

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

**TEORES DE AMÔNIO E NITRATO NO SOLO E DESEMPENHO AGRONÔMICO  
DO MILHO EM FUNÇÃO DE REGIMES HÍDRICOS, DOSES E ÉPOCAS DE  
APLICAÇÃO DE NITROGÊNIO EM COBERTURA**

Natan Henrique Ferrari Pagliarini  
Engenheiro Agrônomo/UFSM

Dissertação apresentada com um dos requisitos  
À obtenção do Grau de Mestre em Fitotecnia  
Ênfase Fisiologia e Manejo Vegetal

Porto Alegre (RS), Brasil  
Fevereiro de 2016

### CIP - Catalogação na Publicação

Pagliarini, Natan Henrique Ferrari  
TEORES DE AMÔNIO E NITRATO NO SOLO E DESEMPENHO  
AGRONÔMICO DO MILHO EM FUNÇÃO DE REGIMES HÍDRICOS,  
DOSES E ÉPOCAS DE APLICAÇÃO DE NITROGÊNIO EM  
COBERTURA./ Natan Henrique Ferrari Pagliarini. -- 2016.  
117 f.

Orientador: Paulo Regis Ferreira da Silva.

Dissertação (Mestrado) -- Universidade Federal  
do Rio Grande do Sul, Faculdade de Agronomia,  
Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Porto  
Alegre, BR-RS, 2016.

1. Milho. 2. Nitrato. 3. Parcelamento do  
nitrogênio. I. Silva, Paulo Regis Ferreira da,  
orient. II. Título.

NATAN HENRIQUE FERRARI PAGLIARINI  
Bacharel em Agronomia - UFSM

## **DISSERTAÇÃO**

Submetida como parte dos requisitos  
para obtenção do Grau de

### **MESTRE EM FITOTECNIA**

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

Aprovado em: 26.02.2016  
Pela Banca Examinadora

Homologado em: 19.04.2016  
Por

PAULO REGIS FERREIRA DA SILVA  
Orientador - PPG Fitotecnia

SIMONE MUNDSTOCK JAHNKE  
Coordenadora do Programa de  
Pós-Graduação em Fitotecnia

CHRISTIAN BREDEMEIER  
PPG Fitotecnia/UFRGS

IBANOR ANGHINONI  
PPG Ciência do Solo/UFRGS

LUÍS SANGOI  
PPG Agronomia  
UDESC/SC

PEDRO ALBERTO SELBACH  
Diretor da Faculdade de  
Agronomia

## DEDICATÓRIA

Aos meus pais e à toda a minha família,  
pelo incentivo constante para o  
cumprimento de mais essa etapa.

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço em primeiro lugar ao professor Paulo Regis Ferreira da Silva, incansável, amigo e muito paciente, responsável por minha formação científica nesses dois anos de convivência, exemplo de pessoa e profissional.

Aos colegas da pós-graduação Matheus Barreto Maass, Joaquim Faraco Rodrigues, Laís Corrêa Miozzo, Silmara da Luz Correia e Guilherme Borba Menezes, aos bolsistas de iniciação científica Crithian Richetti, Andrei Marafon, José Antônio Selestino Severo Alves, João Pedro Machado Felin, pela ajuda na realização do trabalho e, sobretudo, pela amizade que levo para a vida.

Aos professores Ibanor Anghinoni e Christian Bredemeier pelo convívio, ensinamentos e imensa ajuda nesses dois anos de convivência.

Ao aluno de doutorado Fernando Arnuti pela imensa ajuda nas atividades de laboratório e nas análises estatísticas.

Aos colegas do PPG-Fitotecnia, pelo agradável convívio durante o curso.

Aos funcionários da Estação Experimental Agronômica, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, um agradecimento mais que especial por todo o suporte técnico e auxílio para a condução do trabalho no campo.

Ao técnico de laboratório Fábio Berndt e aos demais professores do Departamento de Plantas de Lavoura, pelos ensinamentos e amizades.

E, é claro, agradeço aos meus familiares pelo apoio e incentivo nas minhas realizações. Em especial, à minha irmã Natiele e aos meus pais Jussára e Leocir Pagliarini.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq), pelo apoio financeiro.

# TEORES DE AMÔNIO E NITRATO NO SOLO E DESEMPENHO AGRONÔMICO DO MILHO EM FUNÇÃO DE REGIMES HÍDRICOS, DOSES E ÉPOCAS DE APLICAÇÃO DE NITROGÊNIO EM COBERTURA<sup>1</sup>

Autor: Natan Henrique Ferrari Pagliarini

Orientador: Paulo Regis Ferreira da Silva

## RESUMO

O manejo do nitrogênio (N) é considerado um dos mais complexos. Diante disso, estratégias de manejo que visam otimizar seu uso e minimizar perdas, devem ser consideradas. Com isso, os objetivos deste trabalho foram avaliar a) os teores de amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) e nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ) nas diferentes camadas de solo em função de manejo da irrigação e dose de nitrogênio ao longo do ciclo de desenvolvimento do milho e b) o efeito do parcelamento da adubação nitrogenada em cobertura, sob diferentes doses de N e disponibilidade hídrica, sobre o desempenho agronômico do milho em um Argissolo. O experimento foi conduzido em dois anos agrícolas, 2013/14 e 2014/15, em Eldorado do Sul-RS. O delineamento experimental utilizado foi de blocos casualizados, dispostos em parcelas subdivididas. Na parcela principal foram alocados os manejos da irrigação, que consistiram da aplicação de uma quantidade total de 160 mm de água, sendo uma de 80 mm aos oito dias após a aplicação da primeira dose da adubação nitrogenada e uma, também de 80 mm, 18 dias após, e de uma testemunha sem aplicação dessa quantidade de água. Esses tratamentos foram considerados, respectivamente, com e sem excesso hídrico. Na subparcela foi alocado os manejos da adubação nitrogenada, que constaram da aplicação de três doses, 100, 200 e 400  $\text{kg ha}^{-1}$  de N. A aplicação do N foi de forma única em cobertura no milho (estádio  $V_{3-4}$ , da escala de Ritchie *et al.* (1993) e parcelada em duas vezes, sendo metade no estágio  $V_{3-4}$  e metade no estágio  $V_{9-10}$ . Uma testemunha sem aplicação de N em cobertura foi incluída. Para avaliar os teores de N do solo foram realizadas cinco coletas de solo durante o ciclo de desenvolvimento do milho, em quatro camadas: 0-10; 10-20; 20-30 e 30-40 cm, apenas em três doses de N e que foram aplicadas em uma só vez (0, 200 e 400  $\text{kg ha}^{-1}$ ). A aplicação de um excesso hídrico reduz os teores de amônio e nitrato do solo, principalmente na maior dose de N aplicada (400  $\text{kg ha}^{-1}$ ) e quando o milho é semeado em setembro. O teor de  $\text{NH}_4^+$  no solo foi semelhante ao de  $\text{NO}_3^-$ , nas mesmas coletas e camadas do solo avaliadas, em ambos os manejos da irrigação. Doses maiores que 200  $\text{kg ha}^{-1}$  de N não é recomendado o parcelamento da adubação nitrogenada.

---

<sup>1</sup>Dissertação de Mestrado em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil (117p.) Fevereiro, 2016.

# AMMONIUM AND NITRATE LEVELS IN SOIL AND AGRONOMIC PERFORMANCE OF CORN IN FUNCTION OF WATER REGIMENS, DOSES AND NITROGEN APPLICATION TIMING COVER<sup>1</sup>

Author: Natan Henrique Ferrari Pagliarini

Adviser: Paulo Regis Ferreira da Silva

## ABSTRACT

The management of nitrogen (N) is considered one of the most complex in agriculture. Therefore, management strategies to optimize their use and minimize losses should be considered. Thus, the objectives of this study were to evaluate a) the content of ammonium ( $\text{NH}_4^+$ ) and nitrate ( $\text{NO}_3^-$ ) in the different layers of soil, associated with the irrigation management and nitrogen dose along the cycle of corn development b) the effect of splitting the nitrogen topdressing fertilization under different doses of N and water availability on the agronomic performance of corn in a Ultisol. The experiment was conducted in two agricultural years 2013/14 and 2014/15, in Eldorado do Sul, RS, Brazil. The experimental design used was randomized blocks with split plots. In main plots was allocated the managements of irrigation, which consisted of applying a total quantity of 160 mm of water. The first 80 mm were applied after eight days of the first dose of nitrogen fertilization and the remaining 80 mm, 18 days after the first dose. A control without application of this amount of water was also tested. These treatments were considered, respectively, with and without water excess. In the subplot, was allocated the managements of nitrogen fertilizer, which consisted of three different doses: 100, 200 and 400 kg ha<sup>-1</sup> of N. The application of N was in unique ways in top dressing on corn (V<sub>3-4</sub> stage, the scale of Ritchie *et al.* (1993)) and split into two times: V<sub>3-4</sub>, and V<sub>9-10</sub>. A control without nitrogen as top dressing was included. For evaluate the nitrogen levels in soil, were performed five samplings during corn development cycle, in four layers: 0-10; 10-20; 20-30 and 30-40 cm, associated with three different dose of N applied only once (0, 200 and 400 kg ha<sup>-1</sup>). The application of a water excess reduces ammonia and nitrate levels in soil, especially at the highest dose of N applied (400 kg ha<sup>-1</sup>) and when the corn is sown in September. The  $\text{NH}_4^+$  content of the soil was similar to that of  $\text{NO}_3^-$ , on the same sampling and layers of soil evaluated in both management of irrigation. Results shows that on higher doses than 200 kg ha<sup>-1</sup> of N, the parceling of nitrogen fertilization was not recommended.

---

<sup>1</sup>Master of Science Dissertations in Agronomy, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil (117p.) February 2016.

## SUMÁRIO

	Página
1 INTRODUÇÃO .....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	5
2.1 Referências bibliográficas .....	11
3 CAPÍTULO 1 - TEORES DE AMÔNIO E NITRATO EM ARGISSOLO AO LONGO DO CICLO E RENDIMENTO DE GRÃOS DE MILHO.....	16
RESUMO .....	16
ABSTRACT .....	17
3.1 INTRODUÇÃO.....	18
3.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	20
3.2.1 Caracterização do ambiente.....	20
3.2.2 Procedimento experimental .....	21
3.3.3 Análise estatística.....	24
3.4 RESULTADOS.....	25
3.4.1 N-mineral no solo .....	25
3.4.2 Rendimento de grãos .....	30
3.5 DISCUSSÃO.....	31
3.6 CONCLUSÕES.....	34
3.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	35
4 CAPÍTULO 2 – TEORES DE AMÔNIO E NITRATO NO PERFIL DE UM ARGISSOLO E CARACTERÍSTICAS AGRONÔMICAS RELACIONADAS AO DESENVOLVIMENTO DE MILHO.....	39
RESUMO .....	39
ABSTRACT.....	40
4.1 INTRODUÇÃO .....	41
4.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	43
4.2.1 Caracterização do ambiente.....	43
4.2.2 Procedimento experimental .....	44
4.2.3 Análise estatística.....	47
4.4 RESULTADOS.....	48
4.4.1 N-mineral do solo.....	48
4.3.2 Rendimento de grãos e parâmetros de planta.....	57
4.4 DISCUSSÃO .....	61



	Página
4.5 CONCLUSÃO .....	64
4.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....	64
5 CAPÍTULO 3 – DESEMPENHO AGRONÔMICO DO MILHO EM FUNÇÃO DO PARCELAMENTO DA ADUBAÇÃO NITROGENADA EM COBERTURA EM ARGISSOLO .....	67
RESUMO .....	67
ABSTRACT .....	68
5.1 INTRODUÇÃO .....	69
5.2 MATERIAL E MÉTODOS.....	70
5.2.1 Caracterização do ambiente.....	70
5.2.2 Procedimento experimental.....	71
5.3.3 Análise estatística.....	74
5.4 RESULTADOS.....	75
5.5 DISCUSSÃO.....	83
5.6 CONCLUSÕES.....	87
5.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	87
6 CONSIDERAÇÕES FINAIS .....	91
7 APÊNDICES .....	95
8 VITA .....	105

## RELAÇÃO DE TABELAS

Página

### CAPÍTULO 1

- 3.1 Rendimento de grãos de milho em função de três doses de N em cobertura e dois manejos da irrigação, em dois anos agrícolas. Eldorado do Sul, RS ..... 31

### CAPÍTULO 2

- 4.1 Rendimento de grãos de milho em função de três doses de N em cobertura e dois manejos da irrigação, em dois anos agrícolas. Eldorado do Sul, RS ..... 58
- 4.2 Rendimento de massa seca de milho no espigamento em função de três doses de N em cobertura e dois manejos da irrigação, em dois anos agrícolas. Eldorado do Sul, RS ..... 59
- 4.3 Teor de N na planta de milho no espigamento em função de três doses de N em cobertura e dois manejos da irrigação, em dois anos agrícolas. Eldorado do Sul, RS..... 60
- 4.4 N acumulado no espigamento em função de três doses de N em cobertura e dois manejos da irrigação, em dois anos agrícolas. Eldorado do Sul, RS ..... 61

### CAPÍTULO 3

- 5.1 Rendimento de grãos, componentes do rendimento e eficiência de uso do N (EAN) de milho irrigado em função de parcelamento da aplicação de três doses de N e de manejo da irrigação aos oito e 18 dias após a aplicação do adubo nitrogenado em cobertura. Eldorado do Sul, RS, 2013/14..... 76
- 5.2 Rendimento de massa seca, teor e quantidade de N acumulada no espigamento do milho irrigado em função de parcelamento da aplicação de três doses de N e de manejo da irrigação aos oito e 18 dias após a aplicação do adubo nitrogenado em cobertura. Eldorado do Sul, RS, 2013/14..... 77

5.3	Rendimento de grãos, componentes do rendimento e eficiência de uso do N (EAN) de milho irrigado em função de parcelamento da aplicação de três doses de N e de manejo da irrigação aos oito e 18 dias após a aplicação do adubo nitrogenado em cobertura. Eldorado do Sul, RS, 2014/15... ..	80
5.4	Rendimento de massa seca, teor e quantidade de N acumulada no espigamento do milho irrigado em função de parcelamento da aplicação de três doses de N e de manejo da irrigação aos oito e 18 dias após a aplicação do adubo nitrogenado em cobertura. Eldorado do Sul, RS, 2014/15.....	82

## RELAÇÃO DE FIGURAS

Página

### CAPÍTULO 1

- 3.1 Distribuição das precipitações pluviométricas, das irrigações e das temperaturas máximas e mínimas durante o desenvolvimento da cultura do milho, em dois anos agrícolas. Eldorado do Sul-RS. .... 23
- 3.2 Disponibilidade de nitrogênio amoniacal na camada de 0-40 cm do solo ao longo da estação de crescimento do milho sob três doses de N e dois manejos da irrigação aplicados oito e 18 dias após a adubação nitrogenada, sem excesso hídrico (a, b) e com excesso hídrico (c, d), em dois anos agrícolas. Eldorado do Sul, RS..... 27
- 3.3. Disponibilidade de nitrogênio nítrico na camada de 0-40 cm do solo ao longo da estação de crescimento do milho sob três doses de N e dois manejos da irrigação aplicados oito e 18 dias após a adubação nitrogenada, sem excesso hídrico (a, b) e com excesso hídrico (c, d), em dois anos agrícolas Eldorado do Sul, RS..... 28

### CAPÍTULO 2

- 4.1 Distribuições das precipitações pluviométricas e irrigações realizadas durante o desenvolvimento da cultura do milho, nos anos agrícolas de 2013/14 e 2014/15. Eldorado do Sul, RS. .... 46
- 4.2 Nitrogênio amoniacal no solo em função de três doses de nitrogênio em cobertura e de dois manejos da irrigação aplicados oito e 18 dias após a adubação nitrogenada, sem excesso hídrico (a;b) e com excesso hídrico (c;d) na amostragem de solo realizada 10 dias após a aplicação da adubação nitrogenada em cobertura no milho irrigado, em dois anos agrícolas. Eldorado do Sul, RS..... 50
- 4.3 Nitrogênio amoniacal no solo em função de três doses de nitrogênio em cobertura e de dois manejos da irrigação aplicados oito e 16 dias após a adubação nitrogenada, sem excesso hídrico (a;b) e com excesso hídrico (c;d) na amostragem de solo realizada 20 dias após a aplicação da adubação nitrogenada em cobertura no milho irrigado, em dois anos agrícolas. Eldorado do Sul, RS..... 51

- 4.4 Nitrogênio amoniacal no solo em função de três doses de nitrogênio em cobertura e de dois manejos da irrigação aplicados oito e 18 dias após a adubação nitrogenada, sem excesso hídrico (a;b) e com excesso hídrico (c;d) na amostragem de solo realizada 70 dias após a aplicação da adubação nitrogenada em cobertura no milho irrigado, em dois anos agrícolas. Eldorado do Sul, RS..... 52
- 4.5 Nitrogênio nítrico no solo em função de três doses de nitrogênio em cobertura e de dois manejos da irrigação aplicados oito e 18 dias após a adubação nitrogenada, sem excesso hídrico (a;b) e com excesso hídrico (c;d) na amostragem de solo realizada 10 dias após a aplicação da adubação nitrogenada em cobertura no milho irrigado, em dois anos agrícolas. Eldorado do Sul, RS..... 53
- 4.6 Nitrogênio nítrico no solo em função de três doses de nitrogênio em cobertura e de dois manejos da irrigação aplicados oito e 16 dias após a adubação nitrogenada, sem excesso hídrico (a;b) e com excesso hídrico (c;d) na amostragem de solo realizada 20 dias após a aplicação da adubação nitrogenada em cobertura no milho irrigado, em dois anos agrícolas. Eldorado do Sul, RS. .... 54
- 4.7 Nitrogênio nítrico no solo em função de três doses de nitrogênio em cobertura e de dois manejos da irrigação aplicados oito e 18 dias após a adubação nitrogenada, sem excesso hídrico (a;b) e com excesso hídrico (c;d) na amostragem de solo realizada 70 dias após a aplicação da adubação nitrogenada em cobertura no milho irrigado, em dois anos agrícolas. Eldorado do Sul, RS..... 55

### **CAPÍTULO 3**

- 5.1 Distribuição diária das precipitações pluviais e das irrigações durante o desenvolvimento da cultura do milho nos dois anos agrícolas e à normal climatológica decenal do período de 1970 a 2003, Eldorado do Sul, RS..... 73
- 5.2 Rendimento de grãos de milho em função de manejo da irrigação e de dose e parcelamento da adubação nitrogenada. Eldorado do Sul-RS, 2013/14 (a) e 2014/15 (b). .... 78
- 5.3. Eficiência de uso do N em função de manejo da irrigação e de dose e parcelamento da adubação nitrogenada. Eldorado do Sul-RS, 2013/14 (a) e 2014/15 (b). .... 79

## 1 INTRODUÇÃO

O milho é uma das principais commodities produzidas no Brasil, exercendo importante papel sócio-econômico para o país. Nos últimos anos, a demanda por esse cereal vem crescendo, necessitando, assim, de aumento na produtividade. Esse aumento está diretamente ligado às práticas de manejo, sendo o manejo do nitrogênio (N) considerado um dos mais importantes. Essa importância se deve ao fato do milho ser extremamente responsivo ao incremento da adubação nitrogenada. Além disso, por ser elemento essencial, o balanço desse nutriente afeta o crescimento e o desenvolvimento da planta, tanto da parte aérea como do sistema radicular. No entanto, quanto maior for a dose de N aplicada, maior será o potencial de perdas. Essas perdas também podem ser potencializadas devido à complexa dinâmica do nutriente no solo e pela influência das condições do ambiente, das formas e das fontes de N utilizadas.

Dentre as várias fontes nitrogenadas utilizadas na agricultura, a ureia é a mais difundida, devido a sua alta concentração de N (~44%) e a seu menor custo por unidade de N. Entretanto, a eficiência de uso do N é baixa, estando em torno de 50% (Saiz-Fernández *et al.*, 2015), em virtude das inúmeras transformações a que o N está sujeito. Apenas parte do N que é aplicado, é absorvida pelas plantas. Esse nutriente pode ser perdido do sistema solo-planta-atmosfera por processos de lixiviação, volatilização, erosão e desnitrificação. Há, ainda, uma fração que permanece no solo na forma orgânica. Isso pode provocar assincronia entre a disponibilidade do nutriente no solo e a demanda pela planta.

Entre os mecanismos de perdas destaca-se a lixiviação, que consiste na movimentação do N-mineral disponibilizado no solo para camadas mais profundas, por ação da água. Desta forma, sua absorção pelas raízes das plantas pode ser inviabilizada. A magnitude das perdas por lixiviação pode ser elevada,

especialmente quando são utilizadas altas doses de N e a cultura é cultivada em solos arenosos e sob condições de intensa precipitação. Além disso, o aumento gradual do uso de fertilizantes nitrogenados nas últimas décadas, associado à baixa eficiência de uso do N em ambientes tropicais, têm aumentado a preocupação com possíveis impactos negativos gerados ao ambiente, principalmente pelo nitrato ( $\text{N-NO}_3^-$ ). As perdas do  $\text{N-NO}_3^-$  para os lençóis freáticos, principalmente em anos com intensa precipitação, comprometem a qualidade das águas superficiais e subterrâneas, além de reduzir a disponibilidade de N para a cultura.

Dentre os fatores que potencializam a lixiviação, o regime pluviométrico a que as plantas são submetidas após a aplicação do adubo nitrogenado em cobertura, é uma importante causa de perdas. Diante disso, espera-se uma relação direta entre as perdas de N e o aumento do volume de precipitação. Outro aspecto a ser considerado em relação às perdas de N por lixiviação diz respeito ao tipo de solo em que a cultura é conduzida. Solos com textura argilosa proporcionam maior retenção do íon nitrato em relação aos com textura arenosa. Isso ocorre devido à presença de óxidos de ferro e alumínio, que interagem com o nitrato, reduzindo a sua lixiviação. Além disso, em solos com textura argilosa a lixiviação é reduzida, devido a menor percolação de água no perfil. Já em solo com textura arenosa, as perdas por lixiviação são potencializadas com o incremento da dose de nitrogênio e pelo maior movimento da água que infiltra.

Nesse sentido, estratégias de manejo que visam otimizar o uso e minimizar as perdas de N devem ser consideradas. Uma forma para aumentar a eficiência da adubação nitrogenada é o uso adequado de fontes de nitrogênio, como as de liberação controlada. Essas fontes alternativas são conhecidas por possuírem em suas formulações inibidores da enzima urease e do processo de nitrificação (transformação do amônio em nitrato). A adição desses compostos à fonte nitrogenada, que normalmente é a ureia, tem a função de retardar os processos de transformação do N no solo. Outra estratégia de manejo que tem sido utilizada para aumentar a eficiência do uso do N pela redução de perdas por lixiviação de nitrato, é o uso do parcelamento da adubação nitrogenada. O fornecimento gradual do N para planta pode aumentar a eficiência de uso do nutriente e,

consequentemente, reduzir suas perdas, principalmente em anos com alta disponibilidade hídrica para a cultura.

Uma das formas de quantificar as perdas de N por lixiviação é a mensuração de teores de amônio e nitrato na solução do solo. Nesse sentido, essa informação poderia servir de subsídio para o manejo da adubação nitrogenada em milho, para determinação de dose, forma, fonte e/ou época de aplicação de N. Dessa forma, para aumentar a eficiência agrônômica do uso do N, bem como utilizá-lo de forma mais racional visando menor impacto ambiental, o conhecimento de sua dinâmica em condições edafoclimáticas da Depressão Central no Estado do Rio Grande do Sul é importante.

Diante do exposto, elaboraram-se as seguintes hipóteses de trabalho para a presente pesquisa:

- a) A aplicação de um excesso hídrico aos oito e 18 dias após a aplicação do adubo nitrogenado acarreta em maiores perdas de nitrogênio no perfil de um Argissolo.
- b) Maiores perdas de N por lixiviação resultam em menor disponibilidade de N para as plantas e, em consequência, em menores quantidades de N acumulado na planta e rendimento de massa seca.
- c) Altos volumes de precipitação após a aplicação do adubo nitrogenado resultam em menor eficiência de uso do N e em menor rendimento de grãos de milho.
- d) O parcelamento da aplicação do adubo nitrogenado é uma estratégia eficiente para aumentar a eficiência de uso do N pela planta e reduzir perdas para o ambiente na cultura do milho, especialmente sob ocorrência de elevada precipitação pluvial e elevada dose de N aplicada em cobertura.

Para testar essas hipóteses, foi conduzido um experimento a campo, durante dois anos agrícolas, com os seguintes objetivos:



a) Avaliar os teores de amônio e nitrato em um Argissolo ao longo do ciclo de desenvolvimento do milho em função de três doses de N e da aplicação ou não de um excesso hídrico após o manejo da adubação nitrogenada e seus efeitos sobre o rendimento de grãos de milho.

b) Monitorar os teores de amônio e nitrato no perfil de um Argissolo em diferentes épocas de coleta do solo sob três doses de N e da aplicação ou não de um excesso hídrico após o manejo da adubação nitrogenada e seus efeitos sobre a absorção de N pelas plantas e o rendimento de grãos de milho.

c) Avaliar o efeito do parcelamento da adubação nitrogenada em cobertura sob três doses de N e da aplicação ou não de um excesso hídrico após o manejo da adubação nitrogenada, sobre a absorção e a eficiência de uso de N pela planta e o rendimento de grãos de milho.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

O milho é uma das culturas com maior importância econômica e social no mundo, por ser utilizado tanto na alimentação humana quanto na animal e como matéria-prima para a indústria. No cenário mundial, o Brasil é o terceiro maior produtor de milho. Entretanto a produtividade média ainda é baixa, correspondendo a 5,40 Mg ha<sup>-1</sup> (Conab, 2015). Em experimentos desenvolvidos na região sul do país, os máximos rendimentos de grãos obtidos foram de 17,4 Mg ha<sup>-1</sup> (Menegati *et al.*, 2012) e de 18,6 t ha<sup>-1</sup> (Schmitt *et al.*, 2012), respectivamente nos estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina. Considerando que o rendimento médio de grãos na região Sul do Brasil é de 6,15 Mg ha<sup>-1</sup>, há uma grande lacuna no rendimento de grãos de milho.

Alguns fatores contribuem para obtenção destes baixos níveis de produtividade de milho. Entre eles, as condições meteorológicas desfavoráveis durante o ciclo em algumas regiões e a utilização de variedades ou híbridos não adaptados a determinadas condições edafoclimáticas. Outras causas da baixa produtividade são o manejo inadequado do arranjo de plantas e o incorreto uso de fertilizantes, principalmente os nitrogenados (Meira, 2006).

O nitrogênio (N) é o nutriente mineral exigido em maior quantidade pelas plantas de milho, sendo o que mais frequentemente limita o rendimento de grãos. Sua aplicação afeta drasticamente os componentes de rendimento da cultura do milho. Além disso, sua aplicação pode interferir em diversas características relacionadas ao crescimento e ao desenvolvimento da planta, as quais direta ou indiretamente afetam sua produtividade (Cobucci, 1991). Diante disso, o manejo do nitrogênio é considerado complexo. Essa complexidade é devida às inúmeras transformações do N no solo, mediadas pela ação de microrganismos e pelas condições ambientais.

Dentre as várias fontes nitrogenadas utilizadas na agricultura, a ureia é a mais difundida, devido a sua alta concentração de N (~44%) e a seu menor custo por unidade de N. Entretanto, a eficiência de uso do N é baixa, estando em torno de 50% (Lara Cabezas *et al.*, 2000; Saiz-Fernández *et al.*, 2015; Franco *et al.*, 2011). Apenas parte do N que é aplicado, é absorvido pelas plantas. O N pode ser perdido do sistema solo-planta-atmosfera pelos processos de lixiviação, volatilização, erosão e desnitrificação. Há, ainda, uma fração que permanece no solo na forma orgânica (Vargas, 2010), podendo provocar assincronia entre sua disponibilidade no solo e a demanda pela planta. A magnitude dessas perdas pode ser determinada pela forma de aplicação, pelo manejo e pela fonte do adubo nitrogenado a ser utilizada (Meira, 2006).

A dinâmica do N no solo está associada às práticas de manejo, às condições meteorológicas vigentes durante o ciclo da cultura e às características intrínsecas do solo. Uma das principais formas de perdas N para o ambiente é por desnitrificação, que é o processo de redução de nitrato, por ação de microrganismos anaeróbicos, para formas gasosas, como óxido nitroso ( $N_2O$ ) e  $N_2$  molecular, que se perdem para a atmosfera por volatilização (Metcalf & Eddy, 2004). A maior parte do N desnitrificado está na forma de  $N_2$ , embora uma pequena parcela seja liberada como  $N_2O$ . Na condição de ausência de  $O_2$  no solo, microrganismos anaeróbicos usam o nitrato como receptor de elétrons da cadeia respiratória (Ernani, 2008). Embora a magnitude deste processo seja maior em solos com drenagem deficiente, com baixa disponibilidade de oxigênio, seus efeitos também são verificados em solos não saturados, mais especificamente em sítios anaeróbicos localizados no interior de seus agregados. Além da presença de  $O_2$ , o processo de desnitrificação varia com o sistema de cultivo. No sistema plantio direto, geralmente, há maiores perdas de N por desnitrificação em relação ao convencional, com revolvimento do solo. Isto se deve à presença de restos culturais na superfície do solo, o que aumenta a umidade do solo e fornece mais carbono para o sistema (Cantarella, 2007).

Outro mecanismo de perda de N do solo é o que ocorre por volatilização de amônia ( $NH_3$ ). Ela ocorre inicialmente pela hidrólise da ureia pela enzima urease, resultando na formação do carbonato de amônio, que é instável e reage formando

$\text{NH}_3$ . Este íon, por ser um gás, pode ser perdido para atmosfera quando não incorporado ao solo (Tasca, 2011). A urease é a enzima-chave dessa reação, sendo controlada pela atividade microbiana no solo (Costa *et al.*, 2003). Em experimentos de campo, há registro de perdas de até 78% do N por volatilização aplicado via fertilizante de cobertura (Lara Cabezas *et al.*, 1997; Fontoura & Bayer, 2010).

