direto e convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 21, n. 3, p. 489-496, 1997b.

MALAVOLTA, E.; VIOLANTE NETTO, A. **Nutrição mineral, calagem, gessagem e adubação dos citros**. Piracicaba: POTAFOS, 1989. 153 p.

MARCANO-MARTINEZ, E.; McBRIDE, M. B. Calcium and Sulfate Retention by Two Oxisols of the Brazilian Cerrado. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 53, n. 1, p. 63-69, 1989.

MARSCHNER, H. Functions of mineral nutrients: macronutrients mineral. **Mineral Nutrition of Higher Plants**. London: Academic Press, 1995. p. 889.

MATSON, P. A.; NAYLOR, R.; ORTIZ-MONASTERIO, I. Integration of environmental, agronomic, and economic aspects of fertilizer management. **Soil Science**, Amsterdam, v. 280, n. 3, p. 112-115, 1998.

MAZURANA, M. et al. Sistemas de preparo de solo: alterações na estrutura do solo e rendimento das culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n. 4, p. 1197-1206, 2011.

McBRIDE, M. B. **Environmental chemistry of solis**. New York: Oxford University Press, 1994. 406 p.

MEISINGER, J. J.; CALDERÓN, F. J.; JENKINSON, D. S. Soil nitrogen budgets. In: SCHEPERS, J. S.; RAUN, W. R. (Ed.). **Nitrogen in agricultural systems**. Madison: American Society of Agronomy, 2008. p. 505-562.

MELO, V. F.; CASTILHOS, R. M. V.; PINTO, L. F. S. Reserva mineral do solo. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. **Química e mineralogia do solo: Parte I - Conceitos básicos**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. p. 251-332.

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

MEURER, E. J.; KÄMPF, N.; ANGHINONI, I. Fontes potenciais de potássio em alguns solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Brasília, v. 20, n. 1, p. 41-47, 1996.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras: Universidade Federal de Lavras, 2002. 625 p.

MUZILLI, O.; OLIVEIRA, E. L.; CALEGARI, A. **Adubação do milho**. Campinas: Fundação Cargill, 1989. 29 p.

OLIVEIRA, F. H. T. et al. Fertilidade do solo no sistema plantio direto. In: ALVAREZ V. et al. (Ed.). **Tópicos em Ciência do Solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002a. v. 2, p. 393-486.

OLIVEIRA, M. W. et al. Leaching of nitrogen, potassium, calcium and magnesium in a sandy soil cultivated with sugarcane. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 6, p. 861-868, 2002b.

PEARSON, R. W.; ABRUNA, F.; VICENTE-CHANDLER, J. Effect of lime and nitrogen applications on downward movement of calcium and magnesium in two humid tropical soils of puerto rico. **Soil Science**, Baltimore, v. 93, n. 2, p. 77-82, 1962.

PRIMAVESI, O. et al. Lixiviação de nitrato em pastagem de coastcross adubada com nitrogênio. **Revista Brasileira de Zootecnia**, Viçosa, v. 35, n. 3, p. 683-690, 2006.

QUAGGIO, J. A. **Acidez e calagem em solos tropicais**. Campinas: Instituto Agrônomo, 2000. 111 p.

RAIJ, B. Van. **Avaliação da fertilidade do solo**. Piracicaba: Instituto da Potassa e Fosfato, Instituto Internacional da Potassa, 1981. 142 p.

RAIJ, B. Van. Propriedades eletroquímicas de solos. In: SIMPÓSIO AVANÇADO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO, 1986, Piracicaba. **Anais...** Campinas: Fundação Cargill, 1989. p.9-41.

RAIJ, B. Van. **Fertilidade do solo e adubação**. São Paulo: Editora Agrônoma Ceres, 1991. 343 p.

RAIJ, B. Van. **Fertilidade so solo e manejo de nutrientes**. Piracicaba: International Plant Nutrition Institute, 2011. 420 p.