Dentre as formas de minimizar as perdas de N por volatilização de amônia, a utilização de inibidores da urease apresenta grande potencial. Inibidores de urease são geralmente utilizados em fontes de N que apresentam alto potencial de perdas por volatilização, como a ureia, e em situações nas quais o manejo não permite a incorporação do adubo ao solo, como no sistema plantio direto (Cantarella *et al.*, 2008). A adição de inibidor de urease à ureia permite maior tempo para que o fertilizante seja incorporado ao solo pela precipitação pluvial, sem que ocorram perdas significativas de N (Menezes, 2015). Outra forma para minimizar essas perdas é a incorporação do adubo nitrogenado ao solo pela chuva ou pela irrigação (Menezes, 2015).

Outro importante mecanismo de perda de N no solo é por lixiviação. Estima-se que 10% a 30% do N adicionado aos solos seja perdido por lixiviação (Meisinger *et al.*, 2008). Esse processo consiste na perda de N, preferencialmente na forma de nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), com o movimento da água em profundidade (Peng *et al.*, 2015). Desta forma, o N pode ficar fora da zona de absorção de raízes e com potencialidade de chegar ao lençol freático, contaminando as águas subterrâneas (Quemada *et al.*, 2013). O ânion  $\text{NO}_3^-$  é a forma de N mais absorvida pelas raízes das plantas. Para que o íon nitrato seja disponibilizado e absorvido pelas plantas é necessário que este seja convertido à forma inorgânica pelo processo de mineralização. Assim, solos adubados com N na forma inorgânica estarão, em curto prazo, com disponibilidade de nitrogênio na forma de  $\text{NO}_3^-$  (Cantarella, 2007).

No entanto, o N do solo também é perdido na forma de amônio. A ordem observada para movimento e perda por lixiviação é  $\text{NO}_3^- > \text{NH}_4^+ > \text{K}^+ > \text{H}_2\text{PO}_4^-$  (Silva, 2004). A textura e a mineralogia do solo influenciam a mobilidade e a distribuição desses nutrientes. Os solos oxídicos possuem maior capacidade de

adsorção que os caulíníticos. Essa adsorção, em geral, diminui com o aumento do pH, incrementando a concentração de nitrato no lixiviado. Isso indica que solos oxidícos apresentam maior risco de contaminação de lençóis freáticos com nitrato do que os caulíníticos, em razão da maior densidade de cargas positivas no intervalo de pH (5-7) comumente encontrado nos solos característicos de regiões tropicais (Qafoku *et al.*, 2000).

Em condições aeróbicas, a transformação do N amoniacal em  $\text{NO}_3^-$  ocorre em duas etapas. A primeira é a nitrificação, realizada por bactérias do gênero *Nitrosomonas*, que transformam o amônio em nitrito. Já a segunda etapa é realizada por bactérias do gênero *Nitrobacter*, que transformam o nitrito em nitrato (Moreira & Siqueira, 2002). Na presença de  $\text{O}_2$  (ambiente aeróbico) e com altas temperaturas, a oxidação do N amoniacal para  $\text{NO}_3^-$  ocorre num período curto de aproximadamente 15 a 30 dias (Arnuti, 2014). Além disso, o uso de doses elevadas do nutriente, a condução da cultura em solos arenosos e sob condições de elevada precipitação são alguns fatores que contribuem para o movimento do N no perfil do solo e que podem potencializar as perdas de N por lixiviação (Jaynes & Colvin, 2006; Cantarella & Marcelino, 2008).

O regime pluviométrico ao qual as plantas são submetidas após a aplicação do adubo nitrogenado em cobertura também é uma importante causa de perdas de N por lixiviação. Há uma relação direta entre o aumento de perdas e o volume de precipitação, principalmente em solos de países de clima tropical e subtropical (Ernani, 2008). Outro aspecto a ser considerado em relação às perdas de N por lixiviação diz respeito ao tipo de solo em que a cultura é conduzida. Solos com textura argilosa proporcionam maior retenção do íon nitrato em relação aos com textura arenosa (Lelis Neto, 2008). Além disso, no solo o nitrato é altamente suscetível à competição com outros ânions inorgânicos pelos sítios de adsorção, tais como o  $\text{PO}_4^{3-}$ , o  $\text{SO}_4^{2-}$ , o  $\text{H}_2\text{BO}_3^-$  e o  $\text{Cl}^-$  (Cahn *et al.*, 1992; Alleoni *et al.*, 2009), o que pode potencializar, ainda mais, as perdas de  $\text{NO}_3^-$  em profundidade.

Para obter elevadas produtividades, a disponibilidade de N deve estar sincronizada com o requerimento da cultura em quantidade, forma e tempo. Assim, num programa racional de adubação para aumentar a eficiência de uso e

mitigar perdas de N por lixiviação devem ser considerados alguns fatores. Dentre estes, destacam-se o sistema de cultivo (convencional ou plantio direto), a cultura anterior (fluxo de resíduos), os métodos, as épocas de aplicação e as fontes de adubo nitrogenado utilizadas (Santos *et al.*, 2010).

Em relação ao sistema de cultivo, a utilização do sistema plantio direto (SPD) criou novas perspectivas para melhoria da qualidade do solo. Do ponto de vista da fertilidade, houve aumento da disponibilidade de nutrientes, motivado principalmente pelo controle da erosão, pela reciclagem de nutrientes, pela atividade biológica e pelo manejo de resíduos culturais (Acosta, 2009).

A época de aplicação da adubação nitrogenada em cobertura também é um importante fator para aumentar a eficiência de uso de N. Maior aproveitamento do N pode ser obtido com a sincronização entre as aplicações e o período de maior demanda do nutriente pela planta (Amado *et al.*, 2002; Silva *et al.*, 2005). As plantas de milho já apresentam alta demanda por N a partir do estágio de quatro a cinco folhas expandidas. Essa é a fase em que tem início o processo de diferenciação floral, que irá originar os primórdios da panícula estágio (V<sub>6-7</sub>) e da espiga estágio (V<sub>10-11</sub>), bem como definir o potencial de produtividade (Ernani *et al.*, 2005), sendo um período crucial para que a produtividade dos grãos não seja afetada negativamente.

Dentre as estratégias para atender a demanda da planta e mitigar as perdas de N por lixiviação, o parcelamento da aplicação do adubo nitrogenado em cobertura é outra ferramenta importante a ser utilizada. Os maiores benefícios são encontrados principalmente em anos com ocorrência de precipitações elevadas, que favorecem o movimento de íons, como o nitrato, para as camadas mais profundas do solo (Fancelli, 2000), e sob altas doses de N aplicadas (Sexton *et al.*, 1996).

Outro aspecto a ser considerado é o uso de fontes de N que apresentem liberação controlada deste nutriente. Dentre estas, destacam-se o uso de inibidores do processo da nitrificação, como a nitrapirina (NI), a dicianodiamida (DCD) e o 3,4 dimetilpirazolfosfato (DMPP). Desde os anos de 1970, tem-se dado ênfase à utilização de inibidores sintéticos da nitrificação. Eles atuam desacelerando o processo de transformação de amônia (NH<sub>3</sub>) em nitrato. Com

isso, o N permanece na forma amoniacal, que é menos sujeito à lixiviação, ficando preservado no solo por mais tempo (Trenkel, 2010). Eles atuam na primeira fase da nitrificação interferindo na atividade das bactérias do gênero *Nitrosomonas*, sendo capazes de retardar a oxidação do amônio a nitrito. Dessa forma, a segunda fase da nitrificação não ocorre, pois falta nitrito para ser oxidado a nitrato. Os inibidores de nitrificação afetam a ação da enzima amônia monoxigenase (AMO), que é uma proteína da membrana das bactérias do gênero *Nitrosomonas*. No processo de oxidação catalítica, a amônia (NH<sub>3</sub>) se liga ao sítio ativo da enzima e se oxida à hidroxalamina. Entretanto, os inibidores de nitrificação têm afinidade pelo mesmo sítio ativo da enzima e, por princípio de competição, se ligam a este, inibindo o processo por mais ou menos tempo, dependendo da estabilidade do composto (McCarty, 1999). No entanto, a eficiência de uso dos inibidores da nitrificação está associada também ao tipo de solo. Solos com características texturais mais argilosos não demonstraram efeito do uso de inibidores da nitrificação em comparação a aplicação de fontes de N sem uso de inibidores (Mota *et al.*, 2015). Essa resposta pode estar associada à menor infiltração de água no perfil do solo e, conseqüentemente à menor movimentação do N. Com isso, o N permanece no solo por mais tempo, reduzindo, assim, o efeito do inibidor da nitrificação. Além disso, a maior atividade microbiana encontrada em solos argilosos também pode reduzir o efeito do inibidor da nitrificação devido à maior degradação do composto no solo.

Uma nova linha de pesquisa relacionada a inibidores da nitrificação, denominada de “inibição biológica da nitrificação (IBN)” também têm sido estudada (Subbarao *et al.*, 2012a). Este processo consiste na manipulação genética de plantas para que, via liberação de exsudatos pelas raízes, ocorra a inibição da nitrificação no solo. Estes exsudatos foram encontrados em raízes de sorgo (sorgoleone) e brachiaria (brachialactone) (Subbarao *et al.*, 2007). Em laboratório, estes compostos reduzem a transformação do amônio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) em nitrato, demonstrando eficiência em inibir o processo de nitrificação na rizosfera de plantas (Subbarao *et al.*, 2012b).

Os inibidores biológicos da nitrificação agem sobre as enzimas relacionadas à fase de transformação do amônio em nitrato, mais especificamente

no sítio ativo das enzimas amônia monooxigenase (AMO) e hidroxalamina oxidoreductase (HAO), inibindo os processos de nitrificação. Outra possível ação dos inibidores biológicos está relacionada à interrupção da transferência de elétrons da HAO para a ubiquinona e o citocromo, responsáveis por gerar potencial redox (NADPH), que é essencial para as funções metabólicas das bactérias do gênero *Nitrosomonas* (Subbarao *et al.*, 2007).

O uso da IBN pode aumentar a eficiência agrônômica de uso do N, aumentando sua recuperação e reduzindo perdas associadas à nitrificação e à desnitrificação (Subbarao *et al.*, 2012a). Plantas de espécies da família das poáceas, sob sistemas de savana com potencial biológico de inibir o processo de nitrificação, produziram duas vezes mais biomassa do que aquelas que não possuíam essa capacidade de inibição (Lata, 1999; Boudsocq *et al.*, 2012). Isso se deve à maior eficiência de uso do N e, conseqüentemente, à redução de perdas, principalmente por lixiviação de nitrato, pela liberação controlada de N no solo. No entanto, estudos mais detalhados sobre a eficiência da utilização de IBN devem ser realizados, com o objetivo de avaliar o potencial de uso dessa nova tecnologia em plantas cultivadas.

O N é o nutriente mais limitante na cultura do milho. Assim, estratégias que visem aumentar a eficiência de uso e mitigar perdas desse nutriente por lixiviação devem ser analisadas. Além disso, a quantificação de perdas ao longo do perfil do solo, principalmente por lixiviação, de íons como o amônio e nitrato, será muito útil para tomada de decisão em relação à época, à forma de aplicação, à fonte utilizada e à dose de N a ser aplicada. Com isso, estratégias de manejo relacionadas ao uso do N podem ser utilizadas de forma mais específica, otimizando sua eficiência de uso e minimizando possíveis contaminações ambientais.

## 2.1 Referências bibliográficas

ACOSTA, J.A.A. **Dinâmica do nitrogênio sob sistema plantio direto e parâmetros para o manejo da adubação nitrogenada no milho**. 2009. 200 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.



ALLEONI, L. R. F. et al. Química dos solos altamente intemperizados. In: MELO, V. F., ALLEONI, L. R. F. **Química e Mineralogia do Solo – Parte II – Aplicações**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009. p.381-448.

AMADO, T.J.C.; 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, p.241-248, 2002.

ARNUTI, F. **Dinâmica do nitrogênio em Argissolo em função de irrigação e adubação nitrogenada do milho em plantio direto**. 2014. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

BOUDSOCQ, S. et al. Plant preference for ammonium versus nitrate: a neglected determinant of ecosystem functioning? **American Naturalist**, Chicago, v. 180, p.60–69, 2012.

CAHN, M.D. et al. Nitrate sorption in the profile of acid soil. **Plant and Soil**, The Hague, v. 143, p.179-183, 1992.

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

CANTARELLA, H.; MARCELINO, R. Fontes alternativas de nitrogênio para a cultura do milho. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n.122, p.12-14, 2008.

COBUCCI, T. **Efeitos de doses e épocas de aplicação em cobertura do adubo nitrogenado no consórcio milho-feijão**. 1991. 94 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1991.

CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento de safra brasileira: grãos**. Primeiro levantamento. Brasília, 2015. 141 p.

COSTA, M.C.G.; VITTI, G.C.; CANTARELLA, H. Volatilização de N- NH<sub>3</sub> de fontes nitrogenadas em cana-de-açúcar colhida sem despalha a fogo. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 27, p.631-637, 2003.

ERNANI, P.R. et al. A forma de aplicação da ureia e dos resíduos vegetais afeta a disponibilidade de nitrogênio. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.35, n.2, p.360-365, 2005.

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

FANCELLI, A.L.; DOURADO NETO, D. **Produção de milho**. Guaíba: E. Agropecuária, 2000. 360 p.

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

FRANCO, H.C.J. et al. Nitrogen sugarcane derived from fertilizer under Brazilian field conditions. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.121, p. 29-41, 2011.

JAYNES, D.B.; COLVIN, T.S. Corn yield and nitrate loss in subsurface drainage from midseason nitrogen fertilizer application. **Agronomy Journal**, Madison, v.98, n.6, p.1479-1487, 2006.

LARA CABEZAS, W. A. R.; KORNDORFER, G. H.; MOTTA, S. A. Volatilização de N- NH<sub>3</sub> 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, 1997.

LARA CABEZAS, W.A.R. et al. Balanço da adubação nitrogenada sólida e fluida de cobertura na cultura de milho, em sistema plantio direto no Triângulo Mineiro (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, p.363-376, 2000.

LATA, J.C. et al. Stable coexistence of contrasted nitrification statuses in a wet tropical savanna ecosystem. **Functional Ecology**, Lexington, v. 13, p. 762–768, 1999.

LELIS NETO, J. A. **Monitoramento de componentes químicos da vinhação aplicados em diferentes tipos de solo**. 2008. 80 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade de São Paulo, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2008.

MCCARTY, G.W. Modes of action of nitrification inhibitors. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 29, n. 1, p. 1-9, 1999.

MEIRA, F.A. **Fontes e modos de aplicação do nitrogênio na cultura do milho**. 2006. 46 f. Tese (Doutorado) – Faculdade de Engenharia, Universidade Estadual Paulista, Ilha Solteira, 2006.

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. (Agronomy Monograph, 49).

MENEGATI, G. B. et.al. Adequação da Densidade de Plantas de Híbridos de Milho à Disponibilidade Hídrica e à Época de Semeadura. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 29., 2012, Águas de Lindóia. **Anais...** Campinas: Instituto Agronômico, 2012. p.1813-1820.

MENEZES, B. G. **Estratégias de manejo para minimizar perdas de N por volatilização e aumentar o rendimento de grãos de milho irrigado**. 2015. 75 f.

Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

METCALF, L.; EDDY, H. **Wastewater engineering treatment and reuse**. 4. ed. New York: McGrawHill, 2003. 1819 p.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. 2 ed. Lavras: UFLA, 2006. 29p.

MOTA, M. R. et al. Fontes estabilizadas de nitrogênio como alternativa para aumentar o rendimento de grãos e a eficiência de uso do nitrogênio pelo milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 2, p. 512–522, 2015.

PENG, X. et al. A Laboratory Evaluation of Ammonia Volatilization and Nitrate Leaching following Nitrogen Fertilizer Application on a Coarse-Textured Soil. **Agronomy Journal**, Madison, v. 107, n. 3, p. 871 , 2015.

QAFOKU, N.P.; SUMNER, M.E.; RADCLIFFE, D.E. Anion transport in columns of variable charge subsoils: nitrate and chloride. **Journal Environmental Quality**, Madison, v.29, p.484-493, 2000.

QUEMADA, M. et al. Meta-analysis of strategies to control nitrate leaching in irrigated agricultural systems and their effects on crop yield. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 174, 1-10, 2013.

SAIZ-FERNÁNDEZ, I. et al. High nitrate supply reduces growth in maize, from cell to whole plant. **Journal of Plant Physiology**, New York, v.173, n.1, p.120-129, 2015.

SANTOS, M.M. et al. Épocas de aplicação de nitrogênio em cobertura na cultura do milho em plantio direto, e alocação do nitrogênio (15N) na planta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, n.4, p.1185-1194, 2010.

SCHMITT, A. et al. Densidade de plantas como estratégia para aumentar o rendimento de grãos de milho. In: CONGRESSO NACIONAL DE MILHO E SORGO, 29., 2012, Águas de Lindóia. **Anais...** Campinas: Instituto Agronômico, 2012. p.2009-2015.

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

SILVA, A.S. **Movimentação de amônio, nitrato, potássio e fósforo aplicados por fertirrigação em Latossolos**. 2004. 58p. (Tese) Mestrado – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2004.

SILVA, E. C. et al. Épocas e formas de aplicação de nitrogênio no milho sob plantio direto Em Solo De Cerrado. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**,

Viçosa, v. 29, n. 3, p. 725–733 , 2005.

SUBBARAO G.V. et al. Biological nitrification inhibition (BNI) activity in sorghum and its characterization. **Plant and Soil**, The Hague, v.367, p.627-637, 2012.

SUBBARAO G.V. et al. Biological nitrification inhibition – a novel strategy to regulate nitrification in agricultural systems. **Advances in Agronomy**, San Diego, v.114, p.249–302, 2012a.

SUBBARAO, G.V. et al. BERRY - Biological nitrification inhibition (BNI)—Is it a widespread phenomenon? **Plant and Soil**, The Hague, v.294, p.5–18, 2007.

TASCA, F. A. et al. Volatilização de amônia do solo após a aplicação de ureia convencional ou com inibidor de urease. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, p.493-502, 2011.

TRENKEL, M.E. **Slow- and controlled-release and stabilized fertilizers: an option for enhancing nutrient use efficiency in agriculture**. Paris: Paris International Fertilizer Industry Association, 2010. 167p.

VARGAS, V. P. **Manejo da adubação nitrogenada na recuperação de estresses em milho**. 2010. 145 f. Dissertação. (Mestrado) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2010.

### 3 CAPÍTULO 1 - TEORES DE AMÔNIO E NITRATO EM ARGISSOLO AO LONGO DO CICLO E RENDIMENTO DE GRÃOS DE MILHO

#### RESUMO

O milho é uma das culturas mais exigentes em fertilizantes, principalmente os nitrogenados. O nitrogênio (N) apresenta uma complexa dinâmica de transformações no solo que pode resultar em perdas para camadas mais profundas do solo. Essas perdas podem afetar a disponibilidade de N para a planta e, conseqüentemente, o rendimento de grãos. Diante disso, os objetivos deste trabalho foram a) monitorar em um Argissolo a variação dos teores de amônio e nitrato ao longo do ciclo de desenvolvimento do milho em função de três doses de N e da aplicação ou não de um excesso hídrico após o manejo da adubação nitrogenada e b) avaliar o efeito desses dois fatores no rendimento de grãos. O experimento foi conduzido em dois anos agrícolas, 2013/14 e 2014/15. O delineamento experimental utilizado foi de blocos casualizados, dispostos em parcelas subdivididas, com três repetições. Nas parcelas principais foram testados dois manejos da irrigação: com aplicação de uma quantidade total de 160 mm de água por irrigação de aspersão em dois momentos, sendo metade aos oito dias após a aplicação do adubo nitrogenado em cobertura e metade aos 18 dias após e sem aplicação dessa lâmina de água. Esses tratamentos foram considerados, respectivamente, com e sem excesso hídrico. Nas subparcelas foram testadas três doses de N: 0, 200 e 400 kg ha<sup>-1</sup> aplicadas em cobertura em uma só vez no estágio V<sub>3-4</sub>, da escala de Ritchie *et al.* (1993). Já nas subsubparcelas foi testado o fator tempo, referente às coletas de solos que foram cinco no total. A aplicação de um excesso hídrico reduz os teores de amônio e nitrato do solo, principalmente na maior dose de N aplicada (400 kg ha<sup>-1</sup>) e quando o milho é semeado em setembro.

### 3 CHAPTER 1 - AMMONIUM AND NITRATE LEVELS IN ULTISOL OVER THE CYCLE AND YIELD OF CORN GRAIN

#### ABSTRACT

Corn is one of the most demanding crops in fertilizers, especially the nitrogenous. Nitrogen (N) presents a complex transformations in soil, which can result in losses of nitrogen in deepest soil layers. These losses can affect the availability of N used for the plant and consequently the yield. Thus, the objectives of this study were a) monitor in a Ultisol, the variation of ammonium and nitrate levels over development cycle of corn, applied with three different doses of N and the application, or not of water excess, after management of nitrogen fertilization and b) to evaluate the effect of such factors on grain yield. The experiment was conducted in two agricultural years 2013/14 and 2014/15, in Eldorado do Sul, RS, Brazil. The experimental design used was randomized blocks with split plots. In main plots was allocated the managements of irrigation, which consisted of applying a total quantity of 160 mm of water. The first 80 mm were applied after eight days of the first dose of nitrogen fertilization and the remaining 80 mm, 18 days after the first dose. A control without application of this amount of water was also tested. These treatments were considered, respectively, with and without water excess. In the subplot, was allocated the managements of nitrogen fertilizer, which consisted of three different doses: 100, 200 and 400 kg ha<sup>-1</sup> of N. The application of N was in unique ways in top dressing on corn in V<sub>3-4</sub> stage of the scale of Ritchie *et al.* (1993). Moreover, in the sub-subplots were tested the impact of time, from five time dependent sampling of soil. The application of water excess reduces the ammonia and nitrate levels of soil, especially at the highest doses of N (400 kg ha<sup>-1</sup>) and when corn is sown in September.

### 3.1 INTRODUÇÃO

O milho é uma das culturas mais exigentes em fertilizantes, principalmente os nitrogenados. O nitrogênio (N) é um dos nutrientes mais importantes para as plantas, afetando suas funções, desde o metabolismo celular até o crescimento (Marschner & Marschner, 2012; Scheible *et al.*, 2004). O fornecimento adequado deste nutriente influencia muito os componentes de rendimento da cultura do milho. Além disto, sua aplicação pode interferir em diversas características relacionadas ao crescimento e ao desenvolvimento da planta, afetando, de forma direta ou indireta, o seu potencial produtivo (Cobucci, 1991).

No solo, o N apresenta uma dinâmica complexa de transformações, o que pode provocar assincronia entre sua disponibilidade no solo e a demanda pela planta. As principais formas de N disponíveis para as plantas são o amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) e o nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), as quais, no entanto, representam menos de 5% do N total do solo (Ernani, 2003).

A maior parte da absorção de N ocorre durante todo o ciclo vegetativo do milho (Silva *et al.*, 2005). No entanto, há relatos de que também ocorre absorção até o início do período reprodutivo (Strieder *et al.*, 2003). Nos estádios iniciais de desenvolvimento, a planta de milho tem seu sistema radicular pouco desenvolvido. Com isso, explora pequeno volume de solo, sendo necessária a aplicação de uma quantidade de nitrogênio adequada próxima às raízes para suprir suas necessidades iniciais (Ritchie *et al.*, 1993). No estágio de 10 a 11 folhas, segundo a escala de Ritchie *et al.* (1993), ocorre a diferenciação da espiga, estando sendo determinado o número de óvulos por espiga e, potencialmente, o número de grãos, independentemente de ciclo de híbrido e de época de semeadura (Forsthofer *et al.*, 2004). Assim, a ocorrência de deficiência

de N nesta fase pode reduzir o potencial produtivo (Schröder *et al.*, 2000) e, conseqüentemente, o rendimento final de grãos.

Dentre as fontes nitrogenadas utilizadas na agricultura a ureia é a mais difundida, devido à sua alta concentração de N (~44%) e a seu menor custo por unidade de nutriente. Entretanto, a eficiência de uso do N é baixa, estando em torno de 50% (Lara Cabezas *et al.*, 2000; Saiz-Fernández *et al.*, 2015), sendo o restante perdido pelos processos de volatilização, desnitrificação e lixiviação, ou imobilizado temporariamente na biomassa microbiana do solo (Fontoura & Bayer, 2006).

Um dos principais processos de perdas de N é a lixiviação, que consiste na movimentação do N-mineral ( $\text{NH}_4^+$  e  $\text{NO}_3^-$ ) disponibilizado no solo para camadas mais profundas por ação da água (Maharjan *et al.*, 2014), inviabilizando, desta forma, sua absorção pelas raízes das plantas (Ernani, 2008). A lixiviação ocorre devido à predominância de cargas negativas na camada superficial do solo e à baixa interação química, principalmente do  $\text{NO}_3^-$ , com os minerais do solo, que faz com que esse ânion seja facilmente perdido, acompanhando o movimento descendente da água que percola no perfil do solo (Cantarella & Marcelino, 2008).

A magnitude das perdas por lixiviação pode ser elevada, especialmente quando são utilizadas altas doses de N e a cultura é cultivada em solos arenosos e sob condições de intensa precipitação (Cantarella & Marcelino, 2008; Ernani, 2008; Jaynes & Colvin, 2006). Além disso, o aumento gradual do uso de fertilizantes nitrogenados nas últimas décadas, associado à baixa eficiência de uso do N em ambientes tropicais, têm aumentado a preocupação com possíveis impactos negativos gerados ao ambiente. As perdas de N- $\text{NO}_3^-$  para os lençóis freáticos, principalmente em anos com intensa precipitação (Aita; Giacomini, 2008; Cerri *et al.*, 2009), comprometem a qualidade das águas superficiais e subterrâneas, além de reduzir a disponibilidade de N para a cultura do milho (Quemada *et al.*, 2013).

Diante dessa situação, é possível ajustar-se as entradas de N no sistema de acordo com as necessidades das culturas, sincronizando, assim, a demanda e a oferta, como uma maneira de diminuir o risco de perdas de N durante a estação de crescimento (Arregui & Quemada, 2006; Shaffer & Delgado, 2002). Nesse



contexto, há a necessidade de constante aperfeiçoamento nos sistemas de recomendação de adubação. Para tanto, é importante considerar a dinâmica de disponibilidade de N ao longo do ciclo da cultura em função dos aportes de N oriundos da adição de fertilizantes minerais num dado ambiente de produção, com vistas à redução de impactos ambientais e ao aumento na eficiência de seu uso (Hickmann *et al.*, 2014).

Em função desses aspectos, espera-se que: a) a aplicação de um excesso hídrico após a aplicação do adubo nitrogenado resulta em maiores perdas de amônio e nitrato no perfil do solo e, conseqüentemente menor rendimento de grãos e b) as perdas de N por lixiviação aumentam com precipitações mais intensas e com a aplicação de maiores doses de N.

Para testar essas hipóteses, esse trabalho foi conduzido a campo, durante dois anos agrícolas, com os objetivos de a) monitorar os teores de amônio e nitrato em um Argissolo ao longo do ciclo de desenvolvimento do milho em função de três doses de N e da aplicação ou não de um excesso hídrico após a aplicação do adubo nitrogenado e b) avaliar o efeito desses dois fatores no rendimento de grãos de milho.

## **3.2 MATERIAL E MÉTODOS**

### **3.2.1 Caracterização do ambiente**

A pesquisa foi conduzida a campo durante os anos agrícolas 2013/14 e 2014/15, em Eldorado do Sul, região ecoclimática da Depressão Central do Estado do RS. 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 (Bergamaschi *et al.*, 2013).

O solo da área experimental é classificado como Argissolo Vermelho Distrófico típico (Streck *et al.*, 2008). Caracteriza-se por ter textura franco-arenosa no horizonte superficial e ser moderadamente profundo e moderadamente drenado. No primeiro ano, as amostras de solo foram coletadas em maio de 2013

e apresentaram os seguintes resultados: argila: 240 g kg<sup>-1</sup>; pH (água): 5.1; P: 24 mg dm<sup>-3</sup> (Mehlich-1); K: 178 mg dm<sup>-3</sup> (Mehlich-1); MO: 16 g kg<sup>-1</sup> e CTC: 9,2 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, conforme Tedesco *et al.* (1995). No segundo ano, as amostras de solo foram coletadas em maio de 2014 e apresentaram os seguintes valores: argila: 250 g kg<sup>-1</sup>; pH (água): 5.1; P: 34 mg dm<sup>-3</sup> (Mehlich-1); K: 146 mg dm<sup>-3</sup> (Mehlich-1); MO: 20 g kg<sup>-1</sup> e CTC: 9,6 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>.

A área experimental está sendo cultivada em sistema de plantio direto há 25 anos. No verão, é feita rotação entre as culturas de soja e milho. No outono-inverno de 2013 e 2014 foi utilizada como cobertura de solo a aveia branca (*Avena sativa*). Essa cobertura de inverno foi dessecada mediante a aplicação do herbicida glifosato no início do mês de setembro e de agosto, 30 dias antes da semeadura do milho, respectivamente nos anos agrícolas 2013/14 e 2014/15.