RAVEN, J. A. pH regulation in plants. **Science Progress**, Oxford, v. 69, p. 495-509 , 1985.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. 2 ed. Barueri: Manole, 2012. 524 p.

RITCHIE, S. W.; HANWAY, J. J.; BENSON, G. O. **How a corn plant develops**, Ames: Iowa State University of Science and Technology, 1993. p. 26 (Special Report, 48).

ROBERTSON, G. P. Denitrification in maize under no-tillage. In: SUMMER, M. E. (Ed.). **Handbook of soil science**. Boca Raton: CRC Press, 2000. p. 181-190.

RODRIGUES, M. B.; KIEHL, J. C. Distribuição e nitrificação da amônia proveniente da uréia aplicada ao solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 16, n. 3, p. 403-408, 1992.

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

SAINZ ROZAS, H. R. et al. Evaluation of the presidress soil nitrogen test for no-tillage maize fertilized at planting. **Agronomy Journal**, Madison, v. 92, p. 1176-1183, 2000.

SALET, R. L. **Toxidez de alumínio no sistema plantio direto**. 1998. 109 f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência de Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1998.

SALET, R. L.; ANGHINONI, I.; KOCHHANN, R. A. Atividade do alumínio na solução de solo no sistema plantio direto. **Revista Cientista**, Cruz Alta, v. 1, n. 1, p. 9-13, 1999.

SANGOI, L. et al. Volatilização de N-NH₃ em decorrência da forma de aplicação de uréia, manejo de resíduos e tipo de solo, em laboratório. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 4, p. 687-692, 2003.

SARAHWAT, K. L. Factor affecting nitrification in soils. **Communications in Soils Science and Plant Analysis**, New York, v. 39, p. 1436-1446, 2008.

SCIVITTARO, W. B. et al. Perdas de nitrogênio por volatilização de amônia e resposta do arroz irrigado à aplicação de ureia tratada com o inibidor de urease NBPT. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 6, p. 1283-1289, 2010.

SEXTON, B. T. et al. Optimizing nitrogen and irrigation inputs for corn based on nitrate leaching and yield on a coarse-textured soil. **Journal of Environmental Quality**, Madson, v. 25, p. 983-992, 1996.

SILVA, A. J. et al. Perdas de amônia por volatilização proveniente da uréia aplicada a solos dos trópicos úmidos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 19, n. 1, p. 141-144, 1995.

SILVA, L. S.; CAMARGO, F. A. O.; CERETTA, C. A. Composição da fase sólida orgânica do solo. In: MEURER, E. J. (Ed.). **Fundamentos de Química do Solo**. Porto Alegre: Evangraf, 2010. p. 266.

SILVA, V. R.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Densidade do solo, atributos químicos e sistema radicular do milho afetados pelo pastejo e manejo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 24, p. 191-199, 2000.

SINGH, M.; YADAV, D. S.; KUMAR, V. Leaching and transformation of urea in dry and wet soils as affected by irrigation water. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 81, n. 3 p. 411-420, 1984.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. **Cerrado**: Correção do solo e adubação. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2002. 416 p.

SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. A. Adubação com nitrogênio. In: SOUSA, D. M. G.; LOBATO, E. (Ed.). **Cerrado**: correção do solo e adubação. Brasília: Embrapa Cerrados, 2004. p. 129-146.

SOUZA, S. R.; FERNANDES, M. S. Nitrogênio. In: FERNANDES, M. S. (Ed.). **Nutrição mineral de plantas**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2006. p. 215-252.

SPARKS, D. L. **Environmental soil chemistry**. San Diego: Academic Press, 1995. 267 p.

STEVENSON, F. J. Origen and distribution of nitrogen in soil. In: STEVENSON, F. J. (Ed.). **Nitrogen in agricultural soils**. Madison: Soil Science Society of America, 1982. p. 1-14.