### 3.2.2 Procedimento experimental

Para avaliar os teores de amônio e nitrato no solo ao longo da estação de crescimento da planta foi utilizado o delineamento experimental de blocos casualizados, dispostos em parcelas subdivididas, no esquema de medidas repetidas no tempo, com três repetições. Nas parcelas principais, foram testados dois manejos da irrigação: com aplicação de uma quantidade total de 160 mm de água por irrigação de aspersão em dois momentos, sendo metade aos oito dias e outra metade 18 dias após a aplicação do adubo nitrogenado em cobertura, e sem aplicação dessa lâmina de água. Esses tratamentos foram considerados, respectivamente, como “sem” e “com excesso hídrico”. O excesso hídrico de 160 mm aplicado foi baseado em estudos anteriores (Arnuti, 2014). Nas subparcelas foram testadas três doses de N: 0, 200 e 400 kg ha<sup>-1</sup> aplicadas em cobertura, em uma única vez, no estágio V<sub>3-4</sub>, da escala de Ritchie *et al.* (1993). Já nas subsubparcelas foi testado o fator tempo, referentes às cinco coletas de solos realizadas durante o ciclo da cultura: no dia anterior a semeadura (1<sup>a</sup>), com o objetivo de estabelecer os teores iniciais de amônio (NH<sub>4</sub><sup>+</sup>) e nitrato (NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) remanescentes no solo; aos 10 dias após a aplicação do adubo nitrogenado, no estágio V<sub>5-6</sub> (2<sup>a</sup>); aos 18 e aos 20 dias após a aplicação do adubo nitrogenado, respectivamente nos anos agrícolas 2013/14 e 2014/15 (3<sup>a</sup>); no estágio R<sub>1</sub>

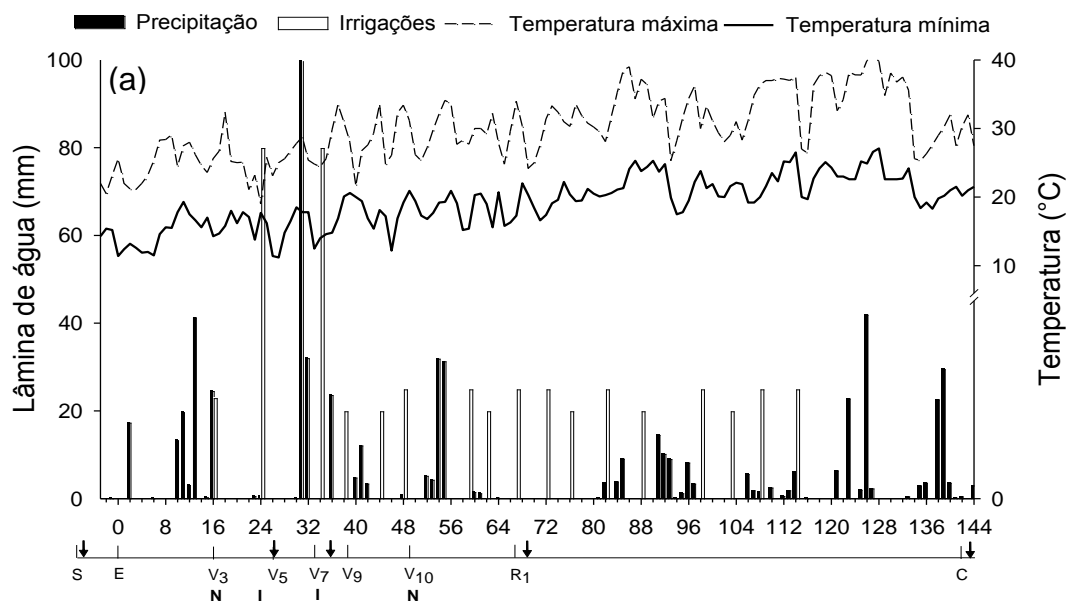
(espigamento) (4<sup>a</sup>) e aos 20 e aos três dias após a colheita do milho (5<sup>a</sup>), respectivamente nos anos agrícolas 2013/14 e 2014/15.

Para avaliar o rendimento de grãos, utilizou-se o delineamento de blocos casualizados, dispostos em parcelas subdivididas, com quatro repetições. Nas parcelas principais, foram testados os dois manejos da irrigação, como descrito anteriormente, e nas subparcelas foram testados as doses de N aplicadas em cobertura, de forma única, no estágio V<sub>3-4</sub>.

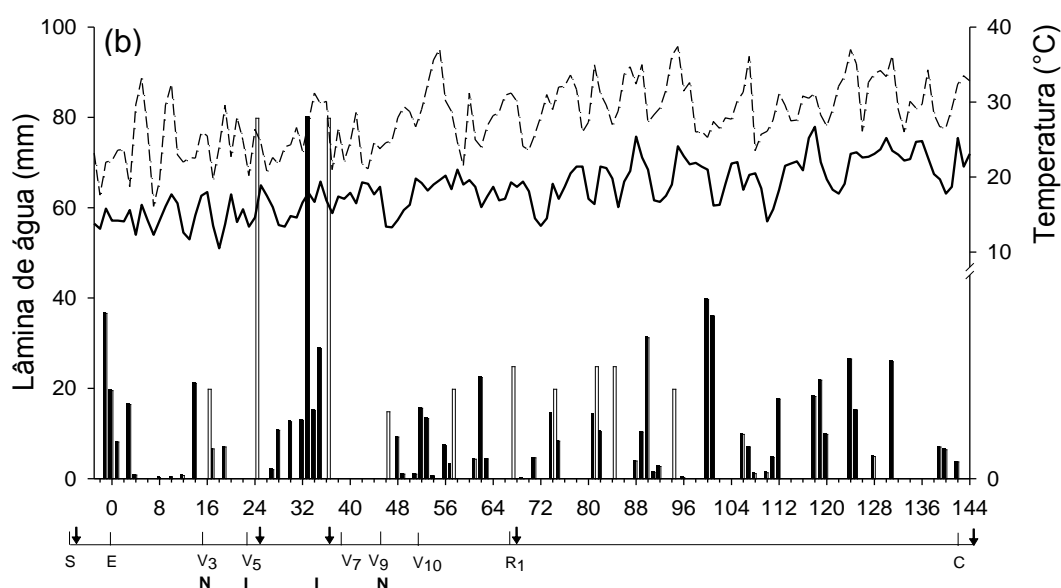
O milho foi semeado em 02 de outubro de 2013 e em 05 de setembro de 2014, em sistema de semeadura direta. Nos dois anos, o híbrido reagente foi o Pioneer 1630H, de ciclo hiperprecoce, da empresa Pioneer Sementes, com tecnologia Bt. A adubação na semeadura constou da aplicação de 30, 180 e 90 kg ha<sup>-1</sup> de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O, respectivamente. Utilizou-se a ureia com inibidor da urease, com tecnologia Agrotain, como fonte de adubo nitrogenado em cobertura, para reduzir as perdas por volatilização. Para incorporar o N na solução do solo, procedeu-se uma irrigação de 20 mm de água, uniforme para todos os tratamentos, logo após a realização da aplicação de N, nos dois anos. A densidade de plantas utilizada foi de 90.000 plantas ha<sup>-1</sup>, com espaçamento entrelinhas de 0,5 m. Plantas daninhas, doenças e pragas foram controladas para não interferirem no rendimento de grãos.

Nos dois anos de condução do experimento, foi realizada irrigação complementar durante o ciclo de desenvolvimento da cultura, sempre que detectada a ocorrência de déficit hídrico. A frequência das irrigações foi determinada com base no monitoramento da umidade volumétrica do solo, através do sensor Hidro Farm, que utiliza a tecnologia ISAF (impedância do solo em alta frequência) (Gomes *et al.*, 2013). Considerou-se a umidade volumétrica de 20 % como limite inferior, ou seja, efetuou-se a irrigação sempre que foi atingido este valor nos sensores. Na Figura 3.1, são apresentados os dados de precipitação pluvial registrada na área experimental e das irrigações complementares. Além disso, são especificadas as datas de realização das coletas de solo (↓), da aplicação da adubação nitrogenada (N) em cobertura e da aplicação dos excessos hídricos (I), nos tratamentos correspondentes.

### Ano agrícola 2013/14



### Ano agrícola 2014/15



#### Estádio de desenvolvimento<sup>1</sup>/Dias após a emergência (DAE)

FIGURA 3.1. Distribuição das precipitações pluviométricas, das irrigações e das temperaturas máximas e mínimas durante o desenvolvimento da cultura do milho, em dois anos agrícolas. Eldorado do Sul-RS. (N) indica aplicação da adubação nitrogenada, (I) indica aplicação dos dois excessos hídricos (80 mm) e (↓) indica as coletas de solo, Eldorado do Sul, RS. <sup>1</sup>Conforme escala de Ritchie *et al.* (1993). Fonte: INMET (2015).

As determinações realizadas nos dois anos foram: teores de  $\text{NH}_4^+$  e  $\text{NO}_3^-$  ao longo da estação de crescimento da cultura e rendimento de grãos de milho.

Para determinar os teores de amônio e nitrato foram realizadas coletas de solo com auxílio de trado calador, na profundidade de 0-40 cm. Foram coletadas seis subamostras, em dois pontos centrais da subparcela, sendo duas subamostras sobre a linha de adubação e quatro subamostras laterais na entrelinha para compor uma amostra homogênea, para posterior determinação dos teores de  $\text{NH}_4^+$  e  $\text{NO}_3^-$  presentes nessa camada de solo.

As determinações de amônio e nitrato foram realizadas por meio de arraste de vapor em semimicro Kjeldhal, sendo o N-mineral extraído por solução KCl 1M, segundo Tedesco *et al.* (1995). Uma alíquota de 20 ml da solução extraída com KCl foi usada para determinação do N-mineral. Na primeira destilação, foi adicionado MgO para determinação de N- $\text{NH}_4^+$  e, posteriormente, na segunda destilação da mesma amostra, foi adicionada liga devarda para determinação de N- $\text{NO}_3^-$ . Para quantificar os teores de amônio e nitrato foi considerada como padrão a densidade do solo de  $1 \text{ g cm}^{-3}$ .

O rendimento de grãos foi estimado em área útil de  $10,0 \text{ m}^2$ , sendo expresso na umidade padrão de  $130 \text{ g kg}^{-1}$ .

### 3.3.3 Análise estatística

A análise de variância foi realizada utilizando o programa estatístico SAS (SAS Institute, 2003), conforme os seguintes modelos:

a) N-mineral ( $\text{NH}_4^+$  e  $\text{NO}_3^-$ ):

$$Y_{ijkl} = \mu + B_i + I_j + \text{erro } a_{(ij)} + N_k + I_j N_k + \text{erro } b_{(ijk)} + T_l + \text{erro } c_{(il)} + I_j T_l + N_k T_l + I_j M_k T_l + \text{erro } d_{(ijkl)}$$

onde:  $\mu$  = média geral do experimento; B = bloco; I = manejo da irrigação; N = nitrogênio (dose); T = tempo;  $i = 1,2,3$ ;  $j = 1,2$ ;  $k = 1,2,3$ ;  $l = 1,2,\dots,4$  e Erro = erro experimental.

b) Rendimento de grãos:

$$Y_{ij} = \mu + B_i + I_j + \text{erro } a_{(ij)} + N_k + I_j N_k + \text{erro } b_{(ijk)}$$

onde:  $\mu$  = média geral do experimento; B = bloco; I = manejo da irrigação; N = nitrogênio (dose); i = 1,2,3,4; j = 1,2 e k = 1,2,3 e Erro = erro experimental.

Para a comparação de médias foi utilizado o teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

### 3.4 RESULTADOS

Para melhor entendimento, a apresentação dos resultados será feita para cada ano agrícola e será dividida em três partes: inicialmente, serão descritos os dados dos regimes hídricos relativos aos anos agrícolas 2013/14 e 2014/15; em seguida, os parâmetros relacionados aos teores de N-mineral do solo e, por fim, os relativos ao rendimento de grãos de milho. O apêndice contém o resumo da análise de variância dos dados relativos aos parâmetros avaliados.

#### 3.4.1 N-mineral no solo

Para teores de amônio e de nitrato no solo houve interação tripla de manejo da irrigação, doses de N e tempo de coleta do solo, nos dois anos agrícolas. Entretanto, para melhor compreensão, os resultados serão expressos em relação a cada manejo da irrigação.

No primeiro ano (2013/14) foi registrado um acumulado de precipitação de 507 mm, durante todo o ciclo de desenvolvimento da cultura (Figura 3.1a). No entanto, esse acumulado foi distribuído de forma irregular durante esse período, o que necessitou de 15 irrigações complementares, num total de 340 mm, nos tratamentos sem excesso hídrico, e de 500 mm, nos tratamentos com excesso hídrico. Essa maior necessidade de água deveu-se à condição climática do ano, que apresentou temperaturas elevadas e períodos mais frequentes de escassez de chuvas. Neste ano, não foram observadas precipitações de elevado volume no período, exceto a ocorrência de uma precipitação de 105 mm, seis dias após aplicação do primeiro excesso hídrico de 80 mm, correspondendo a 95% da média histórica para o mês de novembro. O acumulado de água disponível (precipitação + irrigação) durante o ciclo do milho foi elevado, sendo de 847 e 1.007 mm, respectivamente nos tratamentos sem e com excesso hídrico.

Neste ano, foram observados aumentos nos teores de  $\text{N-NH}_4^+$  na segunda e terceira amostragens de solo, realizadas, respectivamente, aos 10 e 20 dias após a aplicação do adubo nitrogenado (Figura 3.2a;c). Nessas amostragens, os maiores teores foram encontrados com a aplicação da maior dose de N ( $400 \text{ kg ha}^{-1}$ ), em relação ao tratamento testemunha, sem aplicação de N e a dose de  $200 \text{ kg ha}^{-1}$ . Após o 20º dia (36 DAE), foi observado decréscimo nos teores de  $\text{N-NH}_4^+$  até o estágio de espigamento ( $R_1$ ), em todas as doses testadas. Na última coleta, realizada 20 dias após a colheita do milho, foi evidenciado um novo aumento nos teores de amônio.

Similarmente ao que ocorreu com o amônio, os maiores teores de nitrato ( $\text{N-NO}_3^-$ ) ao longo do ciclo de desenvolvimento do milho foram observados na segunda e na terceira amostragens de solo, realizadas respectivamente, aos 10 e 20 dias após a aplicação do adubo nitrogenado (Figura 3.3a;c). Esses teores também foram maiores na dose de  $400 \text{ kg ha}^{-1}$  de N, quando comparados ao tratamento testemunha e à dose de  $200 \text{ kg ha}^{-1}$ . Após o 20º dia, foi observado decréscimo nos teores de  $\text{N-NO}_3^-$  até a coleta realizada aos 20 dias após a colheita, em todas as doses testadas.

Nesse primeiro ano, os teores de  $\text{N-NH}_4^+$  (Figura 3.2a;c) e de  $\text{N-NO}_3^-$  (Figura 3.3a;c) foram muito similares em função do manejo da irrigação, independentemente de épocas de amostragem do solo e doses de N aplicadas.

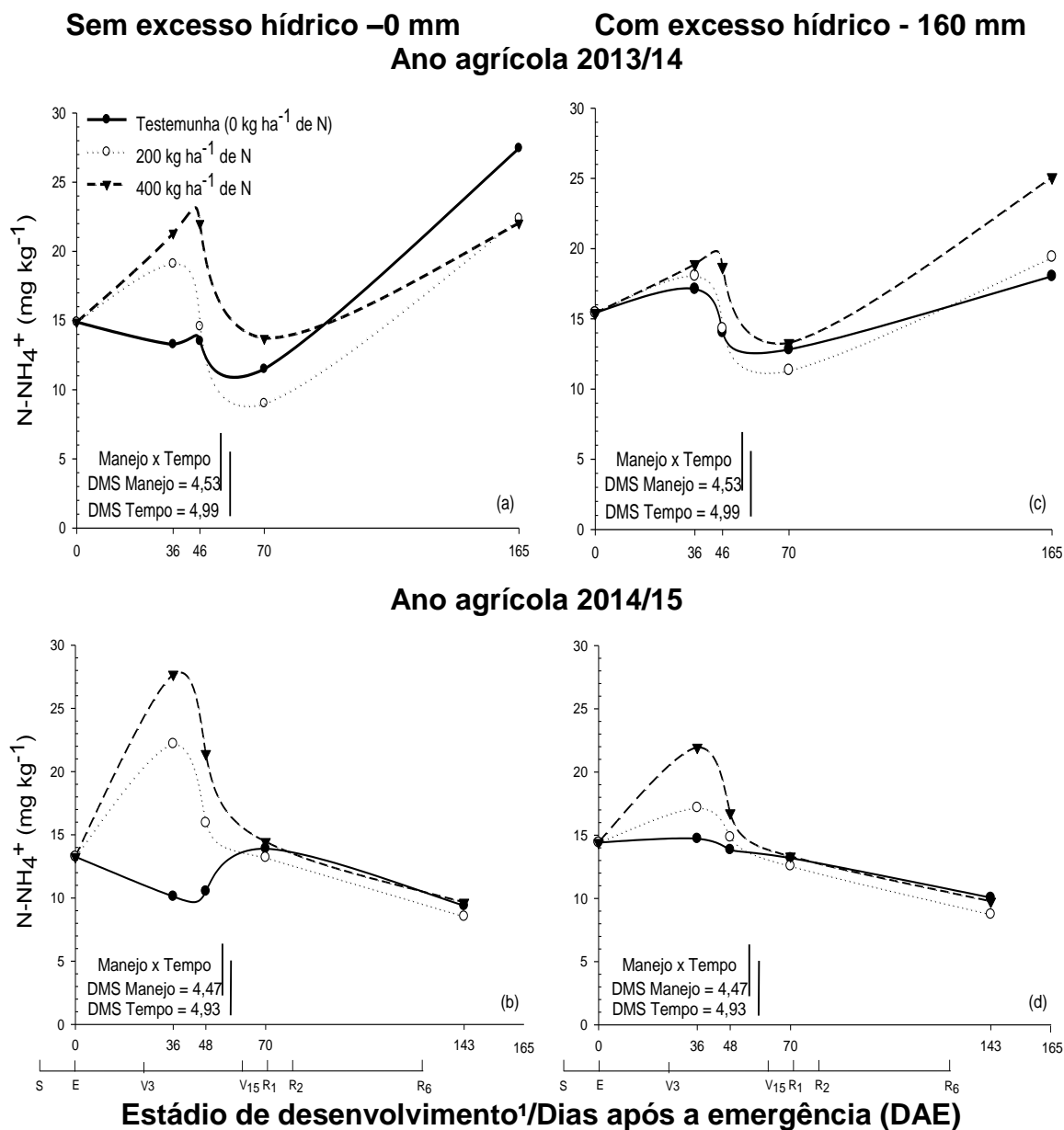


FIGURA 3.2 Disponibilidade de nitrogênio amoniacal na camada de 0-40 cm do solo ao longo da estação de crescimento do milho sob três doses de N e dois manejos da irrigação aplicados oito e 18 dias após a adubação nitrogenada, sem excesso hídrico (a, b) e com excesso hídrico (c, d), em dois anos agrícolas. Eldorado do Sul, RS. A barra vertical representa a DMS do teste de *Tukey*, com nível de 5% de significância. <sup>1</sup>Conforme escala de Ritchie *et al.* (1993)



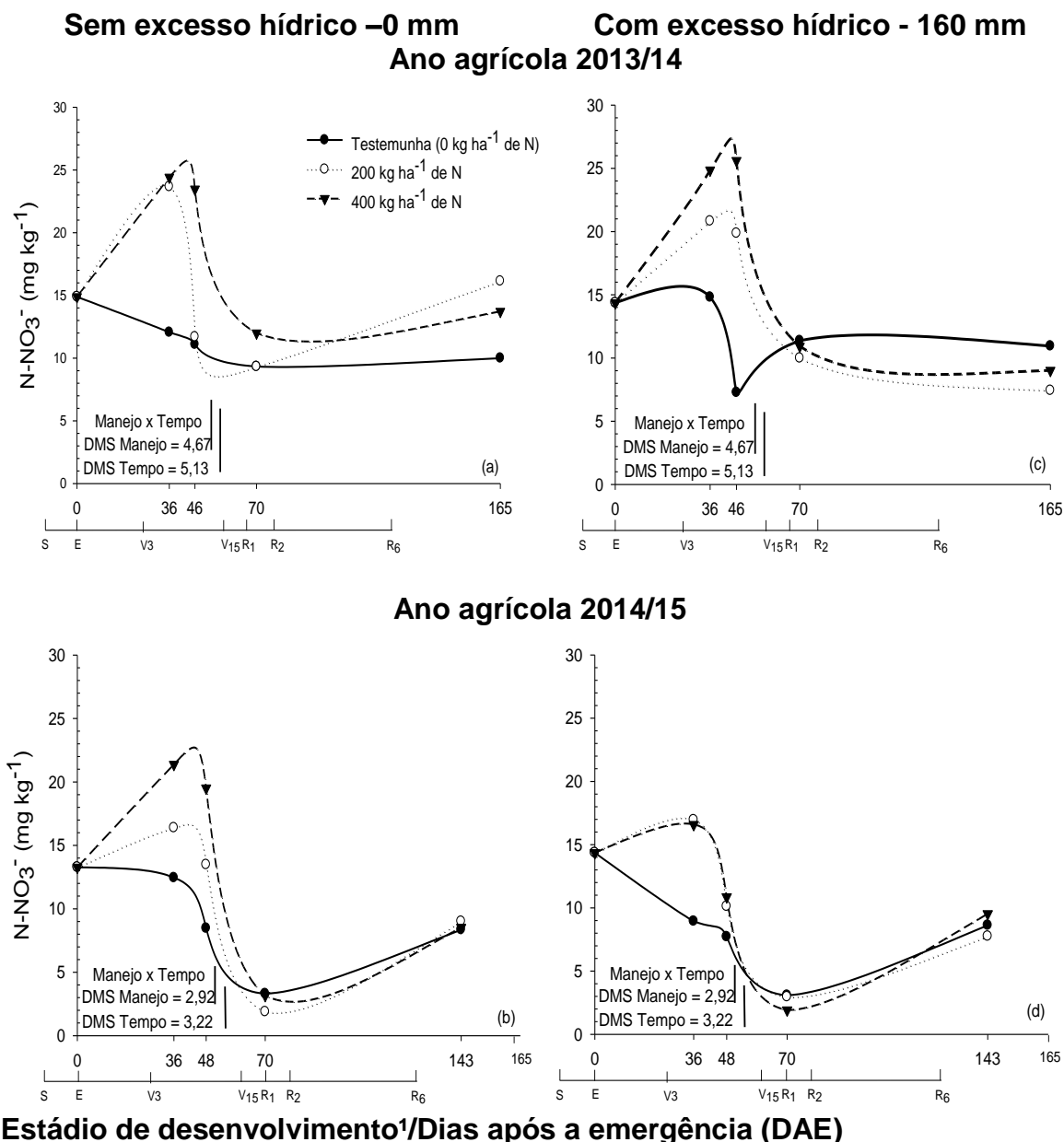


FIGURA 3.3. Disponibilidade de nitrogênio nítrico na camada de 0-40 cm do solo ao longo da estação de crescimento do milho irrigado sob três doses de N e dois manejos da irrigação aplicados oito e 18 dias após a adubação nitrogenada, sendo sem excesso hídrico (a, b) e com excesso hídrico (c, d), em dois anos agrícolas. Eldorado do Sul, RS. A barra vertical representa a DMS do teste de Tukey, com nível de 5% de significância. <sup>1</sup>Conforme escala de Ritchie *et al.* (1993).

No segundo ano (2014/15), foi registrado maior acumulado de precipitação (732 mm) durante o ciclo do milho (Figura 3.1b). As precipitações foram distribuídas de forma mais regular que no primeiro ano. Essa maior precipitação

resultou em menor necessidade de suplementação por irrigação, sendo aplicado por irrigação apenas 170 mm de água, nos tratamentos sem excesso hídrico, e 330 mm, nos tratamentos com excesso hídrico. No entanto, as precipitações ocorridas foram de maiores intensidades e frequência. Neste ano, a maior precipitação pluvial registrada foi de 83 mm, que ocorreu oito dias após a aplicação do primeiro excesso hídrico (80 mm). Neste ano, o acumulado de água disponível para a cultura (precipitações + irrigações) também foi elevado, sendo de 902 e 1.062 mm, respectivamente nos tratamentos sem e com excesso hídrico.

Maiores teores de  $\text{N-NH}_4^+$  foram observados na segunda data de coleta do solo, realizada aos 10 dias após a aplicação do adubo nitrogenado (26 DAE), independentemente da aplicação ou não de um excesso hídrico (Figura 3.2b;d). Neste ano, diferentemente do primeiro, houve redução nos teores de amônio, entre o 10º e 20º dias após a aplicação do adubo nitrogenado, nas doses de 200 e 400 kg ha<sup>-1</sup> de N, nos dois manejos da irrigação. No manejo sem excesso hídrico, as magnitudes desse decréscimo nos teores de  $\text{N-NH}_4^+$  foram de 39% e 29%, respectivamente nas doses de 200 e 400 kg ha<sup>-1</sup> de N. Já no manejo com excesso hídrico, essas reduções foram de 15% e 31%, respectivamente nas doses de 200 e 400 kg ha<sup>-1</sup> de N. Após o 20º dia (38 DAE), não foi observada diferença entre doses de N para os teores de  $\text{N-NH}_4^+$ , sendo os valores muito semelhantes nas três doses de N testadas. Além disso, foi observada redução nos teores de amônio até a amostragem final do solo (143 DAE), realizada três dias após a colheita do milho.

O  $\text{N-NO}_3^-$  no solo se comportou de maneira similar aos teores de  $\text{N-NH}_4^+$  ao longo do ciclo de desenvolvimento do milho, no segundo ano. Maiores teores foram observados na segunda data de coleta do solo, realizada aos 10 dias após a aplicação do adubo nitrogenado (26 DAE), independentemente da aplicação ou não de um excesso hídrico (Figura 3.3b;d). Neste ano, diferentemente do ocorrido no primeiro, houve redução nos teores de nitrato entre o 10º e 20º dias após a aplicação do N, nas doses de 200 e 400 kg ha<sup>-1</sup> de N, nos dois manejos da irrigação. No manejo sem excesso hídrico, os decréscimos nos teores de  $\text{N-NO}_3^-$  foram de 22% e 10%, respectivamente nas doses de 200 e 400 kg ha<sup>-1</sup> de N. Já

no manejo com excesso hídrico, as reduções nos teores de nitrato foram de maior magnitude, sendo de 68% e 53%, respectivamente nas doses de 200 e 400 kg ha<sup>-1</sup> de N. Após o 20º dia (38 DAE), não foi observada diferença entre doses de N para teores de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, sendo os valores muito semelhantes em todas as doses de N testadas. Diferentemente do observado para teores de amônio, foi observada uma elevação nos teores de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> na amostragem final do solo, realizada aos três dias após a colheita do milho.

De maneira geral, no segundo ano, foram observados menores teores de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> (Figura 3.2b;d) e N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> (Figura 3.3b;d) quando foi aplicado um excesso hídrico (160 mm), principalmente nas coletas realizadas aos 10 e 20 dias após a aplicação do adubo nitrogenado e na maior dose de N (400 kg ha<sup>-1</sup>), em relação ao manejo sem excesso hídrico.

### 3.4.2 Rendimento de grãos

Nos dois anos agrícolas, não houve interação de manejo da irrigação e doses de N em cobertura, sendo assim, expressos os efeitos na média de doses e manejos da irrigação. O rendimento de grãos variou de 9,51 a 14,97 Mg ha<sup>-1</sup> e de 4,47 a 14,66 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente no primeiro e segundo anos (Tabela 3.1). No primeiro ano, foi significativo apenas o efeito principal de doses de N, sendo que o rendimento de grãos foi menor no tratamento testemunha (0 kg ha<sup>-1</sup>), quando comparado ao obtido com as doses de 200 e 400 kg ha<sup>-1</sup> de N. Houve resposta do rendimento de grãos até à dose de 200 kg ha<sup>-1</sup>, mantendo-se estável com a aplicação da maior dose.

No segundo ano foram significativos os efeitos principais de manejo da irrigação e doses de N (Tabela 3.1). Com excesso hídrico (160 mm), o rendimento de grãos foi 10,9 % inferior em relação ao obtido no manejo sem excesso hídrico (0 mm), na média de doses de N. Em relação a doses de N, foi observado que o rendimento de grãos aumentou até à aplicação da maior dose de N (400 kg ha<sup>-1</sup>). Em relação à dose intermediária, o rendimento de grãos aumentou em 32 % com a aplicação da maior dose de N (400 kg ha<sup>-1</sup>).

Os valores de rendimento de grãos no tratamento testemunha sem aplicação de N foram bem maiores no primeiro ano (9,51 Mg ha<sup>-1</sup>) em relação ao segundo ano (4,47 Mg ha<sup>-1</sup>) (Tabela 3.1).

TABELA 3.1. Rendimento de grãos de milho em função de três doses de N em cobertura, em aplicação única, e dois manejos da irrigação, em dois anos agrícolas. Eldorado do Sul, RS.

Dose de N	Rendimento de grãos	
	2013/14	2014/15
---- kg ha <sup>-1</sup> ----	-----Mg ha <sup>-1</sup> -----	
0 <sup>1</sup>	9,51 b	4,47 c
200	13,92 a	11,09 b
400	14,97 a	14,66 a
CV <sup>2</sup> (%)	9,37	8,07
Manejo da irrigação <sup>3</sup>		
---- mm ----		
0	13,05 <sup>ns</sup>	10,59 A
160	12,55	9,55 B
CV (%)	8,74	7,09

<sup>1</sup>Dose única aplicada no estágio V<sub>3-4</sub>, segundo escala de Ritchie *et al.* (1993); <sup>2</sup>Coefficiente de Variação; <sup>3</sup>Aplicação de um excesso hídrico aos oito (80 mm) e 18 (80 mm) dias após a adubação nitrogenada em cobertura e sem aplicação; ns: não diferem significativamente pelo teste F (p<0,05); Letras minúsculas comparam doses dentro de manejo da irrigação, na coluna e letras maiúsculas compararam manejo da irrigação dentro da dose de N, na coluna, pelo teste de Tukey (p<0,05).

### 3.5 DISCUSSÃO

Nos dois anos de condução do experimento foram observadas elevada disponibilidade hídrica (precipitação + irrigação) durante o ciclo da cultura, próxima de 1.000 mm (Figura 3.1) Essa disponibilidade hídrica foi, aproximadamente, 68% acima das exigências do milho durante seu ciclo, que é em torno de 600 mm de água (Matzenauer *et al.*, 2002). Essa condição hídrica a que a cultura foi exposta durante os dois anos, associada às características arenosas do solo (Streck *et al.*, 2008), podem favorecer as perdas de N, principalmente por lixiviação.

No primeiro ano, houve resposta do rendimento de grãos até à aplicação da dose de 200 kg ha<sup>-1</sup> de N, mantendo-se estável com a aplicação da maior dose

(400 kg ha<sup>-1</sup>) (Tabela 3.1). Nesse ano, em que a semeadura foi realizada em outubro, com ocorrência de temperaturas do ar mais elevadas, as plantas apresentaram maior velocidade de crescimento da parte aérea, o que se refletiu em maior desenvolvimento do seu sistema radicular, principalmente nos estádios iniciais de desenvolvimento. Aos 20 dias após a primeira adubação nitrogenada (36 DAE), as plantas de milho estavam no estágio V<sub>9</sub>. Esse maior crescimento pode ter resultado em maior absorção do N pela planta.

Além disso, essa resposta do rendimento de grãos somente até à dose de 200 kg ha<sup>-1</sup> de N também pode ser explicada pelos altos teores de N-mineral do solo observado na amostragem realizada aos 46 dias após a emergência, correspondendo ao estágio V<sub>10-11</sub>, em que ocorre a diferenciação da espiga, conforme se observa nas Figuras 3.2 e 3.3. Esses altos teores também foram encontrados até o estágio de espigamento (Figuras 3.2 e 3.3). Os híbridos de milho desenvolvidos mais recentemente possuem a capacidade de absorver até 30% de N do solo em estádios tardios, pós espigamento (Silva *et al.*, 2005), resultando assim, em maior eficiência de uso do N pela planta e, conseqüentemente, menores perdas por lixiviação. Outro fator relevante é a adoção do plantio direto por longo período (24 anos) na área do experimento. Esse sistema por ter aumentado o acúmulo de matéria orgânica e de nutrientes na camada superficial do solo, devido ao baixo revolvimento preconizado neste sistema, favorecendo também a maior estabilidade física do solo.

No primeiro ano, maiores teores de amônio e nitrato foram observados aos 10 e 20 dias após a aplicação do adubo nitrogenado, nos dois manejos da irrigação (Figuras 3.2a;c e 3.3a;c). No entanto, neste período foram encontrados menores teores de amônio em relação aos de nitrato. Essa resposta pode ocorrer pela transformação do N no solo da forma amídica para a nítrica, que ocorre de uma a três semanas após o início do processo de hidrólise (Araújo *et al.*, 2004). Após a segunda coleta, foi observado decréscimo acentuado nos teores de amônio e nitrato até o estágio de espigamento (Figuras 3.2a;c e 3.3a;c). Essa redução pode ser explicada pela alta absorção do nutriente pelas plantas, pois cerca de 50 a 75% do N total acumulado pelo milho ocorre até o espigamento,

que ocorre por volta dos 70 dias após a emergência (Cantarella & Duarte, 2004; Franco *et al.*, 2011).

Na coleta realizada após a colheita, houve aumento nos teores de amônio em relação à realizada no espigamento (Figuras 3.2a;c). Esse aumento nos teores de  $\text{N-NH}_4^+$  ocorreu, provavelmente, devido a essa última coleta ter sido realizada aos 20 dias após a colheita do milho (165 DAE). A presença de restos culturais da planta de milho, a alta umidade e as temperaturas favoráveis do solo podem ter promovido a mineralização dos resíduos (Bayer & Mielniczuk, 2008; Silva *et al.*, 2005), resultando em aumento dos teores de  $\text{N-NH}_4^+$  na camada amostrada (0-40 cm).

No segundo ano, os teores de amônio e nitrato aumentaram até à coleta realizada aos 10 dias após a aplicação do adubo nitrogenado (26 DAE), sendo observado decréscimo nesses teores na coleta subsequente (38 DAE), nos dois manejos da irrigação (Figuras 3.2b;d e 3.3b;d). Essa redução nos teores de amônio pode ter ocorrido em consequência também do processo de nitrificação. Esse processo é mediado pelas bactérias *Nitrossomonas* e *Nitrobacter*, que transformam o amônio ( $\text{N-NH}_4^+$ ) em nitrato ( $\text{N-NO}_3^-$ ). Essa reação ocorre em uma a três semanas após o início do processo de hidrólise da ureia (Gomes *et al.*, 1998; Villas Bôas *et al.*, 1999), o que pode ter contribuído para a redução drástica nos teores de  $\text{N-NH}_4^+$  na camada de solo avaliada (0-40 cm). Essa redução também pode ser explicada por processos de perdas de N no sistema solo-planta, tanto na forma de amônio, como de nitrato. Porém, a perda de N na forma de nitrato é favorecida, principalmente por lixiviação. A baixa capacidade de adsorção de nitrato aos colóides do solo, causada pelo predomínio de cargas negativas no solo, favorece sua perda (Peng *et al.*, 2015) para camadas mais profundas, pela ação da água que infiltra no perfil (Cantarella, 2007), o que pode explicar a necessidade da aplicação da maior dose para compensar essa maior perda de N.

No segundo ano também foram observados menores teores de nitrato no solo em relação ao primeiro ano. Isso pode ser explicado pelo fato de que nesse ano houve menor desenvolvimento inicial das plantas, ocasionado pela semeadura mais antecipada do milho (setembro). Aos 20 dias após a aplicação

do adubo nitrogenado, o milho semeado em setembro encontrava-se no estágio V<sub>7</sub>, portanto, menos desenvolvido que no mesmo período do primeiro ano (estádio V<sub>9</sub>). O menor crescimento do sistema radicular, no segundo ano pode também ter reduzido a área de exploração dos nutrientes no solo (Franco *et al.*, 2011), o que pode ter favorecido as perdas de N, principalmente na forma de nitrato. Após o 20º dia, como observado no primeiro ano, também houve redução nos teores de amônio e de nitrato até o estágio de espigamento (70 DAE).

As análises dos teores de N-mineral do solo e do rendimento de grãos demonstraram que houve perdas de N no sistema solo-planta em intensidades diferentes em cada ano. No primeiro ano foram observados maiores teores de N-mineral até o estágio de espigamento em todo perfil do solo. Essa maior disponibilidade de N incrementou o rendimento de grãos, principalmente na dose de 200 kg ha<sup>-1</sup> de N, quando comparada ao segundo ano, que apresentou menor rendimento de grãos, nessa mesma dose. Isso demonstra que quando são utilizadas doses menores de N, há necessidade de se manejar sua aplicação de forma mais eficiente, a fim de reduzir perdas. Diferentemente da aplicação de altas doses de N (400 kg ha<sup>-1</sup>) que mesmo com alta disponibilidade de N em um único momento para a planta houve altos rendimentos de grãos, nos dois anos agrícolas. Além disso, a semeadura do milho em setembro, no segundo ano, reduziu o desenvolvimento inicial das plantas e, conseqüentemente, sua capacidade de exploração radicular. Com isso, houve menor recuperação do N do solo pela planta favorecendo sua perda, devido à alta disponibilidade do nutriente no solo em um único momento para a planta. Essa condição aumenta a predisposição de perdas por lixiviação, reduzindo o potencial de rendimento de grãos do milho.

### 3.6 CONCLUSÕES

1. Com a semeadura de milho em uma época intermediária (outubro) são observados maiores teores de amônio e nitrato do solo até o estágio de espigamento, o que se reflete na necessidade da aplicação de menores doses de N (200 kg ha<sup>-1</sup>) para se obter máximos rendimentos de grãos.

2. Com a semeadura do milho em uma época do cedo (setembro) são observados menores teores de amônio e nitrato do solo, o que se reflete na necessidade da aplicação de maior dose de N ( $400 \text{ kg ha}^{-1}$ ) para se obter máximos rendimentos de grãos.
3. A aplicação de um excesso hídrico reduz os teores de amônio e nitrato do solo, principalmente na maior dose de N aplicada ( $400 \text{ kg ha}^{-1}$ ) e com a semeadura do milho em setembro.

### 3.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AITA, C.; GIACOMINI, S.J. Nitrato no solo com a aplicação de dejetos líquidos de suínos no milho em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, n. 5, p. 2101-2111, 2008.

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.

ARNUTI, F. **Dinâmica do nitrogênio em Argissolo em função de irrigação e adubação nitrogenada do milho em plantio direto**. 2014. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

ARREGUI, L. M.; QUEMADA, M. Drainage and nitrate leaching in a crop rotation under different N-fertilizer strategies: Application of capacitance probes. **Plant and Soil**, The Hague, v. 288, n. 1-2, p. 57-69, 2006.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G. de A. et al. (Ed). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2.ed.rev. e atual. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p 7-18.

BERGAMASCHI, H. et al. **Boletins agrometeorológicos da estação experimental agrônômica da UFRGS – série histórica 1970-2012**. Porto Alegre, RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013. Disponível em: <[http://www.ufrgs.br/agronomia/joomla/files/EEA/Srie\\_Meteorologica\\_da\\_EEA-UFRGS.pdf](http://www.ufrgs.br/agronomia/joomla/files/EEA/Srie_Meteorologica_da_EEA-UFRGS.pdf)>. Acesso em: 10 ago. 2015.

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

CANTARELLA, H.; MARCELINO, R. Fontes alternativas de nitrogênio para a cultura do milho. **Informações Agrônomicas**, Piracicaba, n.122, p.12-14, 2008.



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

CERRI, C. E. P. et al. Emissões de gases do efeito estufa do Brasil: importância da agricultura e pastagem. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.66, p. 831-843, 2009.

COBUCCI, T. **Efeitos de doses e épocas de aplicação em cobertura do adubo nitrogenado no consórcio milho-feijão**. 1991. 94 f. Tese (Doutorado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1991.

ERNANI, P.R. **Disponibilidade de nitrogênio e adubação nitrogenada para a macieira**. Lages: Graphel, 2003. 76p.

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

FONTOURA, S. M. V.; BAYER, C. **Manejo e fertilidade de solos em plantio direto**. Guarapuava-PR: Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária, 2006. 218 p.

FORSTHOFER, E.L. et al. Desempenho fenológico e agrônômico de três híbridos de milho em três épocas de semeadura. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.34, n.5, p.1341-1348, 2004.

FRANCO, H.C.J. et al. Nitrogen sugarcane derived from fertilizer under Brazilian field conditions. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.121, p. 29-41, 2011.

GOMES, E.P. et al. Avaliação do medidor eletrônico de umidade do solo “Hidrofarm” em Latossolo Vermelho distroférico. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v.7, n.1, p.85-90, 2013.

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 Agricola**, Piracicaba, v.9, p.73-79, 1998.

HICKMANN, C. **Dinâmica de nitrogênio e ajustes na adubação NPK para uma sequência milho-soja-milho na região dos Campos das Vertentes**. 2014. 159 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2014.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/>>. Acesso em: 21 out. 2015.

JAYNES, D.B.; COLVIN, T.S. Corn yield and nitrate loss in subsurface drainage from midseason nitrogen fertilizer application. **Agronomy Journal**, Madison, v.98, n.6, p.1479-1487, 2006.

LARA CABEZAS, W.A.R. et al. Balanço da adubação nitrogenada sólida e fluida de cobertura na cultura de milho, em sistema plantio direto no Triângulo Mineiro (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, p.363-376, 2000.

MAHARJAN B, VENTERE RT, ROSEN C. Fertilizer and irrigation management effects on nitrous oxide emissions and nitrate leaching. **Agronomy Journal**, Madison, v.105, p.703-714, 2014.

MARSCHNER, H.; MARSCHNER, P. Mineral Nutrition of Higher Plants. 3rd ed. London, UK: P. Academic Press, 2012. p. 315–330.

MATZENAUER, R. et al. **Consumo de água e disponibilidade hídrica para milho e soja, no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Fepagro, 2002. 105p. (BOLETIM Fepagro, 10).

PENG, X. et al. A Laboratory Evaluation of Ammonia Volatilization and Nitrate Leaching following Nitrogen Fertilizer Application on a Coarse-Textured Soil. **Agronomy Journal**, Madison, v. 107, n. 3, p. 871 , 2015.

RITCHIE, S. W. et al. **How a corn plant develops**. Ames: Iowa State University of Science and Technology, 1993. 26 p. (Special Report, v. 48) Disponível em: <<http://www.maize.agron.iastate.edu/corngrows.html>>. Acesso em: 15 ago. 2014.

SAS INSTITUTE. **Sas user's guide: statistics**. Cary, 2003. 846p.

SAIZ-FERNÁNDEZ, I. et al. High nitrate supply reduces growth in maize, from cell to whole plant. **Journal of Plant Physiology**, New York, v.173, n.1, p.120-129, 2015.

SCHEIBLE, W. R. et al. Genome-Wide Reprogramming of Primary and Secondary Metabolism, Protein Synthesis, Cellular Growth Processes, and the Regulatory Infrastructure of Arabidopsis in Response to Nitrogen. **Plant Physiology**, Lancaster, v. 136, n. 1, p. 2483–2499 , 2004.

SCHRÖDER, J. J. et al. Does the crop or the soil indicate how to save nitrogen in maize production? Reviewing the state of the art. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 66, n. 2, p. 151–164 , 2000.

SHAFFER, M. J.; DELGADO, J. A. Essentials of a national nitrate leaching index assessment tool. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v. 57, n. 6, 327-335, 2002.

SILVA, E. C. et al. Épocas e formas de aplicação de nitrogênio no milho sob plantio direto Em Solo De Cerrado. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 3, p. 725–733 , 2005.

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

STRIEDER, M. L. et.al. Incrementos no rendimento de grãos e no teor de proteína do grão de híbridos de milho com adubação nitrogenada tardia. In: SALÃO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 15., 2003, Porto Alegre. **Livro de resumos**. Porto Alegre: UFRGS, 2003. p.24-28.

TEDESCO, M. J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2.ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 175p (Boletim)

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.

## 4 CAPÍTULO 2 – TEORES DE AMÔNIO E NITRATO NO PERFIL DE UM ARGISSOLO E CARACTERÍSTICAS AGRONÔMICAS RELACIONADAS AO DESENVOLVIMENTO DE MILHO

### RESUMO

O suprimento nutricional de plantas via adubação mineral, principalmente a nitrogenada, é importante para viabilizar altas produtividades. Dentre os nutrientes, geralmente o nitrogênio (N) é o exigido em maior quantidade pelas plantas, sendo um dos principais fatores limitantes ao rendimento de grãos. Diante disso, os objetivos deste trabalho foram a) avaliar os teores de amônio e nitrato no perfil de um Argissolo, ao longo do ciclo de desenvolvimento do milho, em função de três doses de N e da aplicação ou não de um excesso hídrico após a aplicação da adubação nitrogenada e b) avaliar os efeitos desses dois fatores na absorção de N pelas plantas e no rendimento de grãos de milho. O experimento foi conduzido em dois anos agrícolas, 2013/14 e 2014/15, em Eldorado do Sul-RS. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados, dispostos em parcelas subdivididas, com três repetições. Nas parcelas principais foram testados dois manejos da irrigação: com aplicação de uma quantidade total de 160 mm de água por irrigação em dois momentos, sendo metade aos oito dias após a aplicação do adubo nitrogenado em cobertura e metade aos 18 dias após, e sem aplicação dessa lâmina de água. Esses tratamentos foram considerados, respectivamente, com e sem excesso hídrico. Nas subparcelas foram testadas três doses de N: 0, 200 e 400 kg ha<sup>-1</sup> aplicadas em cobertura em uma única vez, no estágio V<sub>3-4</sub>, da escala de Ritchie *et al.* (1993). Já nas subsubparcelas foi testado o fator camada de solo, que foi composta de quatro camadas de solo: 0-10; 10-20; 20-30 e 30-40 cm. O teor de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> no solo foi semelhante ao de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, nas mesmas coletas e profundidades do solo avaliadas, em ambos os manejos da irrigação.

## 4 CHAPTER 2 - AMMONIUM AND NITRATE LEVELS IN THE PROFILE OF A ULTISOL AND AGRONOMIC CHARACTERISTICS RELATED TO THE DEVELOPMENT OF CORN

### ABSTRACT

The nutritional supplement of plants through mineral fertilizer, especially nitrogen, is an important tool to improve productivity rates. Among the nutrients, generally, nitrogen (N) is required in greater amounts by plants, being one of the limiting factors to grain yield. Thus, the objectives of this study were a) to evaluate the ammonium and nitrate levels in the profile of an Ultisol over development cycle of corn, in function of three doses of N associated with the application or not of a water excess after nitrogen application and b) to evaluate the effects of these two factors on N uptake by plants and the corn yield. The experiment was conducted in two agricultural years 2013/14 and 2014/15, in Eldorado do Sul, RS, Brazil. In main plots was allocated the managements of irrigation, which consisted of applying a total quantity of 160 mm of water. The first 80 mm were applied after eight days of the first dose of nitrogen fertilization and the remaining 80 mm, 18 days after the first dose. A control without application of this amount of water was also tested. These treatments were considered, respectively, with and without water excess. In the subplot, was allocated the managements of nitrogen fertilizer, which consisted of three different doses: 100, 200 and 400 kg ha<sup>-1</sup> of N. The application of N was in unique ways in top dressing on corn in V<sub>3-4</sub> stage of the scale of Ritchie *et al.* (1993)). Moreover, in the sub-subplots were tested the impact of the layer of soil, which was consisted of four layers: 0-10; 10-20; 20-30 and 30-40 cm. Results shows that the NH<sub>4</sub><sup>+</sup> content of the soil was similar to that of NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, on the same sampling and depths of soil evaluated in both management of irrigation.

## 4.1 INTRODUÇÃO

O suprimento nutricional de plantas via adubação mineral, principalmente a nitrogenada, é importante para viabilizar altas produtividades. Dentre os nutrientes, o nitrogênio (N) geralmente é o exigido em maior quantidade pelas plantas, sendo integrante de todos os seus aminoácidos e ácidos nucleicos, além de vários outros compostos (Epstein & Bloom, 2006). Na cultura do milho é considerado um dos principais fatores limitantes ao rendimento de grãos (Fernandes, 2008).

No solo, o N apresenta uma dinâmica complexa, sendo o nutriente de manejo e recomendação mais difíceis, em virtude das inúmeras reações químicas e biológicas a que está sujeito e de sua grande dependência das condições edafoclimáticas para absorção pela planta (Cantarella & Duarte, 2004). As principais formas de N disponíveis para as plantas são o amônio ( $\text{NH}_4^+$ ) e o nitrato ( $\text{NO}_3^-$ ), as quais, no entanto, representam menos de 5% do N total do solo (Ernani, 2003).

Dentre as várias fontes nitrogenadas utilizadas na agricultura para atender às exigências da planta, a ureia é a mais difundida, devido à sua alta concentração de N (~44%) e a seu menor custo. Entretanto, a eficiência de uso do N é baixa, estando em torno de 50% (Lara Cabezas *et al.*, 2000; Saiz-Fernández *et al.*, 2015), em virtude das inúmeras transformações a que o N está sujeito. Apenas parte do N que é aplicado é absorvido pelas plantas. O restante pode ser perdido do sistema solo-planta-atmosfera pelos processos de lixiviação, volatilização, erosão e desnitrificação. Há, ainda, uma fração que permanece no solo na forma orgânica (Vargas, 2010).

Essas perdas de N podem provocar assincronia entre sua disponibilidade no solo e a demanda pela planta. Dentre os processos de perdas de N, destaca-

se a lixiviação, que consiste na movimentação do N-mineral ( $\text{NH}_4^+$  e  $\text{NO}_3^-$ ) disponibilizado no solo para camadas mais profundas por ação da água, inviabilizando, desta forma, sua absorção pelas raízes das plantas (Ernani, 2008). Estima-se que 10% a 30% do N adicionado aos solos é perdido por lixiviação (Meisinger *et al.*, 2008). Esse processo ocorre devido à predominância de cargas negativas na camada superficial do solo e à baixa interação química, principalmente do  $\text{NO}_3^-$  com os minerais do solo, que fazem com que esse ânion seja facilmente perdido, acompanhando o movimento descendente da água que percola no perfil do solo (Cantarella & Marcelino, 2008).

As perdas de N por lixiviação são muito variáveis e dependem da presença de nitrato no solo e do excedente de água que infiltra no perfil do solo. Essas perdas são maiores em solos arenosos, na presença de culturas com sistema radicular pouco desenvolvido, sob altas precipitações e quando o N é aplicado em doses maiores do que as necessidades das plantas. A percolação do nitrato para camadas mais profundas do solo pode comprometer a qualidade das águas superficiais e do lençol freático (Cantarella & Montezano, 2010), devido à toxicidade do íon nitrato. Essas perdas de N podem reduzir sua disponibilidade e seu fornecimento para a cultura, diminuindo assim, a eficiência de seu uso pela planta.

Há poucas informações sobre medição de perdas de N por lixiviação nas diferentes camadas do solo, sob condições de campo. Resultados de alguns experimentos indicam que as quantidades de N lixiviadas no Brasil têm sido pequenas (Cantarella, 2007). As doses de nitrogênio relativamente baixas utilizadas e o manejo tradicional da adubação para a maioria das culturas, que envolve o parcelamento da adubação nitrogenada, pode explicar a baixa lixiviação e sugerem que a contaminação ambiental na agricultura brasileira com nitrato é pequena. Porém, culturas adubadas com altas doses do nutriente podem apresentar acúmulo de N-inorgânico na camada subsuperficial (Cantarella & Montezano, 2010). Além disso, períodos de precipitações intensas também podem provocar perdas em situações nas quais a lixiviação de nitrato não é comum.

Neste contexto, necessita-se de melhor entendimento da dinâmica do N no perfil do solo, principalmente quando exposto a períodos de excesso hídrico, que pode acarretar em perdas desse nutriente do sistema por lixiviação. O aperfeiçoamento do manejo e da recomendação da adubação nitrogenada é importante para minimizar impactos ao ambiente e aumentar a eficiência de uso do fertilizante pela planta.

Com isso, as hipóteses do presente trabalho foram: a) a aplicação de um excesso hídrico aos oito e 18 dias após a aplicação da adubação nitrogenada pode potencializar as perdas, principalmente de nitrato, no perfil de um Argissolo; b) maiores perdas de N por lixiviação resultam em menor disponibilidade de N para absorção pelas plantas e, em consequência, em menores quantidades de N acumulado na planta, rendimento de massa seca e rendimento de grãos.

Para testar essas hipóteses, conduziu-se um experimento no campo, durante dois anos agrícolas, com os objetivos de a) monitorar os teores de amônio e nitrato no perfil de um Argissolo em diferentes épocas de coleta do solo sob três doses de N e da aplicação ou não de um excesso hídrico após o manejo da adubação nitrogenada e seus efeitos sobre a absorção de N pelas plantas e o rendimento de grãos de milho e b) avaliar os efeitos desses dois fatores sobre a absorção de N pelas plantas e o rendimento de grãos de milho.

## **4.2 MATERIAL E MÉTODOS**

### **4.2.1 Caracterização do ambiente**

A pesquisa foi conduzida no campo durante os anos agrícolas 2013/14 e 2014/15, em Eldorado do Sul, região ecoclimática da Depressão Central do Estado do RS. 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 (Bergamaschi *et al.*, 2013).

O solo da área experimental é classificado como Argissolo Vermelho Distrófico típico (Streck *et al.*, 2008). Esse solo caracteriza-se por ter textura



franco-arenosa no horizonte superficial e ser moderadamente profundo e moderadamente drenado. No primeiro ano, as amostras de solo foram coletadas em maio de 2013 e apresentaram os seguintes resultados: argila: 240 g kg<sup>-1</sup>; pH (água): 5.1; P: 24 mg dm<sup>-3</sup> (Mehlich-1); K: 178 mg dm<sup>-3</sup> (Mehlich-1); MO: 16 g kg<sup>-1</sup> e CTC: 9,2 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, conforme Tedesco *et al.* (1995). No segundo ano, as amostras de solo foram coletadas em maio de 2014 e apresentaram os seguintes valores: argila: 250 g kg<sup>-1</sup>; pH (água): 5.1; P: 34 mg dm<sup>-3</sup> (Mehlich-1); K: 146 mg dm<sup>-3</sup> (Mehlich-1); MO: 20 g kg<sup>-1</sup> e CTC: 9,6 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>.

A área experimental está sendo cultivada em sistema de plantio direto há 25 anos. No verão, é feita rotação entre as culturas de soja e milho. No outono-inverno de 2013 e 2014 foi utilizada como cobertura de solo a aveia branca (*Avena sativa*). A dessecação da cobertura foi realizada com a aplicação do herbicida glifosato no início do mês de setembro e de agosto, respectivamente nos anos agrícolas 2013/14 e 2014/15.

#### 4.2.2 Procedimento experimental

Para avaliar os teores de amônio e nitrato nas diferentes camadas de solo amostradas, o delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados, dispostos em parcelas subdivididas, no esquema de medidas repetidas no tempo, com três repetições. Nas parcelas principais foram testados dois manejos da irrigação, uma testemunha sem aplicação do excesso hídrico, e com aplicação de um excesso hídrico de 160 mm de água por irrigação de aspersão. Esse volume foi aplicado em dois momentos, sendo metade aos oito dias e metade aos 18 dias após a aplicação do adubo nitrogenado em cobertura. Esses tratamentos foram considerados, respectivamente, como “sem” e “com excesso hídrico”. O excesso hídrico de 160 mm aplicado foi baseado em estudos anteriores (Arnuti, 2014). Nas subparcelas foram testadas três doses de N: 0, 200 e 400 kg ha<sup>-1</sup>, aplicadas em cobertura em uma única vez, no estágio V<sub>3-4</sub>, da escala de Ritchie *et al.* (1993). Já as subsubparcelas eram compostas de quatro camadas de solo: 0-10; 10-20; 20-30 e 30-40 cm.

Para determinação dos teores de amônio e nitrato nas diferentes camadas de solo foram realizadas três coletas de solo, sendo a primeira aos 10 dias após a

aplicação do adubo nitrogenado (estádio V<sub>5-6</sub>) a segunda aos 20 e 22 dias após a aplicação do adubo nitrogenado, respectivamente nos anos agrícolas 2013/14 e 2014/15, e a terceira coleta no estágio R<sub>1</sub> (espigamento), em torno de 70 dias após a emergência das plantas de milho. Para cada amostra foram coletadas seis subamostras, em dois pontos centrais da subparcela, sendo duas subamostras sobre a linha de adubação e quatro subamostras laterais na entrelinha para compor uma amostra homogênea, para posterior determinação dos teores de N-mineral (NH<sub>4</sub><sup>+</sup> e NO<sub>3</sub><sup>-</sup>) presentes em cada camada de solo.

Para avaliação das características rendimento de grãos, rendimento de massa seca, teor e quantidade de N acumulado na parte aérea da planta no estágio de espigamento utilizou-se o delineamento de blocos casualizados, dispostos em parcelas subdivididas, com quatro repetições. Nas parcelas principais, foram testados os dois manejos da irrigação, como descrito anteriormente, e nas subparcelas foram locados as três doses de N: 0 200 e 400 kg ha<sup>-1</sup>, aplicadas em cobertura, em uma só vez, no estágio V<sub>3-4</sub>.

O milho foi semeado em 02 de outubro de 2013 e em 05 de setembro de 2014, em sistema de semeadura direta. O híbrido reagente utilizado foi o Pioneer 1630H, de ciclo superprecoce, da empresa Pioneer Sementes, com tecnologia Bt, em ambos os anos. Nos dois anos, a adubação na semeadura constou da aplicação de 30, 180 e 90 kg ha<sup>-1</sup> de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O, respectivamente. Utilizou-se a ureia com inibidor da urease, com tecnologia Agrotain, como fonte de adubo nitrogenado em cobertura, para reduzir as perdas por volatilização. Para incorporar o N na solução do solo, procedeu-se uma irrigação de 20 mm de água, uniforme para todos os tratamentos, logo após a realização da aplicação de N. A densidade de plantas utilizada foi de 90.000 plantas ha<sup>-1</sup>, com espaçamento entrelinhas de 0,5 m. Plantas daninhas, doenças e pragas foram controladas para não interferirem no rendimento de grãos.

Nos dois anos de condução do experimento, foi realizada irrigação complementar durante o ciclo de desenvolvimento da cultura, sempre que detectada a ocorrência de déficit hídrico. A frequência das irrigações foi determinada com base no monitoramento da umidade volumétrica do solo, através do sensor Hidro Farm, que utiliza a tecnologia ISAF (impedância do solo

em alta frequência) (Gomes *et al.*, 2013). Considerou-se a umidade volumétrica de 20 % como limite inferior, ou seja, efetuou-se a irrigação sempre que foi atingido este valor nos sensores. Na Figura 4.1, são apresentados os dados de precipitação pluvial registrados na área experimental e das irrigações complementares. Além disso, são especificadas as épocas de realização das coletas de solo ( $\downarrow$ ), da aplicação da adubação nitrogenada (N) em cobertura e da aplicação dos excessos hídricos (I), nos tratamentos correspondentes.