STRECK, E. V. et al. **Solos do Rio Grande do Sul**. 2 ed. Porto Alegre: EMATER - RS / UFRGS, 2008. 222 p.

STROMBERGER, J. A.; TSAI, C. Y.; HUBER, D. M. Interactions of potassium with nitrogen and their influence on growth and yield potential in maize. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 17, n. 1, p. 19-37, 1994.

SUHET, A. R.; PERES, J. R. R.; VARGAS, M. A. T. Nitrogênio. In: GOEDERT, W. L. (Ed.). **Solos dos cerrados: tecnologia e estratégias de manejo**. Planaltina: Embrapa, 1986. p. 119-144.

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

TERRY, D. L.; MCCANTS, C. B. Quantitative prediction of leaching in field soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 34, n. 2, p. 271-276, 1970.

TISDALE, S. L. et al. **Soil fertility and fertilizers**. 5 ed. New York: MacMilan Publishing, 1993. 634 p.

TRIVELIN, P. C. O.; FRANCO, H. C. J. Adubação nitrogenada e a sustentabilidade de agrossistemas. In: FILHO, O. K.; MAFRA, A. L.; GATIBONI, L. C. (Eds.). **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2011. p. 193-219.

VARGAS, L. K.; SCHOLLES, D. Nitrogênio da biomassa microbiana, em solo sob diferentes sistemas de manejo, estimado por métodos de fumigação. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, Viçosa, v. 22, n. 3, p. 411-417, 1998.

VILLAS BÔAS, R. L.; BÜLL, L. T.; FERNANDES, D. M. Fertilizantes em fertirrigação. In: FOLLEGATTI, M. V. (Ed.). **Fertirrigação: citros, flores, hortaliças**. Guaíba: Agropecuária, 1999. p. 293-319.

VOLKWEISS, G. J. Química da acidez dos solos. In: SEMINÁRIO SOBRE CORRETIVOS DA ACIDEZ DO SOLO, 2., 1989, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria: Editora UFSM, 1989. p.7-38.

WARNCKE, D.; BARBER, S. Ammonium and nitrate uptake by corn (*Zea mays* L.) as influenced by nitrogen concentration and NH_4^+ / NO_3^- ratio. **Agronomy Journal**, Madison, v. 65, n. 6, p. 950-953, 1973.

WILD, A. Nitrate leaching under bare fallow at a site in northern Nigeria. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 23, n. 3, p. 315-324, 1972.

WORTMANN, C. **Agricultural nitrogen management for water quality protection in the midwest**. Lincoln: Heartland regional water coordination initiative, 2006. 32 p.

XU, Q. F.; TSAI, C. L.; TSAI, C. Y. Interaction of potassium with the form and amount of nitrogen nutrition on growth and nitrogen uptake of maize. **Journal of Plant Nutrition**, New York, v. 15, n. 1, p. 23-33, 1992.

YIBIRIN, H.; JOHNSON, J. W.; ECKERT, D. J. No-till corn production as affected by mulch, potassium placement, and soil exchangeable potassium. **Agronomy Journal**, Madison, v. 85, n. 3, p. 639-644, 1993.

ZIGLIO, C. M.; MIYAZAWA, M.; PAVAN, M. A. Formas orgânicas e inorgânicas de mobilização do cálcio no solo. **Brazilian Archives of Biology and Technology**, Curitiba, v. 42, n. 2, p. 257-262, 1999.

8. APÊNDICES

Apêndice 1. Análises da variância para os atributos químicos do solo na primeira época de amostragem.

Variável: pH (H₂O)

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	0.018607	0.009304	0.242	0.8052
IRRIGA	1	0.469393	0.469393	12.208	0.0730
Erro 1	2	0.076896	0.038448		
MANEJO	2	1.574402	0.787201	17.023	0.0013
IRRIGA*MANEJO	2	0.444902	0.222451	4.810	0.0425
Erro 2	8	0.369952	0.046244		
CAMADA	5	2.970096	0.594019	67.185	0.0000
Erro 3	10	0.088415	0.008841		
IRRIGA*CAMADA	5	0.112941	0.022588	1.628	0.1699
MANEJO*CAMADA	10	0.539787	0.053979	3.889	0.0006
IRRIGA*MANEJO*CAMADA	10	0.585531	0.058553	4.219	0.0003
Erro 4	50	0.69393	0.013879		
Total corrigido	107	7.944852			

Variável: amônio

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	3.87223	1.936115	0.193	0.8384
IRRIGA	1	65.62922	65.62922	6.533	0.1250
Erro 1	2	20.09245	10.04623		
MANEJO	2	1725.837	862.9183	93.715	0.0000
IRRIGA*MANEJO	2	840.3482	420.1741	45.632	0.0000
Erro 2	8	73.66334	9.207918		
CAMADA	5	1394.879	278.9759	80.499	0.0000
Erro 3	10	34.6559	3.46559		
IRRIGA*CAMADA	5	1052.638	210.5276	35.104	0.0000
MANEJO*CAMADA	10	1235.192	123.5192	20.596	0.0000
IRRIGA*MANEJO*CAMADA	10	593.0785	59.30785	9.889	0.0000
Erro 4	50	299.8631	5.997261		
Total corrigido	107	7339.749			

Variável: nitrato

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	2.87768	1.43884	15.463	0.0607
IRRIGA	1	38.62841	38.62841	415.124	0.0024
Erro 1	2	0.186106	0.093053		
MANEJO	2	3583.555	1791.778	985.907	0.0000
IRRIGA*MANEJO	2	445.1284	222.5642	122.464	0.0000
Erro 2	8	14.53912	1.817389		
CAMADA	5	1227.18	245.436	332.785	0.0000
Erro 3	10	7.375209	0.737521		
IRRIGA*CAMADA	5	145.8536	29.17072	10.774	0.0000
MANEJO*CAMADA	10	1200.544	120.0544	44.340	0.0000
IRRIGA*MANEJO*CAMADA	10	569.3637	56.93637	21.028	0.0000
Erro 4	50	135.3796	2.707592		
Total corrigido	107	7370.611			

Variável: calcio

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	0.035207	0.017604	0.086	0.9210
IRRIGA	1	4.0368	4.0368	19.678	0.0472
Erro 1	2	0.410289	0.205144		
MANEJO	2	0.16668	0.08334	0.258	0.7785
IRRIGA*MANEJO	2	1.730439	0.865219	2.682	0.1284
Erro 2	8	2.580526	0.322566		
CAMADA	5	38.20111	7.640221	144.758	0.0000
Erro 3	10	0.527793	0.052779		
IRRIGA*CAMADA	5	2.220611	0.444122	4.221	0.0028
MANEJO*CAMADA	10	1.787787	0.178779	1.699	0.1071
IRRIGA*MANEJO*CAMADA	10	1.22525	0.122525	1.164	0.3365
Erro 4	50	5.261385	0.105228		
Total corrigido	107	58.18387			

Variável: magnésio

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	0.015556	0.007778	0.122	0.8915
IRRIGA	1	0.018148	0.018148	0.284	0.6474
Erro 1	2	0.127785	0.063893		
MANEJO	2	0.028289	0.014144	0.649	0.5482
IRRIGA*MANEJO	2	0.717963	0.358981	16.461	0.0015
Erro 2	8	0.174459	0.021807		
CAMADA	5	4.5739	0.91478	45.112	0.0000
Erro 3	10	0.202778	0.020278		
IRRIGA*CAMADA	5	0.34873	0.069746	2.504	0.0423
MANEJO*CAMADA	10	0.463711	0.046371	1.665	0.1158
IRRIGA*MANEJO*CAMADA	10	0.505993	0.050599	1.817	0.0817
Erro 4	50	1.392689	0.027854		
Total corrigido	107	8.57			