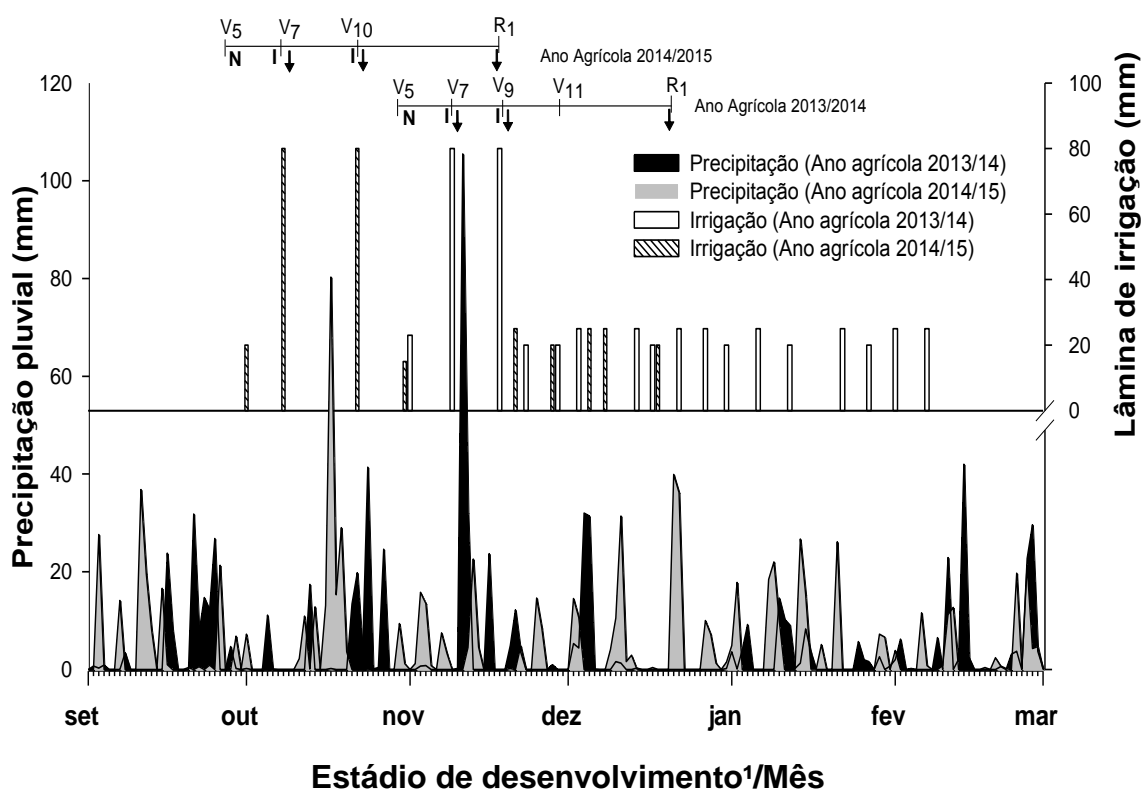


FIGURA 4.1. Distribuição das precipitações pluviométricas e irrigações realizadas durante o desenvolvimento da cultura do milho, nos anos agrícolas de 2013/14 e 2014/15. Eldorado do Sul, RS. (N) indica aplicação da adubação nitrogenada, (I) indica aplicação dos excessos hídricos (80 + 80 mm) e ( $\downarrow$ ) indica as datas de coletas de solo. <sup>1</sup>Conforme escala de Ritchie *et al.* (1993). Fonte: INMET (2015).

Nos dois anos, as determinações realizadas foram: quantificação dos teores de N-mineral ( $\text{NH}_4^+$  e  $\text{NO}_3^-$ ) em quatro camadas de solo e em três datas de coleta, rendimento de grãos, rendimento de massa seca, teor e quantidade de N acumulado na parte aérea do milho no estágio de espigamento.

As determinações de N-mineral foram realizadas por meio de arraste de vapor em semimicro Kjeldhal, sendo o N-mineral extraído por solução KCl mol L<sup>-1</sup>, segundo Tedesco *et al.* (1995). Uma alíquota de 20 ml da solução extraída com KCl foi usada para determinação do N-mineral. Na primeira destilação, foi adicionado MgO para determinação de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> e, posteriormente, na segunda destilação da mesma amostra foi adicionada liga devarda para determinação de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>. Para quantificar os teores de amônio e nitrato foi considerada a densidade do solo, 1 g cm<sup>-3</sup>.

O rendimento de grãos foi estimado em uma área útil de 10,0 m<sup>2</sup>, sendo expresso na umidade padrão de 130 g kg<sup>-1</sup>.

O rendimento de massa seca da parte aérea, o teor e a quantidade de N acumulada na parte aérea foram determinados no estágio de espigamento (R<sub>1</sub>). Fez-se a coleta de quatro plantas de cada unidade experimental, que foram acondicionadas em estufa, sob temperatura de 60 °C, até atingirem peso constante. Este material foi pesado e os valores obtidos foram convertidos para Mg ha<sup>-1</sup>. Nessa amostra foi determinado o teor de N, segundo a metodologia descrita por Tedesco *et al.* (1995). A quantidade de N acumulada por planta foi calculada dividindo-se por quatro a massa seca das plantas da amostra e multiplicando-se este valor pelo respectivo teor de N. Após, esse valor foi multiplicado pela densidade de plantas (90.000 pl).

#### 4.2.3 Análise estatística

Os dados de teores de N-mineral nas diferentes camadas de solo, em cada época de coleta, de rendimento de massa seca, teor e N acumulado na parte aérea no estágio de espigamento e de rendimento de grãos foram submetidos à análise de variância, utilizando-se o programa estatístico SAS (SAS Institute, 2003), conforme os seguintes modelos:

c) N-mineral (NH<sub>4</sub><sup>+</sup> e NO<sub>3</sub><sup>-</sup>):

$$Y_{ijkl} = \mu + B_i + I_j + \text{erro } a_{(ij)} + N_k + I_j N_k + \text{erro } b_{(ijk)} + T_l + \text{erro } c_{(il)} + I_j T_l + N_k T_l + I_j M_k T_l + \text{erro } d_{(ijkl)}$$

onde:  $\mu$  = média geral do experimento; B = bloco; I = manejo da irrigação; N = nitrogênio (dose); T = tempo;  $i = 1,2,3$ ;  $j = 1,2$ ;  $k = 1,2,3$ ;  $l = 1,2,\dots,4$  e Erro = erro experimental.

d) Rendimento de massa seca, teor e quantidade de N acumulado na parte aérea no estágio de espigamento e rendimento de grãos:

$$Y_{ij} = \mu + B_i + I_j + \text{erro } a_{(ij)} + N_k + I_j N_k + \text{erro } b_{(ijk)}$$

onde:  $\mu$  = média geral do experimento; B = bloco; I = manejo da irrigação; N = nitrogênio (dose);  $i = 1,2,3,4$ ;  $j = 1,2$  e  $k = 1,2,3$  e Erro = erro experimental.

Para a comparação de médias foi utilizado o teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

#### 4.4 RESULTADOS

Para melhor entendimento, a apresentação dos resultados será feita para cada ano agrícola e será dividida em quatro partes: inicialmente, serão descritos os dados dos regimes hídricos relativos aos anos agrícolas 2013/14 e 2014/15; em seguida, os parâmetros relacionados a teores de N-mineral do solo, os relativos ao rendimento de grãos e, por fim, os relativos ao estado nutricional da planta. O apêndice contém o resumo da análise de variância dos dados relativos às variáveis avaliadas.

##### 4.4.1 N-mineral do solo

Para os teores de amônio e nitrato do solo houve interação tripla ( $p < 0,05$ ) de manejo da irrigação, doses de N e camada de solo amostrada, nos dois anos agrícolas. Entretanto, para melhor compreensão, os resultados foram expressos em função de cada manejo da irrigação e por época de amostragem de solo.

No primeiro ano (2013/14), foi registrado um acumulado de precipitação de 507 mm, durante todo o ciclo de desenvolvimento da cultura (Figura 4.1). No entanto, esse acumulado foi distribuído de forma irregular durante esse período, o que necessitou de 15 irrigações complementares, num total de 340 mm, nos

tratamentos sem excesso hídrico, e de 500 mm, nos tratamentos com excesso hídrico. Neste ano, não foram observadas precipitações de elevado volume no período, exceto a ocorrência de uma precipitação de 105 mm, seis dias após aplicação do primeiro excesso hídrico de 80 mm, correspondendo a 95% da média histórica para o mês de novembro. O acumulado de água disponível durante o ciclo do milho foi alto, sendo de 847 e 1.007 mm, respectivamente nos tratamentos sem e com excesso hídrico.

Nesse ano, na coleta de solo realizada aos 10 dias após a aplicação do N não foi observada variação nos teores de  $\text{N-NH}_4^+$  em profundidade, independentemente da aplicação ou não de um excesso hídrico (Figura 4.2a;c). No entanto, os maiores teores foram observados na camada mais superficial (0-10 cm) do solo, nos dois manejos da irrigação. No tratamento testemunha ( $0 \text{ kg ha}^{-1}$  de N), os teores de  $\text{N-NH}_4^+$  foram menores em todo perfil do solo (0-40 cm) em relação aos obtidos com a aplicação das doses de 200 e  $400 \text{ kg ha}^{-1}$  de N, que não diferiram entre si.

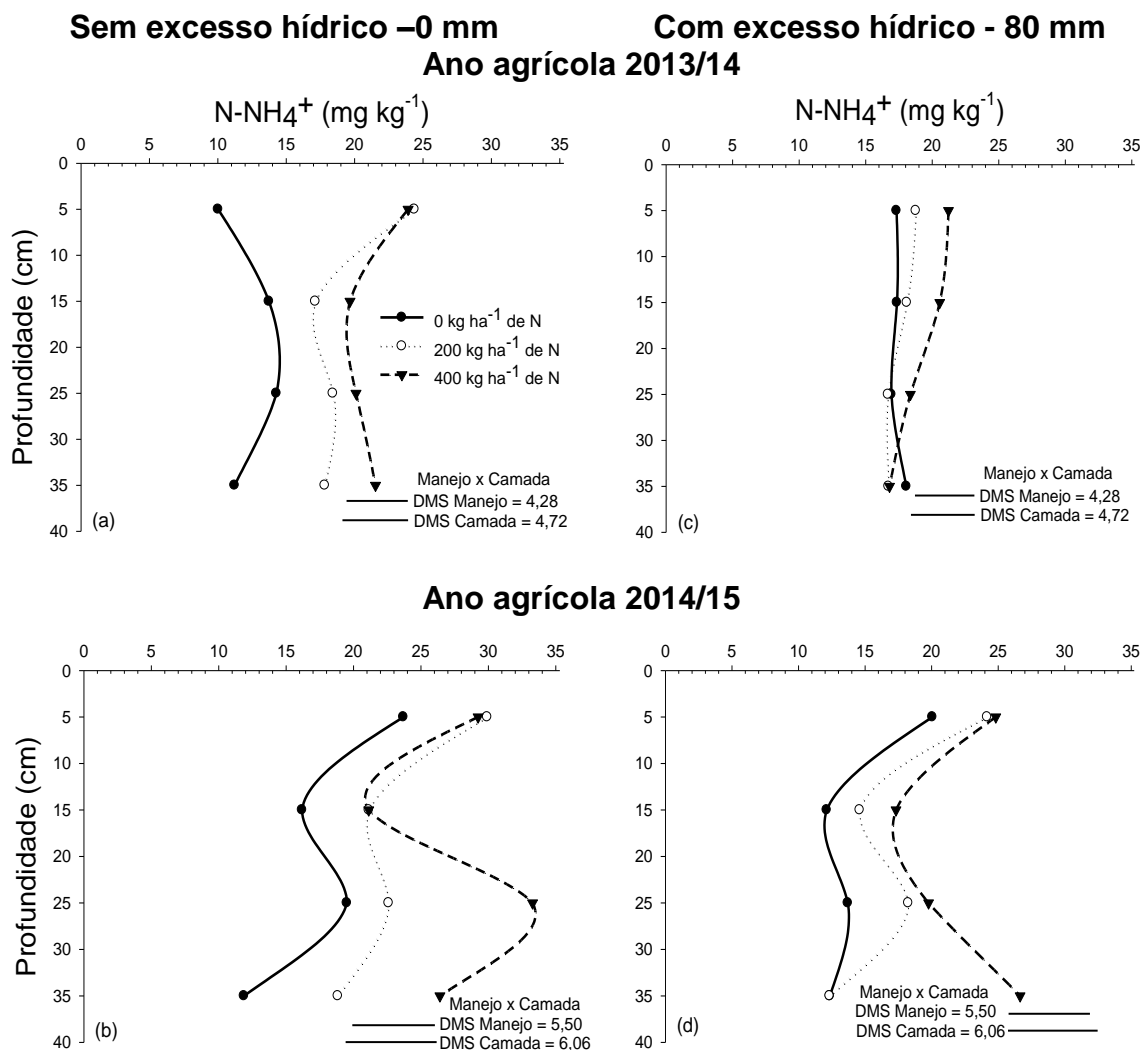


FIGURA 4.2. Nitrogênio amoniacal no solo em função de doses de nitrogênio em cobertura e de manejos da irrigação aplicados após a adubação nitrogenada, sem excesso hídrico (a;b) e com excesso hídrico (c;d) na amostragem de solo realizada 10 dias após a aplicação da adubação nitrogenada em cobertura no milho irrigado, em dois anos agrícolas. Eldorado do Sul, RS. A aplicação do N em cobertura foi realizada no estágio  $V_{3-4}$ , segundo escala de Ritchie *et al.* (2003). A barra horizontal representa a DMS do teste de *Tukey* com nível de 5% de significância.

Na coleta realizada aos 20 dias após a aplicação do adubo nitrogenado, os maiores teores de  $N-NH_4^+$  foram observados na camada de 20-30 cm do solo, independentemente do manejo da irrigação (Figura 4.3a;c). Os teores aumentaram até a aplicação da maior dose de N ( $400\ kg\ ha^{-1}$ ), nos dois manejos da irrigação, sendo maiores na camada de 20-40 cm, nas doses de 200 e  $400\ kg\ ha^{-1}$ .

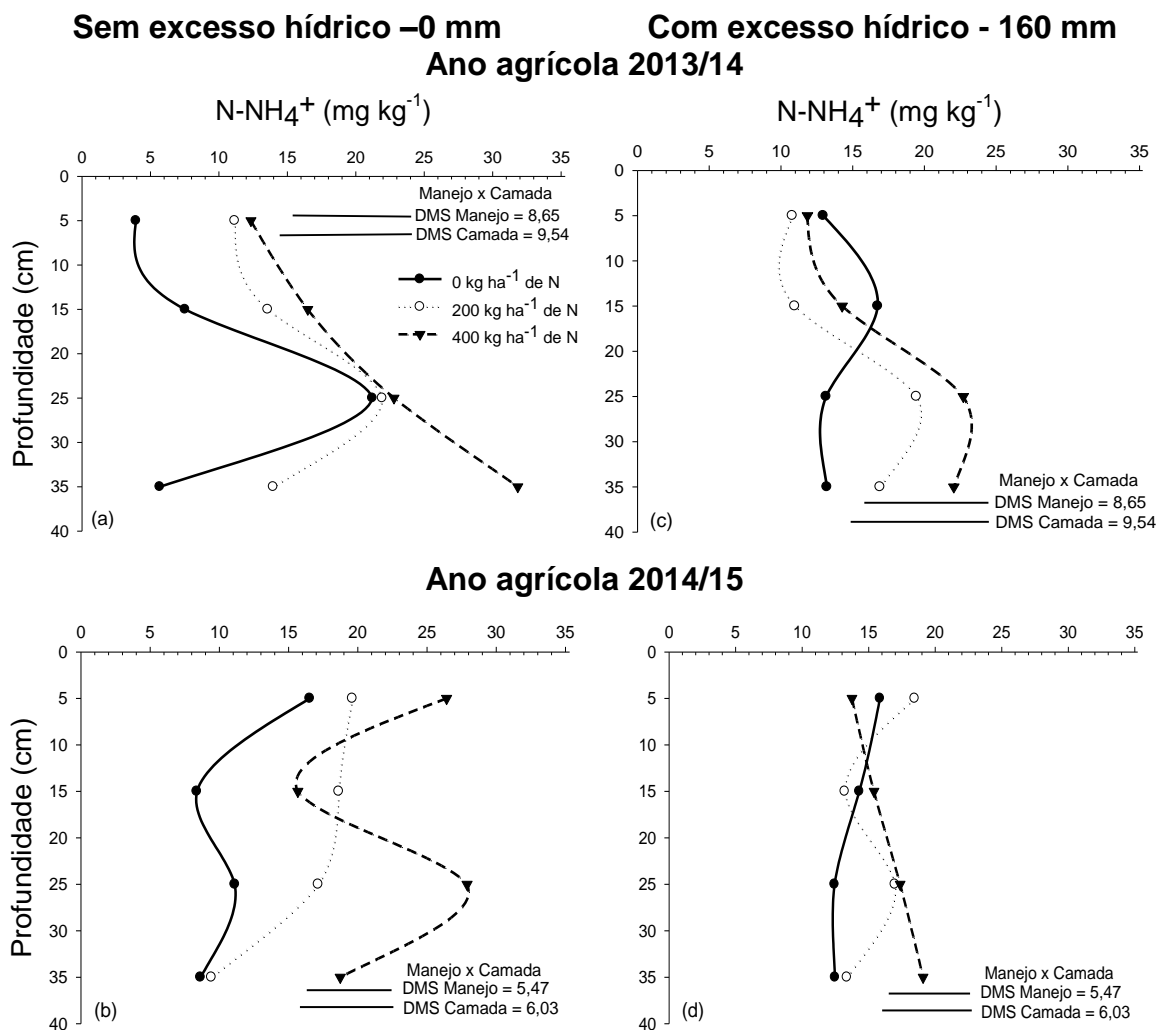


FIGURA 4.3. Nitrogênio amoniacal no solo em função de doses de nitrogênio em cobertura e de manejos da irrigação aplicados oito e 18 dias após a adubação nitrogenada, sem excesso hídrico (a;b) e com excesso hídrico (c;d) na amostragem de solo realizada 20 dias após a aplicação da adubação nitrogenada em cobertura no milho irrigado, em dois anos agrícolas. Eldorado do Sul, RS. A aplicação do N em cobertura foi realizada no estágio V<sub>3-4</sub>, segundo escala de Ritchie *et al.* (1993). A barra horizontal representa a DMS do teste de Tukey com nível de 5% de significância

Na terceira época de coleta do solo, que correspondeu no espigamento (66 DAE), os teores de N-NH<sub>4</sub><sup>+</sup> foram muito semelhantes nas camadas do solo amostradas, independentemente de manejo de irrigação e de dose de N aplicada. No manejo sem excesso hídrico (Figura 4.4a), os menores teores foram encontrados na camada de 20-40 cm. Já no manejo com excesso hídrico (Figura 4.4c), esses teores foram menores na camada de 10-20 cm do solo.



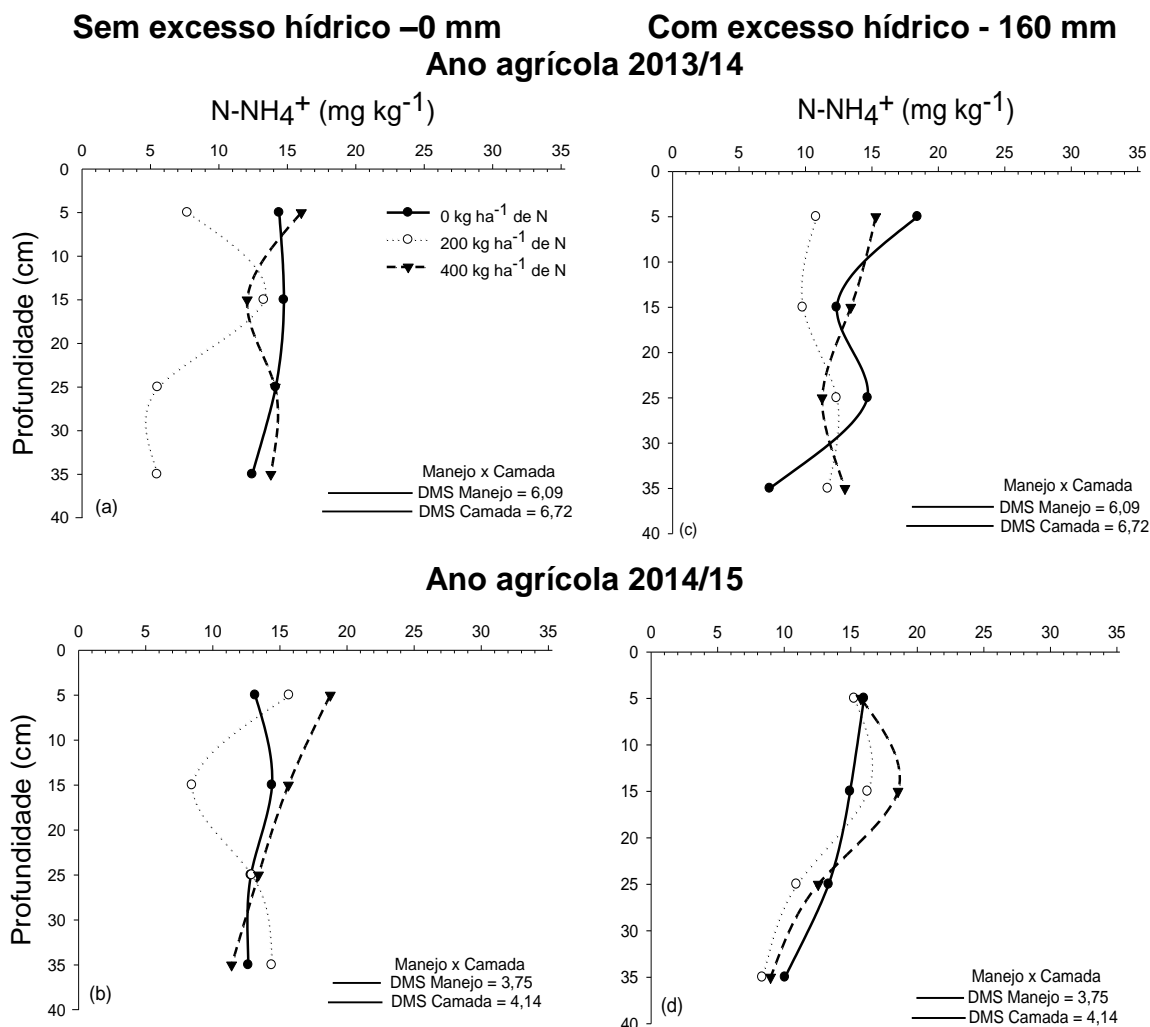
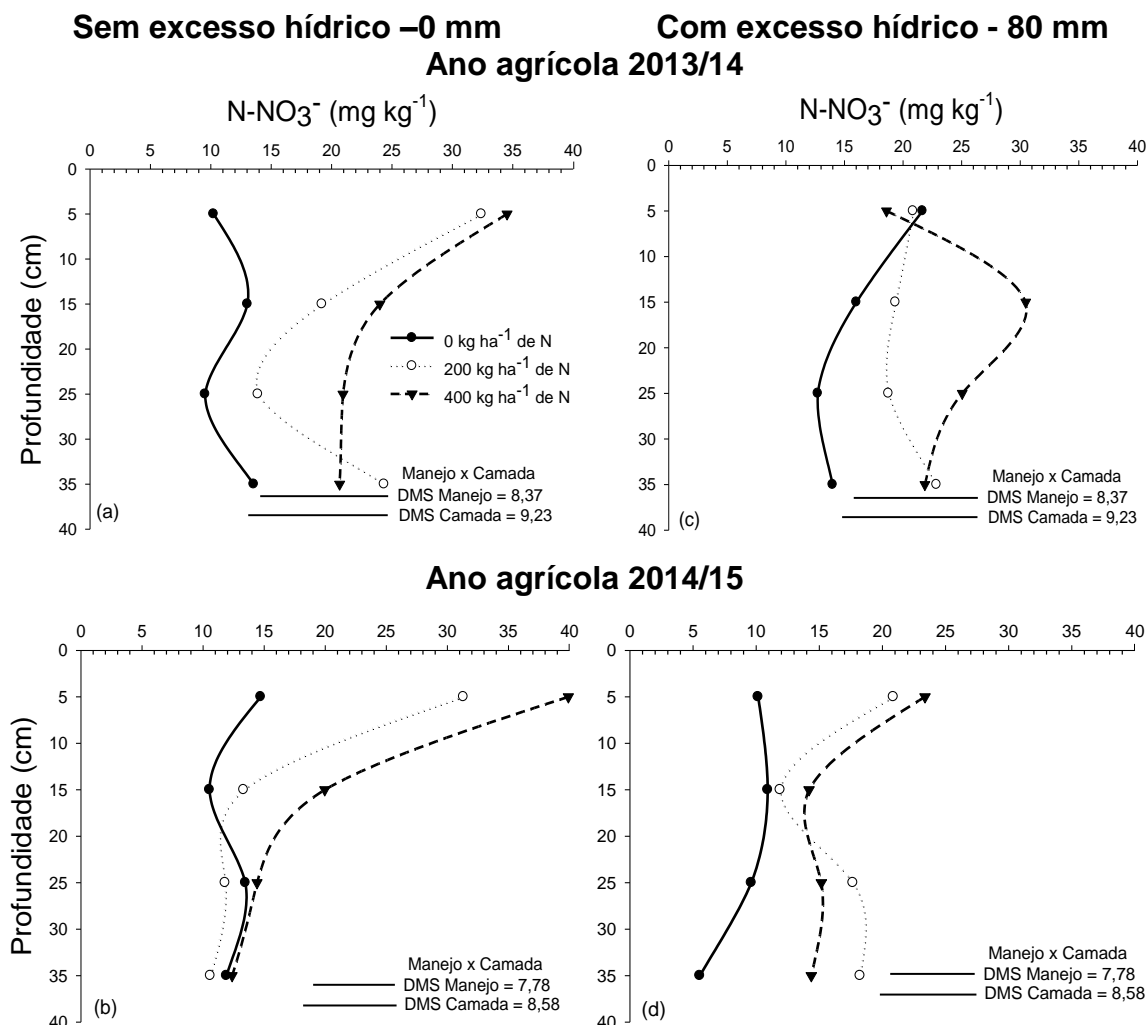


FIGURA 4.4. Nitrogênio amoniacal no solo em função de doses de nitrogênio em cobertura e de manejos da irrigação aplicados oito e 18 dias após a adubação nitrogenada, sem excesso hídrico (a;b) e com excesso hídrico (c;d) na amostragem de solo realizada 70 dias (espigamento) após a aplicação da adubação nitrogenada em cobertura no milho irrigado, em dois anos agrícolas. Eldorado do Sul, RS. A aplicação do N em cobertura foi realizada no estágio V<sub>3-4</sub>, segundo escala de Ritchie *et al.* (1993). A barra horizontal representa a DMS do teste de Tukey com nível de 5% de significância

Em relação ao nitrato (N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup>), na primeira época de amostragem do solo, foi observado incremento nos teores na camada mais superficial (0-20 cm). No entanto, esse acúmulo de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> no solo variou em relação ao manejo da irrigação. Quando aplicado um excesso hídrico de 80 mm, houve incremento dos teores até a camada de 10-20 cm do solo. Já no manejo sem excesso hídrico, o maior teor foi observado na camada superior (0-10 cm) (Figura 4.5a;c).



**FIGURA 4.5.** Nitrogênio nítrico no solo em função de doses de nitrogênio em cobertura e de manejos da irrigação aplicados após a adubação nitrogenada, sem excesso hídrico (a;b) e com excesso hídrico (c;d) na amostragem de solo realizada 10 dias após a aplicação da adubação nitrogenada em cobertura no milho irrigado, em dois anos agrícolas. Eldorado do Sul, RS. A aplicação do N em cobertura foi realizada no estágio V<sub>3-4</sub>, segundo escala de Ritchie *et al.* (1993). A barra horizontal representa a DMS do teste de Tukey com nível de 5% de significância.

Nesta primeira época de coleta, os teores de nitrato aumentaram à medida que se incrementou a dose de N. Observou-se, também, redução nos teores até a camada de 20-30 cm do solo, sendo muito similares na camada mais profunda (30-40 cm), independentemente de dose de N testada e manejo da irrigação.

Na segunda coleta, realizada aos 20 dias após a adubação nitrogenada, os maiores teores de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> foram observados na camada de 20-40 cm do solo, independentemente de manejo da irrigação (Figura 4.6a;c).