Variável: potássio

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	667.1188	333.5594	2.296	0.3034
IRRIGA	1	453.2552	453.2552	3.120	0.2194
Erro 1	2	290.5947	145.2973		
MANEJO	2	2791.261	1395.63	4.992	0.0392
IRRIGA*MANEJO	2	4118.117	2059.059	7.365	0.0153
Erro 2	8	2236.586	279.5732		
CAMADA	5	49640.59	9928.119	268.209	0.0000
Erro 3	10	370.1634	37.01634		
IRRIGA*CAMADA	5	1087.547	217.5093	1.937	0.1047
MANEJO*CAMADA	10	4781.23	478.123	4.258	0.0003
IRRIGA*MANEJO*CAMADA	10	1464.579	146.4579	1.304	0.2542
Erro 4	50	5615.058	112.3012		
Total corrigido	107	73516.1			

Apêndice 2. Análises da variância para os atributos químicos do solo na segunda época de amostragem.

Variável: pH (H₂O)

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	0.15405	0.077025	1.050	0.4879
IRRIGA	1	0.042801	0.042801	0.583	0.5249
Erro 1	2	0.14678	0.07339		
MANEJO	2	1.780206	0.890103	22.755	0.0005
IRRIGA*MANEJO	2	0.488569	0.244284	6.245	0.0232
Erro 2	8	0.312937	0.039117		
CAMADA	5	2.333119	0.466624	36.359	0.0000
Erro 3	10	0.128339	0.012834		
IRRIGA*CAMADA	5	0.263794	0.052759	3.531	0.0082
MANEJO*CAMADA	10	0.746983	0.074698	5.000	0.0001
IRRIGA*MANEJO*CAMADA	10	0.259487	0.025949	1.737	0.0983
Erro 4	50	0.747028	0.014941		
Total corrigido	107	7.404092			

Variável: amônio

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	3.141874	1.570937	1.693	0.3713
IRRIGA	1	94.17336	94.17336	101.489	0.0097
Erro 1	2	1.85583	0.927915		
MANEJO	2	143.6816	71.8408	79.057	0.0000
IRRIGA*MANEJO	2	50.69222	25.34611	27.892	0.0002
Erro 2	8	7.26973	0.908716		
CAMADA	5	238.5513	47.71026	106.676	0.0000
Erro 3	10	4.472426	0.447243		
IRRIGA*CAMADA	5	188.7963	37.75927	69.640	0.0000
MANEJO*CAMADA	10	513.9161	51.39161	94.783	0.0000
IRRIGA*MANEJO*CAMADA	10	251.6113	25.16113	46.405	0.0000
Erro 4	50	27.11014	0.542203		
Total corrigido	107	1525.272			

Variável: nitrato

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	0.127674	0.063837	0.120	0.8928
IRRIGA	1	2.285223	2.285223	4.296	0.174
Erro 1	2	1.063785	0.531893		
MANEJO	2	792.0986	396.0493	529.376	0.0000
IRRIGA*MANEJO	2	92.88487	46.44243	62.077	0.0000
Erro 2	8	5.985152	0.748144		
CAMADA	5	1023.069	204.6138	402.378	0.0000
Erro 3	10	5.085115	0.508511		
IRRIGA*CAMADA	5	86.88656	17.37731	29.055	0.0000
MANEJO*CAMADA	10	448.8555	44.88555	75.048	0.0000
IRRIGA*MANEJO*CAMADA	10	455.8215	45.58215	76.212	0.0000
Erro 4	50	29.90467	0.598093		
Total corrigido	107	2944.068			