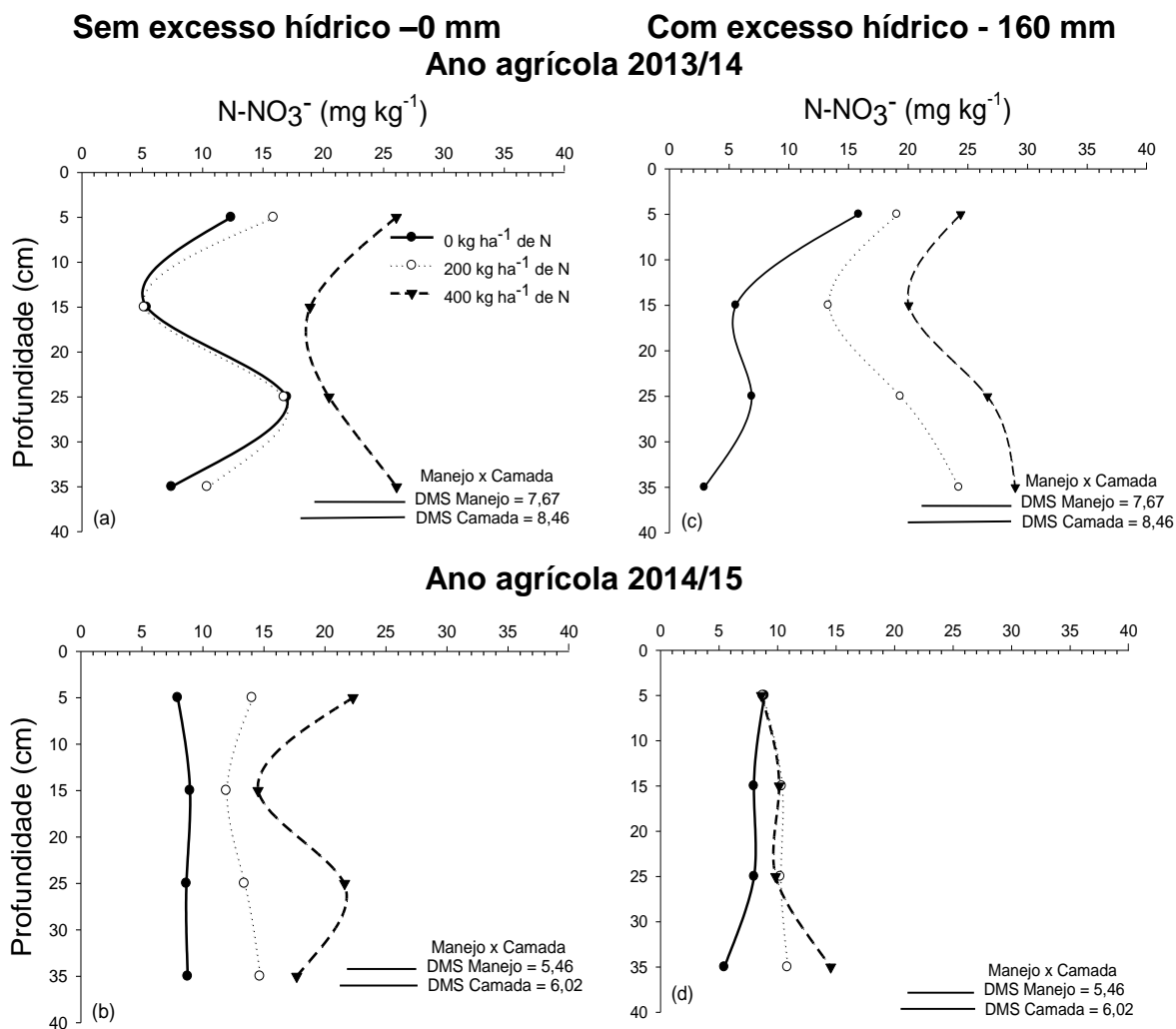


FIGURA 4.6. Nitrogênio nítrico no solo em função de doses de nitrogênio em cobertura e de manejos da irrigação aplicados oito e 18 dias após a adubação nitrogenada, sem excesso hídrico (a;b) e com excesso hídrico (c;d) na amostragem de solo realizada 20 dias após a aplicação da adubação nitrogenada em cobertura no milho irrigado, em dois anos agrícolas. Eldorado do Sul, RS. A aplicação do N em cobertura foi realizada no estágio V<sub>3-4</sub>, segundo escala de Ritchie *et al.* (1993). A barra horizontal representa a DMS do teste de Tukey com nível de 5% de significância.

Porém, na coleta realizada no espigamento (66 DAE), os teores de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> foram muito similares em todo o perfil do solo amostrado (0-40 cm), independentemente da aplicação ou não de um excesso hídrico (Figura 4.7a;c). Os menores teores foram observados na camada de 20-40 cm do solo, nos dois manejos da irrigação. Neste ano, os maiores teores de N-NO<sub>3</sub><sup>-</sup> no solo foram encontrados novamente com a aplicação da maior dose de N (400 kg ha<sup>-1</sup>).

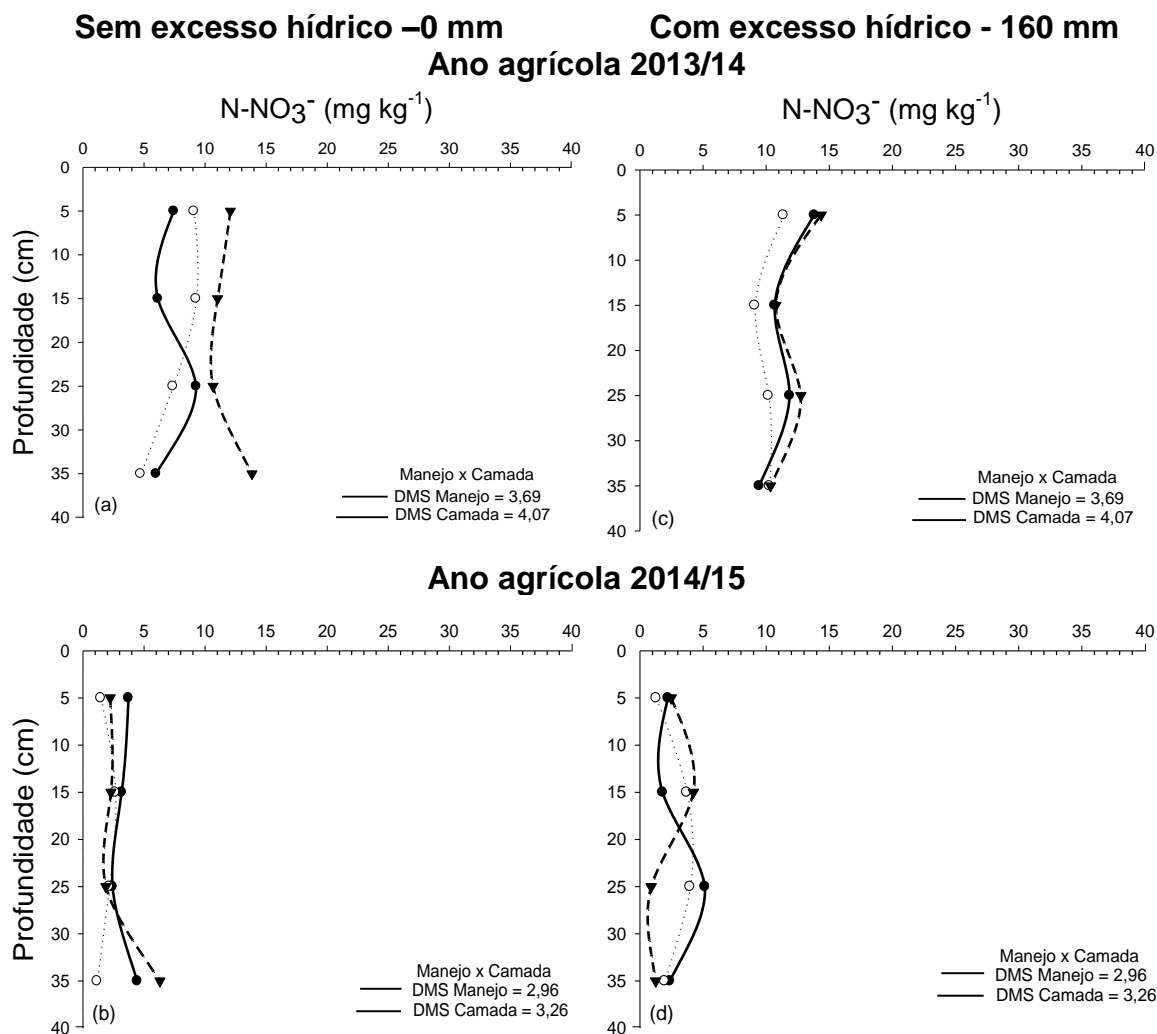


FIGURA 4.7. Nitrogênio nítrico no solo em função de doses de nitrogênio em cobertura e de manejos da irrigação aplicados oito e 18 dias após a adubação nitrogenada, sem excesso hídrico (a;b) e com excesso hídrico (c;d) na amostragem de solo realizada 70 dias (espigamento) após a aplicação da adubação nitrogenada em cobertura no milho irrigado, em dois anos agrícolas. Eldorado do Sul, RS. A aplicação do N em cobertura foi realizada no estágio V<sub>3-4</sub>, segundo escala de Ritchie *et al.* (1993). A barra horizontal representa a DMS do teste de Tukey com nível de 5% de significância.

No segundo ano (2014/15), foi registrado maior acumulado de precipitação (732 mm) durante o ciclo do milho. Essas precipitações foram distribuídas de forma mais regular que no primeiro ano, conforme mostra a Figura 4.1. Essa maior precipitação resultou em menor necessidade de suplementação por irrigação, sendo aplicado por irrigação apenas 170 mm de água, nos tratamentos sem excesso hídrico, e 330 mm nos tratamentos com excesso hídrico. No

entanto, as precipitações ocorridas foram de maiores intensidade e frequência. Neste ano, a maior precipitação pluvial registrada foi de 83 mm. Essa ocorreu oito dias após a aplicação do primeiro excesso hídrico (80 mm). Neste ano, o acumulado de água disponível para a cultura (precipitações+ irrigações) foi de 902 e 1.062 mm, respectivamente nos tratamentos sem e com excesso hídrico.

Na coleta realizada aos 10 dias após a aplicação do N foi observado maior variação dos teores de amônio ( $\text{N-NH}_4^+$ ) em profundidade do que no primeiro ano. Os maiores teores foram registrados na camada mais superficial (0-10 cm) do solo (Figura 4.2b;d). No entanto, também houve um aumento desses teores em camadas mais profundas (20-30 cm), independentemente de dose de N aplicada e manejo da irrigação. Nesta coleta, foram observados menores valores de  $\text{N-NH}_4^+$  no perfil do solo (0-40 cm), quando foi aplicado um excesso hídrico de 80 mm, em comparação ao manejo sem excesso hídrico. Quanto à dose de N aplicada, o tratamento testemunha apresentou os menores teores de amônio, quando comparado com as aplicações das doses de 200 e 400  $\text{kg ha}^{-1}$  de N, que apresentaram teores similares entre si, até a camada de 20-30 cm.

Na segunda época de coleta, realizada aos 20 dias após a adubação nitrogenada (Figura 4.3b;d), não foi evidenciado acúmulo de  $\text{N-NH}_4^+$  em nenhuma camada específica do solo, principalmente quando aplicado um excesso hídrico. Apenas, foi observado acúmulo de  $\text{N-NH}_4^+$  na camada de 20-30 cm, no manejo sem excesso hídrico e com a aplicação da maior dose de N. Em relação à dose de N, o tratamento testemunha (0  $\text{kg ha}^{-1}$  de N) apresentou novamente os menores teores de  $\text{N-NH}_4^+$ , sendo menores na camada mais profunda (30-40 cm) do solo. Além disso, os teores de  $\text{N-NH}_4^+$  aumentaram com a aplicação da maior dose de N, nos dois manejos da irrigação.

Na amostragem realizada no espigamento (70 DAE), os teores de  $\text{N-NH}_4^+$  foram muito semelhantes nas camadas de solo amostradas, independentemente de dose de N aplicada. No entanto, houve diferença nos teores de  $\text{N-NH}_4^+$  em relação ao manejo da irrigação. No manejo sem excesso hídrico (Figura 4.4b), os menores teores foram encontrados na camada de 10-20 cm. Já no manejo com excesso hídrico (Figura 4.4d), os teores foram menores na camada de 20-40 cm do solo. De maneira geral, foram observados menores teores de  $\text{N-NH}_4^+$  em todo

o perfil do solo amostrado (0-40 cm), quando foi aplicado um excesso hídrico de 160 mm em relação ao manejo sem excesso hídrico.

Em relação aos teores de nitrato, na primeira época de coleta do solo foram observados maiores teores na camada mais superficial (0-10 cm), nos dois manejos da irrigação (Figura 4.5). Nessa camada, os teores aumentaram com o incremento da dose de N aplicada. Observou-se, também, redução nos teores à medida que a profundidade de amostragem aumentava, nos dois manejos da irrigação. No entanto, no manejo com excesso hídrico foram observados menores teores de  $\text{N-NO}_3^-$  em comparação ao manejo sem excesso hídrico, principalmente na maior dose de N aplicada.

Assim como ocorreu na primeira época de coleta, na segunda época de coleta do solo, realizada aos 20 dias após, os teores de  $\text{N-NO}_3^-$  também foram maiores na camada mais superficial (0-10 cm), sendo observado também um acúmulo na camada de 20-30 cm do solo, independentemente do manejo da irrigação (Figura 4.6). Nessa época, os teores também aumentaram com o incremento da dose de N aplicada, sendo que as diferenças entre doses foram menores no manejo com excesso hídrico. Neste manejo, foi observado que na maior dose de N aplicada ( $400 \text{ kg ha}^{-1}$ ), os teores de nitrato continuaram aumentando até a camada mais profunda de amostragem do solo (30-40 cm) (Figura 4.6d).

Já na coleta realizada no espigamento (70 DAE), os teores de nitrato foram muito similares nas camadas amostradas, independentemente da dose de N aplicada e manejo da irrigação (Figura 4.7b;d).

#### **4.3.2 Rendimento de grãos e parâmetros de planta**

Para a característica rendimento de grãos (Tabela 4.1), no primeiro ano houve efeito apenas o efeito principal de doses de N ( $p < 0,05$ ). Entretanto, no segundo ano, foram significativos os efeitos principais de manejo da irrigação e doses de N. Para as variáveis rendimento de massa seca (Tabela 4.2) e N acumulado no espigamento (Tabela 4.3), houve interação de manejo da irrigação e doses de N em cobertura apenas no primeiro ano agrícola. Já para teor de N no

espigamento não foi significativo o efeito de manejo da irrigação e dose de N, nos dois anos agrícolas.

O rendimento de grãos variou de 8,77 a 15,09 Mg ha<sup>-1</sup> e de 3,97 a 15,12 Mg ha<sup>-1</sup>, respectivamente no primeiro e segundo anos (Tabela 4.1).

TABELA 4.1. Rendimento de grãos de milho em função de três doses de N em cobertura e dois manejos da irrigação, em dois anos agrícolas. Eldorado do Sul, RS.

Rendimento de grãos – Mg ha <sup>-1</sup>				
Manejo da irrigação <sup>3</sup>	Dose de N - kg ha <sup>-1</sup>			Média
	0	200 <sup>1</sup>	400	
----- mm -----	-----Ano agrícola 2013/14-----			
0	10,25	14,04	14,85	13,05 <sup>ns</sup>
160	8,77	13,78	15,09	12,55
Média	9,51 b	13,92 a	14,97 a	
CV <sup>2</sup> (%)	9,37			
----- mm -----	-----Ano agrícola - 2014/15-----			
0	4,97	11,69	15,12	10,59 A
160	3,97	10,48	14,20	9,55 B
Média	4,47 c	11,09 b	14,66 a	
CV <sup>2</sup> (%)	8,07			

<sup>1</sup>Dose única aplicada no estágio V<sub>3-4</sub>, segundo escala de Ritchie *et al.* (1993); <sup>2</sup>Coefficiente de Variação; <sup>3</sup>Aplicação de um excesso hídrico aos oito (80 mm) e 18 (80 mm) dias após a adubação nitrogenada em cobertura e sem aplicação; ns: não diferem significativamente pelo teste F (p<0,05); Letras minúsculas comparam doses dentro de manejo da irrigação, na linha e letras maiúsculas compararam manejo da irrigação dentro da dose de N, pelo teste de Tukey (p<0,05).

No primeiro ano, o rendimento de grãos aumentou até à aplicação da dose de 200 kg ha<sup>-1</sup> de N, mantendo-se estável com a aplicação da maior dose. Já no segundo ano, o rendimento de grãos aumentou até a maior dose de N aplicada (400 kg ha<sup>-1</sup>). A aplicação de um excesso hídrico de 160 mm de água após a adubação nitrogenada reduziu o rendimento de grãos em 10,9% em relação ao manejo sem excesso hídrico.

Para a característica rendimento de massa seca, no primeiro ano houve efeito de manejo da irrigação e dose de N. No manejo sem excesso hídrico, essa variável respondeu até à aplicação da dose intermediária (200 kg ha<sup>-1</sup> de N), mantendo-se estável com a aplicação da maior dose (Tabela 4.2). Já no manejo com excesso hídrico, houve resposta até à aplicação da maior dose de N (400 kg ha<sup>-1</sup>).

TABELA 4.2. Rendimento de massa seca de milho no espigamento em função de três doses de N em cobertura e dois manejos da irrigação na cultura do milho, em dois anos agrícolas. Eldorado do Sul, RS.

Massa seca – Mg ha <sup>-1</sup>				
Manejo da irrigação <sup>3</sup>	Dose de N - kg ha <sup>-1</sup>			Média
	0	200 <sup>1</sup>	400	
----- mm -----	-----Ano agrícola - 2013/14-----			
0	A 8,10 b	A 12,6 a	A 12,09 a	10,94
160	B 6,20 c	A 11,37 b	A 13,30 a	10,29
Média	7,15	12,01	12,69	
CV <sup>2</sup> (%)	8,67			
----- mm -----	-----Ano agrícola - 2014/15-----			
0	4,51	9,77	10,27	8,2 <sup>ns</sup>
160	4,53	9,79	10,26	8,2
Média	4,52 b	9,78 a	10,27 a	
CV <sup>2</sup> (%)	10,1			

<sup>1</sup>Dose única aplicada no estádio V<sub>3-4</sub>, segundo escala de Ritchie *et al.* (1993); <sup>2</sup>Coeficiente de Variação; <sup>3</sup>Aplicação de um excesso hídrico aos oito (80 mm) e 18 (80 mm) dias após a adubação nitrogenada em cobertura e sem aplicação; ns: não diferem significativamente pelo teste F (p<0,05); Letras minúsculas comparam doses dentro de manejo da irrigação, na linha e letras maiúsculas compararam manejo da irrigação dentro da dose de N, pelo teste de Tukey (p<0,05).

No segundo ano houve efeito de doses de N. Na média de manejos de irrigação, o rendimento de massa seca aumentou até à aplicação da dose de 200 kg ha<sup>-1</sup>, mantendo-se estável com o incremento da dose para 400 kg ha<sup>-1</sup> de N.

O teor de N na planta, no primeiro ano, aumentou até à aplicação da dose intermediária (200 kg ha<sup>-1</sup> de N), mantendo-se estável com a aplicação da maior



dose (Tabela 4.3). Já no segundo ano, na média de manejos da irrigação, o teor de N aumentou até à dose mais alta (400 kg ha<sup>-1</sup> de N).

TABELA 4.3. Teor de N na planta de milho no espigamento em função de três doses de N em cobertura e dois manejos da irrigação, em dois anos agrícolas. Eldorado do Sul, RS.

Teor de N – (%)				
Manejo da irrigação <sup>3</sup>	Dose de N - kg ha <sup>-1</sup>			Média
	0	200 <sup>1</sup>	400	
----- mm -----				
-----Ano agrícola - 2013/14-----				
0	0,99	1,66	1,58	1,41 <sup>ns</sup>
160	0,98	1,03	1,46	1,16
Média	0,99 b	1,34 ab	1,52 a	
CV <sup>2</sup> (%)	27,2			
----- mm -----				
-----Ano agrícola - 2014/15-----				
0	1,66	2,59	3,11	2,46 a
160	1,53	2,20	2,78	2,17 b
Média	1,59 c	2,39 b	2,94 a	
CV (%)	16,8			

<sup>1</sup>Dose única aplicada no estágio V<sub>3-4</sub>, segundo escala de Ritchie *et al.* (1993); <sup>2</sup>Coefficiente de variação; <sup>3</sup>Aplicação de um excesso hídrico aos oito (80 mm) e 18 (80 mm) dias após a primeira adubação nitrogenada em cobertura e sem aplicação; ns: não diferem significativamente pelo teste F (p<0,05); Letras minúsculas comparam doses dentro de manejo da irrigação, na linha e letras maiúsculas compararam manejo da irrigação dentro da dose de N, pelo teste de Tukey (p<0,05).

Para N acumulado na planta, houve interação de manejo da irrigação e doses de N, apenas no primeiro ano (Tabela 4.4). No manejo sem excesso hídrico, o N acumulado aumentou até à aplicação da dose intermediária, mantendo-se estável com a aplicação da maior dose (400 kg ha<sup>-1</sup> de N). Entretanto, no manejo com excesso hídrico, o N acumulado aumentou até a aplicação da dose mais alta. Já no segundo ano, na média de manejos da irrigação, o N acumulado aumentou até a aplicação da dose mais alta (400 kg ha<sup>-1</sup> de N).

TABELA 4.4. N acumulado no espigamento em função de três doses de N em cobertura e dois manejos da irrigação na cultura do milho, em dois anos agrícolas. Eldorado do Sul, RS.

N acumulado – kg ha <sup>-1</sup>				
Manejo da irrigação <sup>3</sup>	Dose de N - kg ha <sup>-1</sup>			Média
	0	200 <sup>1</sup>	400	
----- mm -----	-----Ano agrícola - 2013/14-----			
0	A 89,2 b	A 230,5 a	A 184,5 a	168,4 <sup>ns</sup>
160	A 71,9 b	B 131,4 b	A 215,4 a	141,0
Média	80,6	180,9	199,9	
CV <sup>2</sup> (%)	24,1			
----- mm -----	-----Ano agrícola - 2014/15-----			
0	73,5	252,9	320,3	215,6 <sup>ns</sup>
160	70,2	210,2	282,6	189,3
Média	71,9 c	234,0 b	301,4 a	
CV (%)	19,1			

<sup>1</sup>Dose única aplicada no estágio V<sub>3-4</sub>, segundo escala de Ritchie *et al.* (1993); <sup>2</sup>Coefficiente de variação; <sup>3</sup>Aplicação de um excesso hídrico aos oito (80 mm) e 18 (80 mm) dias após a primeira adubação nitrogenada em cobertura e sem aplicação; ns: não diferem significativamente pelo teste F (p<0,05); Letras minúsculas comparam doses dentro de manejo da irrigação, na linha e letras maiúsculas comparam manejo da irrigação dentro da dose de N, pelo teste de Tukey (p<0,05).

#### 4.4 DISCUSSÃO

Nos dois anos de avaliação, ocorreu elevada disponibilidade hídrica (precipitação + irrigação) durante o ciclo da cultura, próximos de 1.000 mm (Figura 4.1). Essa disponibilidade hídrica foi, aproximadamente, 68% acima das exigências do milho, que é em torno de 600 mm de água (Matzenauer *et al.*, 2002). Essa condição hídrica que a cultura foi exposta durante os dois anos, associada às características arenosas do solo (Streck *et al.*, 2008), pode favorecer as perdas de N, principalmente por lixiviação (Peng *et al.*, 2015). Em solos com textura argilosa, devido a menor movimentação de água no perfil e a maior interação do N com os sítios de reação do solo, as perdas por lixiviação podem ser minimizadas (Fontoura *et al.*, 2015; Mota *et al.*, 2015).

No primeiro ano, o rendimento de grãos aumentou até à aplicação da dose intermediária ( $200 \text{ kg ha}^{-1}$  de N), mantendo-se estável com a aplicação da maior dose (Tabela 4.1). Já no segundo ano, houve resposta até a maior dose de N aplicada ( $400 \text{ kg ha}^{-1}$ ). Essa resposta diferencial pode estar associada à época de semeadura, sendo a primeira semana de outubro (intermediária) e setembro (cedo) para o primeiro e segundo anos, respectivamente. Na semeadura em outubro foi observado maior desenvolvimento da parte aérea da planta e, conseqüentemente, de seu sistema radicular. Isso pode ter aumentado a capacidade de absorção de N do solo pela planta, reduzindo, assim, as perdas por lixiviação. Essa redução nas perdas pode ter aumentado a eficiência de uso do N pela planta, o que se refletiu em uma resposta até à dose intermediária ( $200 \text{ kg ha}^{-1}$ ), tanto para rendimento de grãos (Tabela 4.1), como para as características relacionadas ao desenvolvimento da planta (Tabelas 4.2; 4.3; 4.4).

Para a característica teor de N foram observados valores incoerentes (0,90 – 1,58%) com os obtidos em estudos anteriores, que variaram de 2-3,5% (Santos, 2010, Mota *et al.*, 2015). Com isso, devem ser desconsiderados, pois não são representativos e acabam influenciando também o N acumulado na parte aérea da planta, que também obteve valores que não são condizentes com os resultados obtidos nas demais características avaliadas e em relação aos teores de amônio e nitrato nas diferentes camadas do solo em cada época de coleta.

No segundo ano, houve resposta até a aplicação da maior dose de N, tanto para rendimento de grãos como para as características relacionadas ao desenvolvimento da planta (Tabelas 4.1; 4.2; 4.3; 4.4). Isto, também pode estar associado à época de semeadura considerada do cedo (setembro) para a cultura do milho. Nesta época, devido a menores temperaturas, tanto do ar como do solo, ocorre menor desenvolvimento da parte aérea da planta e de seu sistema radicular, reduzindo, assim, seu desenvolvimento inicial (Sangoi *et al.*, 2010) e, conseqüentemente a absorção do N do solo pelas raízes. Aos 20 dias após a primeira adubação nitrogenada, as plantas de milho com a época de semeadura em setembro encontravam-se no estágio  $V_7$ . Diferentemente do primeiro ano, em que o milho foi semeado em outubro e as plantas estavam num estágio mais avançado ( $V_9$ ). Esse menor desenvolvimento da planta, principalmente no início

do ciclo, pode ter reduzido a absorção do N pela planta favorecendo sua perda, devido à maior permanência do N na forma de nitrato, que é menos adsorvido aos colóides do solo (Fillery, 2007).

Além disso, há uma relação entre o desenvolvimento da parte aérea e do sistema radicular. O sistema radicular do milho representa 23 a 45% da matéria seca da parte aérea (Prakash *et al.*, 2002). e 4-6 % de seu N total acumulado (Lara Cabezas *et al.*, 2000). Com isso, o menor rendimento de massa seca da parte aérea está associado a menor desenvolvimento do sistema radicular e, conseqüentemente, da sua capacidade de exploração do solo. Com isso, o N do solo, principalmente na forma de nitrato, pode ficar mais disponível aos processos de perdas, como por lixiviação (Cantarella & Marcelino, 2008).

A resposta do rendimento de grãos e das características associadas ao estado nutricional da planta também pode estar relacionada aos teores de N-mineral do solo. Os teores de amônio foram similares nos dois anos agrícolas, em relação a cada época de coleta do solo e manejo da irrigação (Figuras 4.2; 4.3; 4.4). Essa resposta pode ser devida à maior capacidade de adsorção aos colóides do solo deste íon, em comparação ao nitrato, que é facilmente perdido por lixiviação (Arnuti, 2014). Além disso, pode ter ocorrido a transformação do amônio em nitrato no solo. Essa reação ocorre, aproximadamente, em uma ou três semanas após o início do processo de hidrólise (Cantarella, 2007; Sousa & Lobato, 2002). Isso pode explicar as menores diferenças entre os teores de amônio em relação às doses de N aplicadas e manejos da irrigação nas diferentes camadas do solo avaliadas.

Já os teores de nitrato foram mais influenciados pelo manejo da irrigação e doses de N durante o ciclo de desenvolvimento da planta, principalmente no segundo ano (Figuras 4.5; 4.6; 4.7). A menor disponibilidade de nitrato para a cultura ficou evidente na coleta realizada no espigamento (Figura 4.7), os teores disponíveis no perfil do solo avaliado foram muito menores no segundo ano quando comparados ao primeiro ano. No segundo ano, a menor disponibilidade de N para a cultura pode explicar a resposta das características avaliadas até a aplicação da maior dose de N (Tabelas 4.2; 4.3; 4.4). Apesar de que, a planta no estágio de espigamento já tenha absorvido cerca de 50 a 75% do N total

acumulado pelo milho (Cantarella & Duarte, 2004, Franco *et al.*, 2011). O menor desenvolvimento da planta no segundo ano, associado ao cultivo do milho em um solo com características arenosas, como os Argissolos, podem ter potencializado as perdas de N por lixiviação, o que acarretou em menores teores de N-mineral em todo perfil do solo avaliado.

#### 4.5 CONCLUSÃO

1. Quando o milho for semeado em uma época intermediária (outubro) o rendimento de grãos e as características relacionadas à absorção do N, respondem até a dose de 200 kg ha<sup>-1</sup>, devido a maior disponibilidade de N, que é evidenciada na coleta de solo no estágio de espigamento.
2. Quando o milho for semeado em uma época mais do cedo (setembro) são encontrados menores teores de N-mineral do solo no estágio de espigamento, o que reduz a sua disponibilidade para a planta, acarretando em uma resposta do rendimento de grãos de milho, teor e quantidade de N acumulada, apenas com a aplicação da maior dose de N (400 kg ha<sup>-1</sup>).
3. O teor de NH<sub>4</sub><sup>+</sup> no solo foi semelhante ao de NO<sub>3</sub><sup>-</sup>, nas mesmas coletas e profundidades do solo avaliadas, em ambos os manejos da irrigação.

#### 4.6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARNUTI, F. **Dinâmica do nitrogênio em Argissolo em função de irrigação e adubação nitrogenada do milho em planto direto**. 2014. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

BERGAMASCHI, H. et al. **Boletins agrometeorológicos da estação experimental agrônômica da UFRGS – série histórica 1970-2012**. Porto Alegre, RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013. Disponível em: <[http://www.ufrgs.br/agronomia/joomla/files/EEA/Srie\\_Meteorolgica\\_da\\_EEA-UFRGS.pdf](http://www.ufrgs.br/agronomia/joomla/files/EEA/Srie_Meteorolgica_da_EEA-UFRGS.pdf)>. Acesso em: 10 ago. 2015.

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

CANTARELLA, H.; MARCELINO, R. Fontes alternativas de nitrogênio para a cultura do milho. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n.122, p.12-14, 2008.

CANTARELLA, H.; MONTEZANO, Z. F. Nitrogênio e Enxofre. In: PROCHONOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R (Ed). **Boas Práticas para o uso eficiente de fertilizantes**. Piracicaba: INPI, 2010. v.2, p.1-65.

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

EPSTEIN, E.; BLOOM, A. J. **Nutrição mineral de plantas**. Princípios e perspectivas. Londrina: Editora Planta, 2006, 401p.

ERNANI, P.R. **Disponibilidade de nitrogênio e adubação nitrogenada para a macieira**. Lages: Graphel, 2003. 76p.

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

FERNANDES, F. S.; LIBARDI, P. L.; TRIVELIN, P. O. Parcelamento da adubação nitrogenada na cultura do milho e utilização do N residual pela sucessão aveia preta-milho. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.38, p.1138-1141, 2008.