Variável: cálcio

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	0.266991	0.133495	0.373	0.7281
IRRIGA	1	0.171204	0.171204	0.479	0.5605
Erro 1	2	0.715024	0.357512		
MANEJO	2	0.541785	0.270893	0.552	0.5964
IRRIGA*MANEJO	2	5.950052	2.975026	6.059	0.0250
Erro 2	8	3.928096	0.491012		
CAMADA	5	43.90267	8.780535	165.633	0.0000
Erro 3	10	0.53012	0.053012		
IRRIGA*CAMADA	5	3.489863	0.697973	8.265	0.0000
MANEJO*CAMADA	10	9.870393	0.987039	11.687	0.0000
IRRIGA*MANEJO*CAMADA	10	2.186681	0.218668	2.589	0.0130
Erro 4	50	4.222635	0.084453		
Total corrigido	107	75.77552			

Variável: magnésio

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	0.043646	0.021823	0.310	0.7635
IRRIGA	1	0.087837	0.087837	1.247	0.3803
Erro 1	2	0.140869	0.070434		
MANEJO	2	0.005524	0.002762	0.043	0.9578
IRRIGA*MANEJO	2	0.91748	0.45874	7.203	0.0163
Erro 2	8	0.509496	0.063687		
CAMADA	5	3.016374	0.603275	39.413	0.0000
Erro 3	10	0.153065	0.015306		
IRRIGA*CAMADA	5	0.32923	0.065846	3.500	0.0086
MANEJO*CAMADA	10	0.91252	0.091252	4.851	0.0001
IRRIGA*MANEJO*CAMADA	10	0.500387	0.050039	2.66	0.0110
Erro 4	50	0.940591	0.018812		
Total corrigido	107	7.557019			

Variável: potássio

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	398.265	199.1325	2.975	0.2516
IRRIGA	1	1211.963	1211.963	18.104	0.0510
Erro 1	2	133.8916	66.94578		
MANEJO	2	17639.54	8819.77	27.802	0.0003
IRRIGA*MANEJO	2	994.4727	497.2364	1.567	0.2665
Erro 2	8	2537.873	317.2341		
CAMADA	5	9906.944	1981.389	26.283	0.0000
Erro 3	10	753.8714	75.38714		
IRRIGA*CAMADA	5	1681.036	336.2072	4.856	0.0011
MANEJO*CAMADA	10	12253.73	1225.373	17.699	0.0000
IRRIGA*MANEJO*CAMADA	10	2375.932	237.5932	3.432	0.0017
Erro 4	50	3461.639	69.23279		
Total corrigido	107	53349.16			

Apêndice 3. Análises da variância para as características agronômicas do milho.

Variável: rendimento de matéria seca na parte aérea

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	2.608811	1.304406	0.345	0.7436
IRRIGA	1	0.772939	0.772939	0.204	0.6956
Erro 1	2	7.566144	3.783072		
MANEJO	2	112.7779	56.38894	24.506	0.0004
IRRIGA*MANEJO	2	0.131211	0.065606	0.029	0.9720
Erro 2	8	18.40791	2.300989		
Total corrigido	17	142.2649			

Variável: quantidade de nitrogênio acumulado na parte aérea no espigamento

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	4267.519	2133.76	0.184	0.8443
IRRIGA	1	669.4141	669.4141	0.058	0.8323
Erro 1	2	23137.04	11568.52		
MANEJO	2	140286.8	70143.39	18.781	0.0010
IRRIGA*MANEJO	2	3415.356	1707.678	0.457	0.6486
Erro 2	8	29878.94	3734.868		
Total corrigido	17	201655			

Variável: rendimento de grãos

FV	GL	SQ	QM	Fc	Pr>Fc
BLOCO	2	4.246678	2.123339	1.321	0.4309
IRRIGA	1	0.70805	0.70805	0.440	0.5752
Erro 1	2	3.2151	1.60755		
MANEJO	2	139.5757	69.78784	86.365	0.0000
IRRIGA*MANEJO	2	2.3803	1.19015	1.473	0.2854
Erro 2	8	6.464422	0.808053		
Total corrigido	17	156.5902			