FILLERY, I. R. P. Plant-based manipulation of nitrification in soil: a new approach to managing N loss? **Plant and Soil**, The Hague, v. 294, n. 1-2, p. 1-4, 2007.

FONTOURA, S. et al. **Fertilidade do solo e seu manejo em plantio direto no Centro-Sul do Paraná**. Guarapuava: Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária, 2015. 146 p.

FRANCO, H.C.J. et al. Nitrogen sugarcane derived from fertilizer under Brazilian field conditions. **Field Crops Research**, Amsterdam, v.121, p. 29-41, 2011.

GOMES, E.P. et al. Avaliação do medidor eletrônico de umidade do solo "Hidrofarm" em Latossolo Vermelho distroférico. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v.7, n.1, p.85-90, 2013.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/>>. Acesso em: 21 out. 2015.

LARA CABEZAS, W.A.R. et al. Balanço da adubação nitrogenada sólida e fluida de cobertura na cultura de milho, em sistema plantio direto no Triângulo Mineiro (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, p.363-376, 2000.

MATZENAUER, R. et al. **Consumo de água e disponibilidade hídrica para milho e soja, no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Fepagro, 2002. 105p. (BOLETIM Fepagro, 10).

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. (Agronomy Monograph, 49).

MOTA, M. R. et al. Fontes estabilizadas de nitrogênio como alternativa para aumentar o rendimento de grãos e a eficiência de uso do nitrogênio pelo milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 2, p. 512–522, 2015.

PENG, X. et al. A Laboratory Evaluation of Ammonia Volatilization and Nitrate Leaching following Nitrogen Fertilizer Application on a Coarse-Textured Soil. **Agronomy Journal**, Madison, v. 107, n. 3, p. 871 , 2015.

PRAKASH, V. et al. Annual carbon input to soil through rainfed soybean (Glycine max)-wheat (Triticum aestivum) cropping sequence in mid-hills of Northwest Himalaya. **Indian Journal of Agricultural Sciences**, v.72, p.14-17, 2002.

RITCHIE, S. W. et al. **How a corn plant develops**. Ames: Iowa State University of Science and Technology, 1993. 26 p. (Special Report, v. 48) Disponível em: <<http://www.maize.agron.iastate.edu/corngrows.html>>. Acesso em: 15 ago. 2014.

SAIZ-FERNÁNDEZ, I. et al. High nitrate supply reduces growth in maize, from cell to whole plant. **Journal of Plant Physiology**, New York, v.173, p.120-129, 2015.

SANGOI, L. et al. **Ecofisiologia da cultura do milho para altos rendimentos**. Lages: Graphel, 2010. 87p.

SANTOS, M.M. et al. Épocas de aplicação de nitrogênio em cobertura na cultura do milho em plantio direto, e alocação do nitrogênio (15N) na planta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, n.4, p.1185-1194, 2010.

SAS INSTITUTE. **Sas user's guide: statistics**. Cary, 2003. 846p.

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

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

TEDESCO, M. J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2.ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 175p (Boletim)

VARGAS, V. P. **Manejo da adubação nitrogenada na recuperação de estresses em milho**. 2010. 145 f. Dissertação. (Mestrado) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2010.

## 5 CAPÍTULO 3 – DESEMPENHO AGRONÔMICO DO MILHO EM FUNÇÃO DO PARCELAMENTO DA ADUBAÇÃO NITROGENADA EM COBERTURA EM ARGISSOLO

### RESUMO

O nitrogênio (N) é o principal nutriente exigido pelo milho. Entretanto, ele é facilmente perdido no sistema solo-planta-atmosfera, devido a sua complexa dinâmica no solo. Estratégias de manejo que visam otimizar seu uso e minimizar perdas, devem ser consideradas. Uma forma para aumentar a eficiência de uso do N pela planta é o parcelamento da adubação nitrogenada. Diante disso, o objetivo deste trabalho foi avaliar o efeito do parcelamento da adubação nitrogenada em cobertura, sob diferentes manejos da irrigação e de doses de N, sobre a absorção e a eficiência de uso do N pela planta e o rendimento de grãos de milho. O experimento foi conduzido em dois anos agrícolas, 2013/14 e 2014/15, em Eldorado do Sul-RS. O delineamento experimental utilizado foi de blocos casualizados, dispostos em parcelas subdivididas, com quatro repetições. Nas parcelas principais foram testados os manejos da irrigação, que consistiram da ausência ou da aplicação de uma quantidade total de 160 mm de água, sendo uma de 80 mm aos oito dias após a aplicação da primeira dose da adubação nitrogenada e uma, também de 80 mm, 18 dias após. Esses tratamentos foram considerados, respectivamente, com e sem excesso hídrico. Já nas subparcelas foram testados os manejos da adubação nitrogenada, que constaram da aplicação de três doses de N, 100, 200 e 400 kg ha<sup>-1</sup>. A aplicação do N foi de forma única em cobertura no milho (estádio V<sub>3-4</sub>, da escala de Ritchie *et al.* (1993)), e parcelada em duas vezes, sendo metade no estágio V<sub>3-4</sub> e metade no estágio V<sub>9-10</sub>. Uma testemunha sem aplicação de N em cobertura foi incluída. Quando o milho for semeado mais no cedo (setembro), o parcelamento da adubação nitrogenada se mostra vantajoso em relação à aplicação em dose única, apenas nas doses de 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup> de N. Doses maiores que 200 kg ha<sup>-1</sup> de N não é recomendado o parcelamento da adubação nitrogenada.



## 5 CHAPTER 3 - AGRONOMIC PERFORMANCE OF CORN IN FUNCTION OF PARCELING OF NITROGEN FERTILIZATION IN COVERAGE IN A ULTISOL

### ABSTRACT

Nitrogen (N) is the main nutrient demanded by corn. However, it is easily lost in the soil-plant-atmosphere system due to its complex dynamics in the soil. management strategies to optimize their use and minimize losses, should be considered. One form to increase use efficiency of N by the plant is the parceling of nitrogen fertilization. Thus, the objective of this research was to evaluate the effect of the parceled nitrogen fertilization under different managements of irrigation and N doses about uptake and use efficiency of N by the plant and the yield of corn grain. The experiment was conducted in two agricultural years 2013/14 and 2014/15, in Eldorado do Sul-RS. The experimental design used was randomized blocks with split plots. In main plots was allocated the managements of irrigation, which consisted of applying a total quantity of 160 mm of water, one 80 mm to eight days after the first dose of nitrogen fertilization and also 80 mm, 18 days, and a control without application of this amount of water. These treatments were considered, respectively, with and without water excess. In the subplot was allocated the managements of nitrogen fertilizer, which consisted of three doses, 100, 200 and 400 kg ha<sup>-1</sup> de N. The application of N was in unique ways in coverage in corn (V<sub>3-4</sub> stage, the scale of Ritchie *et al.* (1993) and split into two times, half the stadium V<sub>3-4</sub>, and V<sub>9-10</sub> half the stadium. A control without nitrogen as top dressing was included. When corn to seed more in early (September), the parceling of nitrogen fertilization shown advantageous for the application in a single dose only at doses of 100 and 200 kg ha<sup>-1</sup> of N. Doses higher than 200 kg ha<sup>-1</sup> N the parceling of nitrogen fertilization isn't recommended.

## 5.1 INTRODUÇÃO

O milho é uma das culturas mais exigentes em fertilizantes, especialmente os nitrogenados. O suprimento inadequado de nitrogênio (N) é considerado um dos principais fatores limitantes ao seu potencial produtivo, principalmente no estágio reprodutivo (Malavolta, 2006). Entretanto, nos estádios iniciais de desenvolvimento a planta de milho tem seu sistema radicular pouco desenvolvido. Devido a isso, explora pequeno volume de solo, sendo necessária a aplicação de uma quantidade de N adequada próxima às raízes, para suprir suas necessidades iniciais (Silva *et al.*, 2005).

Dentre as várias fontes nitrogenadas utilizadas na agricultura, a ureia é a mais difundida, devido a sua alta concentração de N (~44%) e a seu menor custo. Entretanto, a eficiência de uso do N é baixa, estando em torno de 50% (Lara Cabezas *et al.*, 2000; Saiz-Fernández *et al.*, 2015). As perdas de N do sistema solo-planta-atmosfera são devidas aos processos de volatilização, desnitrificação e lixiviação. Além dessas perdas, esse nutriente pode ser imobilizado temporariamente na biomassa microbiana do solo (Fontoura & Bayer, 2006).

Entre os mecanismos de perdas de N, destaca-se a lixiviação, que consiste na movimentação do N mineral disponível no solo para camadas mais profundas por ação da água (Ernani, 2008). Desta forma, esse nutriente não é absorvido pelas raízes das plantas, além de ser uma fonte de contaminação de águas superficiais e subterrâneas (Cerri *et al.*, 2009). Das formas de N presentes no solo, o íon nitrato é o mais facilmente perdido, pelo fato de ser muito solúvel, devido a sua baixa adsorção às partículas de solo (Cantarella & Marcelino, 2008). Essas perdas podem comprometer o sincronismo entre o N mineral disponível no solo e sua cinética de absorção pelas plantas (Basso *et al.*, 1999).

Além disso, podem ocorrer diferentes respostas da planta quanto à dose aplicada, à forma e à época de aplicação do N. Isso se deve ao efeito de algumas

variáveis que condicionam as transformações do N no solo, as quais são mediadas por microrganismos e dependentes de condições edafoclimáticas, sobretudo do tipo de solo, sistema de cultivo, precipitação pluvial e temperatura (Fernandes *et al.*, 2006; Sainz Rozas *et al.*, 2004).

Nesse sentido, estratégias de manejo que visem minimizar perdas e otimizar o uso de N, devem ser consideradas. Uma forma de aumentar a eficiência de uso do N pela planta é o parcelamento da adubação nitrogenada (Coelho *et al.*, 2006). Essa é uma prática recomendada para mitigar perdas do nutriente por lixiviação, principalmente em anos com alta precipitação pluvial e com aplicação de altas doses de N (Sexton *et al.* 1996). Dessa forma, o correto manejo da adubação nitrogenada deve procurar suprir a demanda das plantas nos períodos críticos, maximizar a eficiência agrônômica do N e minimizar o impacto ambiental, pela redução de perdas (Fernandes & Libardi, 2007).

Assim, a hipótese desse trabalho foi de que o parcelamento da adubação nitrogenada em milho diminui perdas por lixiviação e aumenta a absorção de N, resultando em aumento do rendimento de grãos e da eficiência de seu uso, especialmente sob condições de alta disponibilidade hídrica durante o ciclo de desenvolvimento da planta e de aplicação de altas doses de N.

Para testar essa hipótese, conduziu-se um experimento a campo, durante dois anos agrícolas, com o objetivo de avaliar o efeito do parcelamento da adubação nitrogenada em cobertura, sob três doses de N e da aplicação ou não de um excesso hídrico após o manejo da adubação nitrogenada, sobre a absorção e a eficiência de uso do N pela planta e o rendimento de grãos de milho.

## **5.2 MATERIAL E MÉTODOS**

### **5.2.1 Caracterização do ambiente**

A pesquisa foi conduzida a campo durante os anos agrícolas 2013/14 e 2014/15, em Eldorado do Sul, região ecoclimática da Depressão Central do Estado do RS. 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 (Bergamaschi *et al.*, 2013).

O solo da área experimental é classificado como Argissolo Vermelho Distrófico típico (Streck *et al.*, 2008). Esse solo é caracterizado por apresentar textura franco-arenosa no horizonte superficial e ser moderadamente profundo e moderadamente drenado. No primeiro ano, as amostras de solo foram coletadas em maio de 2013 e apresentaram os seguintes resultados: argila: 240 g kg<sup>-1</sup>; pH (água): 5.1; P: 24 mg dm<sup>-3</sup> (Mehlich-1); K: 178 mg dm<sup>-3</sup> (Mehlich-1); MO: 16 g kg<sup>-1</sup> e CTC: 9,2 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>, conforme Tedesco *et al.* (1995). No segundo ano, as amostras de solo foram coletadas em maio de 2014 e apresentaram os seguintes valores: argila: 250 g kg<sup>-1</sup>; pH (água): 5.1; P: 34 mg dm<sup>-3</sup> (Mehlich-1); K: 146 mg dm<sup>-3</sup> (Mehlich-1); MO: 20 g kg<sup>-1</sup> e CTC: 9,6 cmol<sub>c</sub> dm<sup>-3</sup>.

A área experimental está sendo cultivada em sistema de plantio direto há 25 anos. No verão, é feita rotação entre as culturas de soja e milho. No outono-inverno de 2013 e 2014 foi utilizada como cobertura de solo a aveia branca (*Avena sativa*). Essa cobertura foi dessecada com a aplicação do herbicida glifosato no início do mês de setembro e de agosto, respectivamente no primeiro e segundo anos.

### 5.2.2 Procedimento experimental

Nos dois anos, os tratamentos constaram de dois manejos da irrigação logo após a adubação nitrogenada e de diferentes manejos da adubação nitrogenada em cobertura no milho. Os manejos da irrigação consistiram da ausência ou da aplicação de uma quantidade de 160 mm de água, sendo uma de 80 mm aos oito dias e uma de 80 mm aos 18 dias após a aplicação da primeira dose da adubação nitrogenada. Esses tratamentos foram considerados, respectivamente, como “sem” e “com excesso hídrico”. O excesso hídrico de 160 mm aplicado foi baseado em estudos anteriores (Arnuti, 2014). Os manejos da adubação nitrogenada constaram da aplicação de três doses de N: 100, 200 e 400 kg ha<sup>-1</sup>, correspondendo, respectivamente, à recomendação para média (<10 Mg ha<sup>-1</sup>), alta (12 Mg ha<sup>-1</sup>) e muito alta (>14 Mg ha<sup>-1</sup>) expectativa de rendimento de grãos de milho. A aplicação de N foi de forma única em cobertura no milho no

estádio V<sub>3-4</sub>, da escala de Ritchie *et al.* (1993), e parcelada em duas vezes, sendo metade de cada uma das doses no estágio V<sub>3-4</sub> e metade no estágio V<sub>9-10</sub>. Uma testemunha sem aplicação de N em cobertura foi incluída.

O delineamento experimental utilizado foi de blocos casualizados, dispostos em parcelas subdivididas, com quatro repetições. O fator manejo da irrigação após a aplicação do adubo nitrogenado foi locado nas parcelas principais e o manejo da adubação nitrogenada nas subparcelas.

O milho foi semeado em 02 de outubro de 2013, considerada uma época intermediária de semeadura, e em 05 de setembro de 2014, considerada uma época antecipada, em sistema de semeadura direta. Nos dois anos, o híbrido reagente foi o Pioneer 1630H, de ciclo superprecoce, da empresa Pioneer Sementes, com tecnologia Bt. A adubação na semeadura constou da aplicação de 30, 180 e 90 kg ha<sup>-1</sup> de N, P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O, respectivamente. Utilizou-se a ureia com inibidor da urease, com tecnologia Agrotain, como fonte de adubo nitrogenado em cobertura. Para incorporar o N na solução do solo, procedeu-se uma irrigação de 20 mm de água, uniforme para todos os tratamentos, logo após a realização da primeira e da segunda aplicação de N, nos dois anos. A densidade de plantas utilizada foi de 90.000 plantas ha<sup>-1</sup>, com espaçamento entrelinhas de 0,5 m. Plantas daninhas, doenças e pragas foram controladas para não interferirem no rendimento de grãos.

Nos dois anos de condução do experimento, foi realizada irrigação complementar durante o ciclo de desenvolvimento da cultura, sempre que detectada a ocorrência de déficit hídrico. A frequência das irrigações foi determinada com base no monitoramento da umidade volumétrica do solo, através do sensor Hidro Farm, que utiliza a tecnologia ISAF (impedância do solo em alta frequência) (Gomes *et al.*, 2013). Considerou-se a umidade volumétrica de 20 % como limite inferior, ou seja, efetuou-se a irrigação sempre que foi atingido este valor nos sensores.

Na Figura 5.1 são apresentados os dados de precipitação pluvial registrada na área experimental e das irrigações complementares. Além disso, são especificadas as datas de realização da aplicação da adubação nitrogenada (N)

em cobertura e da aplicação dos excessos hídricos ( $\downarrow$ ), nos tratamentos correspondentes.

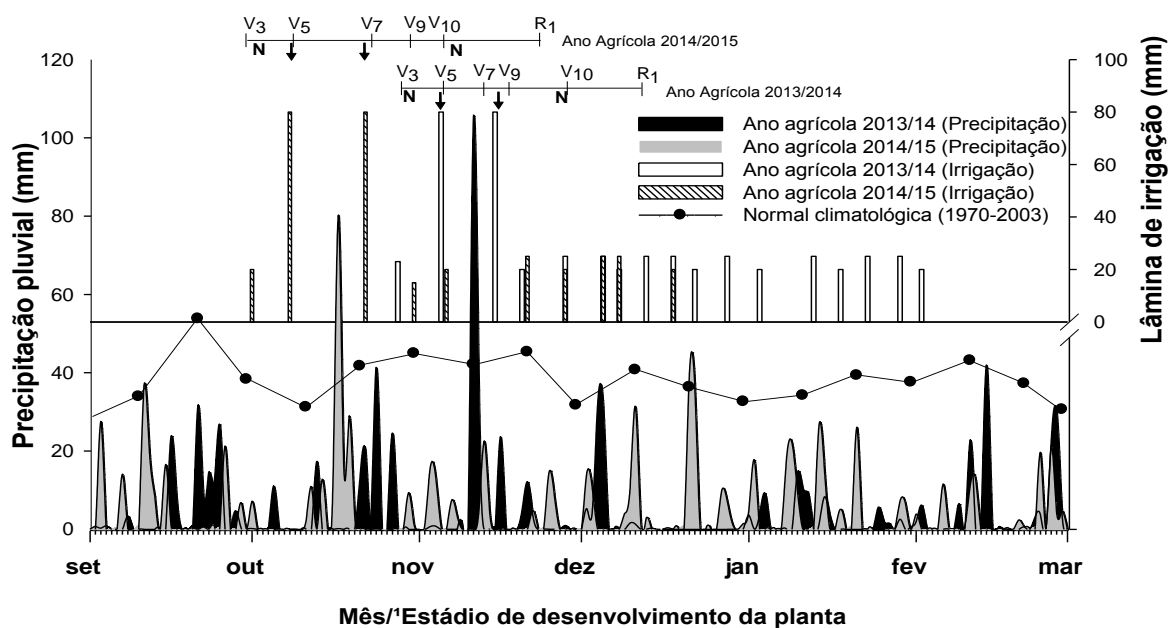


FIGURA 5.1. Distribuição diária das precipitações pluviais e das irrigações durante o desenvolvimento da cultura do milho nos dois anos agrícolas e à normal climatológica decenal do período de 1970 a 2003, Eldorado do Sul, RS. (N) indica a data de aplicação das adubações nitrogenadas e ( $\downarrow$ ) indica a aplicação do excesso hídrico (80 + 80 mm).<sup>1</sup> Conforme escala de Ritchie *et al.* (1993). Fonte: Bergamaschi *et al.* (2013) e INMET (2015).

Procedeu-se a colheita do milho quando todas as folhas se apresentavam senescidas e a umidade dos grãos estava abaixo de 25 %. As espigas das plantas da área útil foram colhidas manualmente.

As determinações realizadas foram rendimento de grãos, componentes do rendimento, eficiência de uso do N, rendimento de massa seca e teor e quantidade de N acumulado na parte área da planta no estágio R<sub>1</sub> (espigamento). O rendimento de grãos foi estimado em uma área útil de 10,0 m<sup>2</sup>, sendo expresso na umidade padrão de 130 g kg<sup>-1</sup>. O peso do grão foi obtido pela contagem manual de 200 grãos de cada unidade experimental, com posterior pesagem e correção de umidade para 130 g kg<sup>-1</sup> e divisão da massa obtida por 200. O número de grãos por espiga foi obtido por meio de relações entre peso do grão, peso total de grãos da amostra e número de espigas colhidas na área útil de cada unidade experimental. O número de espigas por metro quadrado foi obtido

dividindo-se o número de espigas colhidas pela área útil colhida em cada unidade experimental.

A eficiência agrônômica de uso do N (EAN) foi determinada segundo Fageria & Baligar (2005), em que  $EAN = (RGcf - RGsf) / (QNa)$ , expressa em  $kg\ kg^{-1}$ ; RGcf, rendimento de grãos com fertilizante nitrogenado; RGsf, o rendimento de grãos sem fertilizante nitrogenado e QNa, a quantidade de N aplicado, em  $kg\ ha^{-1}$ .

Para avaliação do rendimento de massa seca, foram coletadas quatro plantas em cada unidade experimental, que foram acondicionadas em estufa, sob temperatura de 60 °C, até atingir peso constante. Este material foi pesado e os valores obtidos foram extrapolados para  $Mg\ ha^{-1}$ . Já para a determinação do N acumulado na planta, as amostras utilizadas para estimar o rendimento de massa seca foram moídas. Após, fez-se a digestão do tecido com ácido sulfúrico, seguida por destilação por arraste de vapores e titulação, conforme método descrito por Tedesco *et al.* (1995). Os valores obtidos foram extrapolados para  $kg\ ha^{-1}$ .

### 5.3.3 Análise estatística

Os resultados das características avaliadas foram submetidos à análise de variância, utilizando-se programa estatístico SAS (SAS Institute, 2003), conforme o seguinte modelo:

$$Y_{ij} = \mu + B_i + I_j + \text{erro } a_{(ij)} + N_k + I_j N_k + \text{erro } b_{(ijk)},$$

onde:  $\mu$  = média geral do experimento; B = bloco; I = manejo da irrigação N = nitrogênio (dose);  $i = 1,2,3,4$ ;  $j = 1,2$ ;  $k = 1,2,\dots,7$  e Erro = erro experimental.

Para a análise de variância foi considerada a significância de  $p < 0,05$  para os efeitos principais e de  $p < 0,20$  para as interações, segundo descrito por Perecin & Filho (2008). Quando significativo, foi realizada a comparação de médias pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ).

## 5.4 RESULTADOS

Para melhor entendimento, a apresentação dos resultados será feita para cada ano agrícola e será dividida em três partes: inicialmente, serão descritos os dados dos regimes hídricos relativos aos anos agrícolas 2013/14 e 2014/15; em seguida, serão descritas as características rendimento de grãos, componentes do rendimento e EAN e, por fim, as características de planta relacionadas ao estado nutricional das plantas de milho. O apêndice contém o resumo da análise de variância dos dados relativos às características avaliadas.

Nos dois anos, houve interação significativa ( $p < 0,20$ ) de manejo da irrigação e manejo da adubação nitrogenada para as características rendimento de grãos, eficiência agrônômica de uso do N, número de grãos por espiga, rendimento de massa seca, teor e N acumulado na parte aérea da planta no estágio de espigamento. Apenas para as características número de espigas por metro quadrado, no primeiro ano, e peso do grão, nos dois anos, não houve interação desses dois fatores.

No primeiro ano (2013/14), foi registrado um acumulado de precipitação de 507 mm, durante todo o ciclo de desenvolvimento da cultura (Figura 5.1). No entanto, esse acumulado foi distribuído de forma irregular durante esse período, o que necessitou de 15 irrigações complementares, num total de 340 mm, nos tratamentos sem excesso hídrico, e de 500 mm, nos tratamentos com excesso hídrico. Essa maior necessidade de água deveu-se à condição climática do ano, que apresentou temperaturas elevadas e períodos mais frequentes de escassez de chuvas. Neste ano, não foram observadas precipitações de elevado volume no período, exceto a ocorrência de uma precipitação de 105 mm, seis dias após aplicação do primeiro excesso hídrico de 80 mm, correspondendo a 95% da média histórica para o mês de novembro. O acumulado de água disponível durante o ciclo do milho foi alto, sendo de 847 e 1.007 mm, respectivamente nos tratamentos sem e com excesso hídrico.

Na safra 2013/14, as características rendimento de massa seca, teor e quantidade de N acumulado na parte aérea da planta no espigamento não foram influenciadas pelo parcelamento do N (Tabela 5.2).



TABELA 5.1 Rendimento de massa seca, teor e quantidade de N acumulada no espigamento do milho irrigado em função de parcelamento da aplicação de três doses de N e de manejo da irrigação aos oito e 18 dias após a aplicação do adubo nitrogenado em cobertura. Eldorado do Sul, RS, 2013/14.

Manejo da irrigação	Dose de N - kg ha <sup>-1</sup>						Média	
	0		100		200			400
	Única	Parcelada <sup>2</sup>	Única	Parcelada	Única	Parcelada		
<b>Massa seca (Mg ha<sup>-1</sup>)</b>								
mm								
0	<sup>4</sup> A 8,10 c	A 11,98 ab	A 10,27 bc	A 12,64 a	A 11,07 ab	A 12,09 ab	A 12,60 a	11,25
160 <sup>1</sup>	B 6,20 c*	A 11,15 b	A 10,57 b	A 11,37 ab	A 11,01 b	A 13,30 a	A 12,64 ab	10,89
Média	7,15	11,56	10,42	12,00	11,04	12,69	12,62	
<sup>3</sup> CV (%)	8,3							
<b>Teor de N (%)</b>								
mm								
0	A 1,00 b	A 0,91 b	A 1,05 b	A 1,66 ab	A 1,57 ab	A 1,58 ab	A 2,01 a	1,40
160	A 0,98 a	A 0,89 a	A 1,16 a	A 1,03 a	A 1,16 a	A 1,46 a	B 1,31 a	1,14
Média	0,99	0,90	1,10	1,34	1,36	1,52	1,66	
CV (%)	27,9							
<b>N acumulado (kg ha<sup>-1</sup>)</b>								
mm								
0	A 89 b	A 118 b	A 120 b	A 231 a	A 194 a	A 185 a	A 280 a	174
160	A 72 b	A 111 ab	A 136 ab	B 131ab	A 141ab	A 215 a	A 197 a	143
Média	81	115	128	181	167	200	239	
CV (%)	28,7							

<sup>1</sup>Aplicada aos oito (80 mm) e 18 (80 mm) dias após a realização da primeira adubação nitrogenada em cobertura; <sup>2</sup>Metade aplicada no estágio V<sub>3-4</sub> e metade no estágio V<sub>9-10</sub>, conforme escala de Ritchie *et al*, (1993); <sup>3</sup>Coefficiente de variação; <sup>4</sup>Letra minúscula na linha compara média da mesma dose dentro do mesmo manejo da irrigação e letras maiúsculas na coluna comparam manejos da irrigação, <sup>5</sup>Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e/ou maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey (p<0,05).

Neste ano, o rendimento de grãos variou de 8,77 Mg ha<sup>-1</sup>, no tratamento testemunha, sem a aplicação de N em cobertura e sem excesso hídrico, a 15,92 Mg ha<sup>-1</sup> Mg ha<sup>-1</sup>, no tratamento com aplicação parcelada de 400 kg ha<sup>-1</sup> e com excesso hídrico (Tabela 5.2).

TABELA 5.2 Rendimento de grãos, componentes do rendimento e eficiência de uso do N (EAN) de milho irrigado em função de parcelamento da aplicação de três doses de N e de manejo da irrigação aos oito e 18 dias após a aplicação do adubo nitrogenado em cobertura. Eldorado do Sul, RS, 2013/14.

Manejo da irrigação	Dose de N - kg ha <sup>-1</sup>						Média	
	0		100		200			400
	Única	Parcelada <sup>2</sup>	Única	Parcelada	Única	Parcelada		
mm	<b>Rendimento de grãos (Mg ha<sup>-1</sup>)</b>							
0	<sup>5</sup> A 10,25b	A 12,01 ab	A 11,71 b	A 14,04 a	A 13,62 a	A 14,85 a	A 14,57 a	13,01
160 <sup>1</sup>	A 8,77 c*	A 13,48 a	A 13,1 b	A 13,78 a	A 14,42 a	A 15,09 a	A 15,92 a	13,51
Média	9,51	12,75	12,41	13,91	14,03	14,97	15,25	
<sup>3</sup> CV (%)	8,5							
mm	<b>Espigas m<sup>2</sup> (nº)</b>							
0	7,8	7,9	7,6	8,2	8,2	7,5	8,1	7,9 <sup>ns</sup>
160	8,0	7,9	7,8	8,0	8,1	7,7	8,1	7,9
Média	7,8 ab	7,8 ab	7,7 ab	8,1 ab	8,2 a	7,6 b	8,1 ab	
CV (%)	4,1							
mm	<b>Grãos espiga<sup>-1</sup> (nº)</b>							
0	A 505 b	A 570 b	A 561 b	A 629 b	A 588 b	A 743 a	A 642 b	606
160	B 385 b	A 658 a	A 617 a	A 620 a	A 608 a	A 671 a	A 698 a	608
Média	445	614	589	625	598	707	670	
CV (%)	10,1							
mm	<b>Peso do grão (mg)</b>							
0	261	268	279	271	281	269	280	273 <sup>ns</sup>
160	285	261	273	283	292	292	284	281
Média	273 <sup>ns</sup>	264	276	277	287	281	282	
CV (%)	5,3							
mm	<b>Eficiência de uso do N (kg kg<sup>-1</sup>)</b>							
0	<sup>4</sup> -	B 27,5 a	B 24,8 a	A 24,3 a	A 22,0 a	A 14,0 a	A 13,3 a	21,0
160	-	A 47,3 a	A 43,3 a	A 25,3 b	A 28,3 b	A 15,8 b	A 17,8 b	29,6
Média		37,4	34,0	24,8	25,1	14,9	15,5	
CV (%)	30,4							

<sup>1</sup>Aplicada aos oito (80 mm) e 18 (80 mm) dias após a realização da primeira adubação nitrogenada em cobertura; <sup>2</sup>Metade aplicada no estágio V<sub>3-4</sub> e metade no estágio V<sub>9-10</sub>, conforme escala de Ritchie *et al.* (1993); <sup>3</sup>Coefficiente de variação; <sup>4</sup>Ausência de resposta devido ser um valor utilizado como ponto inicial para o cálculo da EAN; <sup>5</sup>Letra minúscula na linha compara dose dentro do mesmo manejo da irrigação e letras maiúsculas na coluna comparam manejos da irrigação.\*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e/ou maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey (p<0,05).

Para a característica rendimento de grãos também não se observou vantagem do parcelamento da adubação nitrogenada em relação à aplicação em dose única, independentemente de dose de N utilizada e manejo da irrigação. No entanto, o rendimento de grãos respondeu de forma quadrática com o incremento da dose de N, independentemente se aplicada em dose única ou parcelada. As

doses de máxima eficiência técnica foram de 358, 313, 362 e 341 kg ha<sup>-1</sup> de N, respectivamente para os tratamentos sem excesso hídrico e dose única de N, sem excesso hídrico e dose parcelada de N, com excesso hídrico e dose única de N e com excesso hídrico e dose parcelada de N (Figura 5.2a).

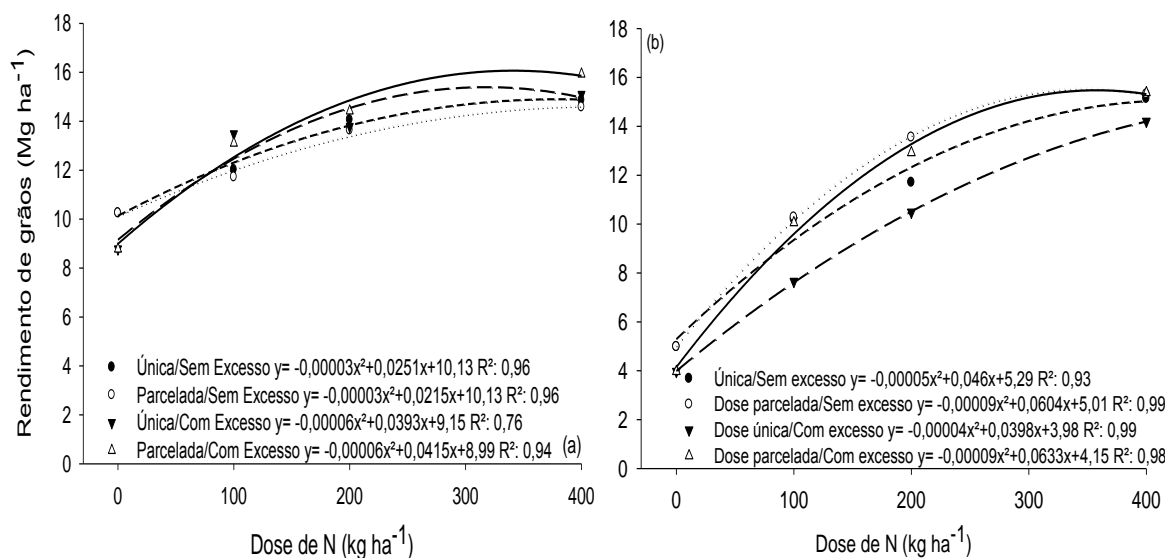


FIGURA 5.2 Rendimento de grãos de milho em função de manejo da irrigação e de dose e parcelamento da adubação nitrogenada. Eldorado do Sul-RS, 2013/14 (a) e 2014/15 (b).

De forma similar ao que foi verificado para rendimento de grãos, o parcelamento da aplicação do N, independentemente de dose e manejo da irrigação utilizados, não influenciou os componentes do rendimento, número de espigas m<sup>-2</sup>, número de grãos espiga<sup>-1</sup> e peso do grão, e a EAN (Tabela 5.1). Além disso, para a EAN foi observado redução em seus valores à medida que se incrementou a dose de N aplicada, independentemente de manejo da irrigação (Figura 5.3a).

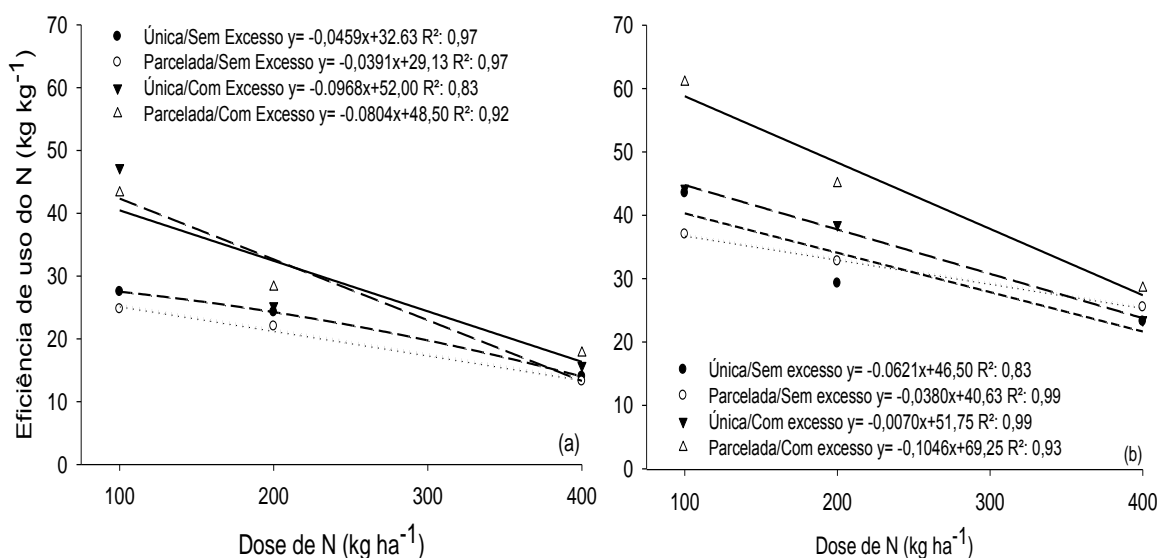


FIGURA 5.3 Eficiência de uso do N em função de manejo da irrigação e de dose e parcelamento da adubação nitrogenada. Eldorado do Sul-RS, 2013/14 (a) e 2014/15 (b).

No segundo ano (2014/15), foi registrado maior acumulado de precipitação (732 mm) durante o ciclo do milho. Essas precipitações foram distribuídas de forma mais regular que no primeiro ano, conforme mostra a Figura 5.1. Essa maior precipitação resultou em menor necessidade de suplementação por irrigação, sendo aplicados por irrigação apenas 170 mm de água, nos tratamentos sem excesso hídrico, e 330 mm nos tratamentos com excesso hídrico. No entanto, as precipitações ocorridas foram de maiores intensidade e frequência. Neste ano, a maior precipitação pluvial registrada foi de 83 mm. Essa ocorreu oito dias após a aplicação do primeiro excesso hídrico (80 mm). No segundo ano, o acumulado de água disponível para a cultura (precipitações+ irrigações) também foi alto, sendo de 902 e 1.062 mm, respectivamente nos tratamentos sem e com excesso hídrico.

Nesse ano, o rendimento de massa seca da parte aérea no espigamento também não foi influenciado pelo parcelamento da adubação nitrogenada, independentemente de manejo da irrigação (Tabela 5.3). Já o teor e a quantidade de N acumulada na parte aérea da planta no espigamento foram influenciados pelo parcelamento do N, apenas na dose de 100 kg ha<sup>-1</sup>, na média de manejos da irrigação. Com o parcelamento dessa dose, houve incrementos de 41 e 51 %,

respectivamente no teor e na quantidade de N acumulada na parte aérea. Nas doses de 200 e 400 kg ha<sup>-1</sup> de N, embora não significativo, observou-se uma tendência de se obter maiores valores numéricos nos tratamentos com parcelamento em relação à aplicação única. O teor e a quantidade de N acumulado na parte aérea no espigamento aumentaram até a aplicação da maior dose de N, na média de manejos da irrigação.

TABELA 5.3. Rendimento de massa seca, teor e quantidade de N acumulada de milho irrigado em função de parcelamento da aplicação de três doses de N e de manejo da irrigação aos oito e 18 dias após a aplicação do adubo nitrogenado em cobertura. Eldorado do Sul, RS, 2014/15.

Manejo da irrigação	Dose de N - kg ha <sup>-1</sup>						Média	
	0	100		200		400		
	Única	Parcelada <sup>2</sup>	Única	Parcelada	Única	Parcelada		
mm	----- <b>Massa seca (Mg ha<sup>-1</sup>)</b> -----							
0	<sup>4</sup> A 4,51 b	A 8,51 a	A 10,70 a	A 9,77 a	A 9,12 a	A 10,26 a	A 10,48 a	9,05
160 <sup>1</sup>	A 4,53 b	A 8,30 a	B 7,55 a	A 9,79 a	A 9,09 a	A 10,26 a	A 10,21 a	8,53
Média	4,52	8,41	9,13	9,78	9,11	10,26	10,35	
<sup>3</sup> CV (%)	14,5							
mm	----- <b>Teor de N (%)</b> -----							
0	1,66	2,04	2,53	2,59	2,90	3,11	3,50	2,62 <sup>ns</sup>
160	1,52	1,74	2,81	2,20	3,06	2,78	3,00	2,44
Média	1,59 d*	1,89 cd	2,67 ab	2,39 bc	2,98 ab	2,94 ab	3,25 a	
CV (%)	15,3							
mm	----- <b>N acumulado (kg ha<sup>-1</sup>)</b> -----							
0	73	175	270	253	262	320	379	248 <sup>ns</sup>
160	70	143	210	215	280	283	334	219
Média	72 d	159 c	240 b	234 b	271 b	301 ab	357 a	
CV (%)	19,6							

<sup>1</sup>Aplicada aos oito (80 mm) e 18 (80 mm) dias após a realização da primeira adubação nitrogenada em cobertura; <sup>2</sup>Metade aplicada no estágio V<sub>3-4</sub> e metade no estágio V<sub>9-10</sub>, conforme escala de Ritchie *et al.* (1993); <sup>3</sup>Coefficiente de variação; <sup>4</sup>Letra minúscula na linha compara dose dentro do mesmo manejo da irrigação e letras maiúsculas na coluna comparam manejos da irrigação. \*Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e/ou maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey (p<0,05).

Nesse segundo ano, em que o milho foi semeado numa época antecipada (setembro) houve maior variação no rendimento de grãos, sendo de 3,97 Mg ha<sup>-1</sup>, no tratamento testemunha sem N em cobertura e sem excesso hídrico, a 15,37 Mg ha<sup>-1</sup> Mg ha<sup>-1</sup>, no tratamento com aplicação parcelada de 400 kg ha<sup>-1</sup> de N e

sem excesso hídrico (Tabela 5.4). Em relação à aplicação em dose única, o parcelamento da adubação nitrogenada foi vantajoso quando se aplicou as doses de 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup> de N, somente nos tratamentos com excesso hídrico aplicado aos oito e 18 dias após a primeira adubação nitrogenada em cobertura. Com esse manejo da irrigação, o parcelamento do adubo nitrogenado aumentou em 33 e 12 % o rendimento de grãos em relação à aplicação em dose única, respectivamente nas doses de 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>. Com a aplicação da maior dose de N (400 kg ha<sup>-1</sup>) não houve vantagem do parcelamento. No entanto, houve resposta do rendimento de grãos até a aplicação da maior dose de N.

Além disso, o rendimento de grãos respondeu de forma quadrática com o incremento da dose de N aplicada. As doses de máxima eficiência técnica foram de 383, 375, 390 e 350 kg ha<sup>-1</sup> de N, respectivamente para os tratamentos sem excesso hídrico e dose única de N, sem excesso hídrico e dose parcelada de N, com excesso hídrico e dose única de N e com excesso hídrico e dose parcelada de N (Figura 5.2b).

Dos três componentes do rendimento, o número de grãos por espiga foi o mais associado ao rendimento de grãos, uma vez que o número de espigas por metro quadrado e o peso do grão foram similares com e sem parcelamento para uma dada dose de N, nos dois manejos da irrigação. A aplicação parcelada de N nas doses de 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup> aumentou o número de grãos por espiga em, respectivamente, 40 e 16 % em relação à aplicação única, nos tratamentos com excesso hídrico (Tabela 5.4). Com a aplicação da maior dose de N (400 kg ha<sup>-1</sup>), também não houve resposta desse componente ao parcelamento, similarmente ao que ocorreu com o rendimento de grãos. No entanto, o número de grãos por espiga aumentou até a aplicação da maior dose de N (400 kg ha<sup>-1</sup>), independentemente de manejo da irrigação.

TABELA 5.4 Rendimento de grãos, componentes do rendimento e eficiência de uso do N (EAN) de milho irrigado em função de parcelamento da aplicação de três doses de N e de manejo da irrigação aos oito e 18 dias após a aplicação do adubo nitrogenado em cobertura. Eldorado do Sul, RS, 2014/15.

Manejo da irrigação	Dose de N - kg ha <sup>-1</sup>						Média	
	0	100		200		400		
	Única	Parcelada <sup>2</sup>	Única	Parcelada	Única	Parcelada		
<b>Rendimento de grãos (Mg ha<sup>-1</sup>)</b>								
mm								
0	<sup>4</sup> A 4,97 d	A 10,19 c	A 10,27 c	A 11,69 bc	A 13,55 ab	A 15,12 a	A 15,30 a	11,59
160 <sup>1</sup>	A 3,97 e	B 7,65 d	A 10,05 c	B 10,48 c	A 12,92 b	A 14,2 ab	A 15,37 a	10,67
Média	4,47	8,92	10,16	11,09	13,24	14,66	15,34	
<sup>3</sup> CV (%)	8,0							
<b>Espigas m<sup>2</sup> (n°)</b>								
mm								
0	A 9,0 a*	A 9,5 a	A 8,7 a	A 8,0 a	A 8,2 a	B 7,3 a	A 7,0 a	8,2
160	A 7,9 a	A 7,8 a	A 8,1 a	A 8,4 a	A 8,7 a	A 9,2 a	A 8,3 a	8,3
Média	7,9	7,8	8,1	8,4	8,7	8,3	8,3	
CV (%)	14,9							
<b>Grãos espiga<sup>-1</sup> (n°)</b>								
mm								
0	A 207 c	A 419 b	A 428 b	A 463 b	A 480 ab	A 541 a	A 564 a	443
160	A 176 d	B 305 c	A 427 b	A 424 b	A 492 a	A 516 a	A 515 a	408
Média	191	362	427	443	486	528	540	
CV (%)	9,6							
<b>Peso do grão (mg)</b>								
mm								
0	300	303	296	312	333	350	332	318 <sup>ns</sup>
160	298	304	288	313	320	341	360	318
Média	299 cd	304 cd	292 d	313 bcd	327 abc	345 ab	346 a	
CV (%)	6,7							
<b>Eficiência de uso do N (kg kg<sup>-1</sup>)</b>								
mm								
0	<sup>4</sup> -	A 43,5 a	B 44,3 a	A 29,3 b	A 38,5 ab	A 23,3 b	A 23,5 b	33,7
160	-	A 37,0 bc	A 61,0 a	A 32,8 bc	A 45,0 b	A 25,5 c	A 28,5 c	38,3
Média		40,3	52,6	31,0	41,8	24,4	26,0	
CV (%)	18,8							

<sup>1</sup>Aplicada aos oito (80 mm) e 18 (80 mm) dias após a realização da primeira adubação nitrogenada em cobertura; <sup>2</sup>Metade aplicada no estádio V<sub>3-4</sub> e metade no estádio V<sub>9-10</sub>, conforme escala de Ritchie *et al.* (1993); <sup>3</sup>Coeficiente de variação; <sup>4</sup>Ausência de resposta devido ser um valor utilizado como ponto inicial para o cálculo da EAN; <sup>5</sup>Letra minúscula na linha compara dose dentro do mesmo manejo da irrigação e letras maiúsculas na coluna comparam manejos da irrigação. Médias seguidas pela mesma letra minúscula na linha e/ou maiúscula na coluna não diferem entre si pelo teste de Tukey (p<0,05).

No segundo ano, foi significativa a interação de manejo da irrigação e manejo do N para a EAN (Tabela 5.3). Houve vantagem do parcelamento da adubação nitrogenada em relação a sua aplicação em dose única apenas na dose de 100 kg ha<sup>-1</sup> de N, no manejo com excesso hídrico. O parcelamento dessa dose incrementou em 64% a EAN quando comparado a sua aplicação em dose única. Além disso, com o aumento da dose de N aplicada em cobertura houve redução na EAN, nos dois manejos da irrigação (Figura 5.3b).

## 5.5 DISCUSSÃO

Nos dois anos de experimento, a disponibilidade hídrica (precipitação + irrigação) durante o ciclo da cultura foi elevada, próxima de 1.000 mm (Figura 5.1). Essa disponibilidade hídrica foi, aproximadamente, 68% acima das exigências do milho, que é em torno de 600 mm de água (Matzenauer *et al.*, 2002). Essa condição hídrica que a cultura foi exposta durante os dois anos, associada às características arenosas do solo (Streck *et al.*, 2008) pode favorecer as perdas de N, principalmente por lixiviação (Peng *et al.*, 2015). Com isso, o parcelamento da adubação nitrogenada pode ser uma alternativa para minimizar essas perdas. Ao contrário, de solos com textura argilosa, que devido a maior interação do N com os colóides do solo e a menor percolação de água no perfil, as perdas de N por lixiviação podem ser reduzidas (Mota *et al.*, 2015) e a vantagem do parcelamento da adubação nitrogenada pode não ser verificada (Fontoura *et al.*, 2015).

No primeiro ano, para rendimento de grãos, componentes do rendimento, EAN e variáveis relacionadas ao estado nutricional da planta, não foi observada resposta ao parcelamento, para nenhuma das doses de N, mesmo nos tratamentos em que foi aplicado um excesso hídrico de 160 mm. Essa ausência de resposta pode ser explicada pelo fato de que nesse ano, a semeadura do milho ter sido realizada em outubro. A maior temperatura do ar e do solo proporcionou maior desenvolvimento da planta e, conseqüentemente, de seu sistema radicular, principalmente nos estádios iniciais (Bayer & Mielniczuk, 2008). Aos 20 dias após aplicação da adubação nitrogenada, as plantas de milho encontravam-se no estágio V<sub>9</sub>, segundo Ritchie *et al.* (1993). Isso pode ter favorecido a maior absorção do N do solo pela planta e a ausência de resposta ao parcelamento. Além disso, no solo o N é perdido preferencialmente na forma de nitrato (Quemada *et al.*, 2013). No entanto, o nitrato disponível no solo é obtido pela conversão do amônio, por microrganismos nitrificantes presentes no solo. Esse processo ocorre entre 15 e 30 dias após iniciada a hidrólise da ureia (Araújo *et al.*, 2004). Esse maior desenvolvimento inicial pode ter aumentado as taxas de



absorção de N, principalmente na forma de nitrato, reduzindo, assim, as perdas para áreas inexploradas pelo sistema radicular da planta.

Nesse primeiro ano, foi observada resposta do rendimento de grãos até à dose de 200 kg ha<sup>-1</sup> de N mantendo-se estável com a aplicação da dose mais alta (400 kg ha<sup>-1</sup>), nos dois manejos da irrigação. Essa resposta demonstra que, mesmo na dose intermediária, as exigências nutricionais da planta foram atendidas e as perdas por lixiviação podem ter sido minimizadas.

Para a característica teor de N foram observados valores incoerentes (0,9 – 2%) com os obtidos em estudos anteriores, que variaram de 2-3,5% (Santos, 2010, Mota *et al.*, 2015). Com isso, devem ser desconsiderados, pois não são representativos e acabam influenciando também o N acumulado na parte aérea da planta, que também obteve valores que não são condizentes com os resultados obtidos nas demais características avaliadas.

Já no segundo ano, houve resposta do rendimento de grãos ao parcelamento da adubação nitrogenada (Tabela 5.4). Porém, ela ocorreu apenas nos tratamentos com excesso hídrico de 160 mm. Essa resposta diferencial entre anos ao parcelamento pode estar associada novamente à época de semeadura. No segundo ano, a semeadura do milho foi realizada em uma época considerada do cedo (setembro). Nessa época, foi observado menor desenvolvimento da planta em relação ao das plantas do primeiro ano. Isso pode ser devido à ocorrência de menores temperaturas do solo e do ar, principalmente nos estádios iniciais de desenvolvimento da planta (Sangoi *et al.*, 2010). Essa condição pode ter reduzido, também, o desenvolvimento do sistema radicular. Com isso, pode ter ocorrido menor absorção de N pela planta e maior disponibilidade de N no solo, principalmente na forma de nitrato, sujeito a perdas. Aos 20 dias após a aplicação do adubo nitrogenado, o milho semeado em setembro encontrava-se no estágio V<sub>7</sub>, menos desenvolvido que no mesmo período de outubro (estádio V<sub>9</sub>), no primeiro ano.

Diferentemente do primeiro ano, no segundo ano houve resposta do rendimento de grãos até a maior dose de N aplicada (400 kg ha<sup>-1</sup>). (Tabela 5.2). Essa resposta pode explicar também as maiores perdas de N no sistema, devido

a menor absorção do nutriente pela menor área de exploração do sistema radicular.

O rendimento de massa seca da parte aérea no espigamento no segundo ano foi menor do que o verificado no primeiro ano (Tabela 5.3). Há uma relação entre o desenvolvimento da parte aérea e do sistema radicular. O sistema radicular do milho representa 23 a 45% da matéria seca da parte aérea (Prakash *et al.*, 2002).e 4-6 % de seu N total acumulado (Lara Cabezas *et al.*, 2000; Gava *et al.*, 2006). Com isso, o menor rendimento de massa seca resulta em menor desenvolvimento do sistema radicular e, conseqüentemente, na área de exploração de água e nutrientes do solo. Essa relação entre parte aérea e sistema radicular também pode explicar a resposta ao parcelamento do N apenas no segundo ano, quando foi realizada a semeadura do milho na época do cedo (setembro).

Dos três componentes do rendimento, o número de grãos por espiga foi o mais associado ao rendimento de grãos, uma vez que o número de espigas por metro quadrado e o peso do grão foram similares com e sem parcelamento para uma dada dose de N (Tabela 5.3). Para número de grãos por espiga o parcelamento foi vantajoso até às doses intermediárias de 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup> de N e no manejo com excesso hídrico. Com a aplicação da maior dose (400 kg ha<sup>-1</sup>), não houve resposta do parcelamento. Essa ausência de resposta pode ocorrer pela elevada dose de N aplicada em cobertura (Marcelino, 2009). Altas doses (400 kg ha<sup>-1</sup>) podem compensar as exigências nutricionais da planta, mesmo havendo perdas no sistema solo-planta-atmosfera. Esse maior suprimento de N na planta pode aumentar as taxas fotossintéticas da cultura, permitindo às plantas diferenciar maior número de espiguetas e produzir mais grãos por espiga (Mota *et al.*, 2015). Além disso, doses mais altas de N mantêm as folhas fisiologicamente ativas por mais tempo, prolongando a duração do período de enchimento de grãos e favorecendo a produção de grãos mais pesados (Silva *et al.*, 2005). No presente trabalho foram observados grãos mais pesados na maior dose de N aplicada (400 kg ha<sup>-1</sup>) (Tabela 5.4).

As características relacionadas ao estado nutricional da planta, teor e N acumulado na parte aérea também responderam ao parcelamento do N. Na

média de manejos da irrigação, foi observado que na menor dose de N ( $100 \text{ kg ha}^{-1}$ ) houve resposta do parcelamento para teor e N acumulado na planta. Essas características são indicadoras do estado nutricional da planta (Hurtado *et al.*, 2009, Rambo *et al.*, 2011) e, conseqüentemente, influenciam o potencial de rendimento da cultura. Isso pode explicar a maior necessidade de disponibilizar o N próximo às raízes da planta por um período mais prolongado, que foi atendido apenas quando foi parcelado o adubo nitrogenado.

Neste trabalho, o rendimento de grãos do tratamento testemunha, sem aplicação de N, variou muito entre anos (Tabelas 5.2;5.3). Nesse tratamento, o rendimento de grão e o rendimento da parte aérea no espigamento obtidos no segundo ano foram 212 e 158 % menores que o do primeiro ano. Essa variação pode ser explicada em função da época de semeadura do milho ter sido diferente entre anos. Possivelmente, as menores temperaturas do solo e do ar verificadas com a semeadura realizada em setembro minimizou o processo de mineralização da matéria orgânica no solo (Cantarella, 2007; Bayer & Mielniczuk, 2008). Isto proporcionou menor disponibilidade de N para a cultura do milho, refletindo-se em menor rendimento de grãos e de massa seca no tratamento testemunha, em relação ao primeiro ano. Essa resposta confirma os resultados obtidos por Menegatti, (2013) e por Menezes, (2015), no mesmo local.

A resposta do rendimento de grãos ao parcelamento foi observada apenas no segundo ano e quando foi aplicado um excesso hídrico. Essa resposta pode ter sido influenciada também pelo histórico da área. Essa área vem sendo cultivada há mais de vinte anos com sistema plantio direto. A presença de restos culturais e o não revolvimento do solo favorecem a manutenção e/ou aumento da fertilidade natural do solo (Anghinoni, 2007). Isso pode ter favorecido o desenvolvimento da planta e a manutenção da água no solo. Este fato que pode ter minimizado as perdas por lixiviação e a resposta ao parcelamento, mesmo em um solo com características arenosas, que possui baixa capacidade de retenção de água (Cardoso *et al.*, 2011). No entanto, o parcelamento da adubação nitrogenada é uma prática recomendada para reduzir perdas e contaminação do ambiente, além de aumentar a eficiência de uso do nutriente pela planta, mesmo que onere o custo de produção.

## 5.6 CONCLUSÕES

1. Quando o milho for semeado numa época intermediária (outubro), o parcelamento da dose de N não se mostra vantajoso em relação à aplicação em dose única, em termos de rendimento de grãos e eficiência de uso do N (EAN), independentemente de dose de N utilizada.
2. Quando o milho for semeado mais no cedo (setembro), o parcelamento da adubação nitrogenada se mostra vantajoso em relação à aplicação em dose única, apenas nas doses de 100 e 200 kg ha<sup>-1</sup> de N.
3. Doses maiores que 200 kg ha<sup>-1</sup> de N não é recomendado o parcelamento da adubação nitrogenada.

## 5.7 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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.

ARNUTI, F. **Dinâmica do nitrogênio em Argissolo em função de irrigação e adubação nitrogenada do milho em plantio direto**. 2014. 89 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2014.

BASSO, C.J. **Épocas de aplicação de nitrogênio para o milho cultivado em sucessão a plantas de cobertura de solo, sob sistema plantio direto**. 1999. 91 f. Dissertação (Mestrado) Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria 1999.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G. de A. et al. (Ed). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2.ed.rev. e atual. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p 7-18.

BERGAMASCHI, H. et al. **Boletins agrometeorológicos da estação experimental agrônômica da UFRGS – série histórica 1970-2012**. Porto Alegre, RS: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2013. Disponível em:

<[http://www.ufrgs.br/agronomia/joomla/files/EEA/Srie\\_Meteorologica\\_da\\_EEA-UFRGS.pdf](http://www.ufrgs.br/agronomia/joomla/files/EEA/Srie_Meteorologica_da_EEA-UFRGS.pdf)>. Acesso em: 10 ago. 2015.

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

CANTARELLA, H.; MARCELINO, R. Fontes alternativas de nitrogênio para a cultura do milho. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n.122, p.12-14, 2008.

CARDOSO, S. M. et al. Fontes e parcelamento do nitrogênio em cobertura, na cultura do milho sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Pernambuco, v.6, n.1, p.23-28, 2011.

CERRI, C. E. P. et al. Emissões de gases do efeito estufa do Brasil: importância da agricultura e pastagem. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.66, p. 831-843, 2009.

COELHO, A.M. et al. **Eficiência agronômica do cloreto de amônio e do bicarbonato de amônio como fontes de nitrogênio para a cultura do milho**. Sete Lagoas, MG: Editoração Eletrônica, 2006. 6 p. (Comunicado Técnico, EMBRAPA, 136).

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

FAGERIA, N.K.; BALIGAR, V.C. Enhancing nitrogen use efficiency in crop plants. **Advances in Agronomy**, San Diego, v.88, p.97-185, 2005.

FERNANDES, F. C. S.; LIBARDI, P. L. Percentagem de recuperação de nitrogênio pelo milho, para diferentes doses e parcelamentos do fertilizante nitrogenado. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 6, n. 3, p. 285-296, 2007.

FERNANDES, F.C.S. **Dinâmica do nitrogênio na cultura do milho (*Zea mays* L.), em cultivo sucessivo com aveia preta (*Avena strigosa*), sob implantação do sistema plantio direto**. 2006. 197 f. Tese (Doutorado). Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2006.

FONTOURA, S. V.; BAYER, C. **Manejo e fertilidade de solos em plantio direto**. Guarapuava-PR: Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária, 2006. 218 p.

FONTOURA, S. et al. **Fertilidade do solo e seu manejo em plantio direto no Centro-Sul do Paraná**. Guarapuava: Fundação Agrária de Pesquisa Agropecuária, 2015. 146 p.

GAVA, G.J.C. et al. Balanço do nitrogênio da uréia (15N) no sistema solo planta na implantação da semeadura direta na cultura do milho. **Bragantia**, Campinas, v.65, p.477-486, 2006.

GOMES, E.P. et al. Avaliação do medidor eletrônico de umidade do solo “Hidrofarm” em Latossolo Vermelho distroférico. **Revista Brasileira de Agricultura Irrigada**, Fortaleza, v.7, n.1, p.85-90, 2013.

HURTADO, S.M.C. et al. Variação espacial da resposta do milho à adubação nitrogenada de cobertura em lavoura no Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.44, p.300-309, 2009.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/>>. Acesso em: 21 out. 2015.

LARA CABEZAS, W.A.R. et al. Balanço da adubação nitrogenada sólida e fluida de cobertura na cultura de milho, em sistema plantio direto no Triângulo Mineiro (MG). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, p.363-376, 2000.

MALAVOLTA, E. **Manual de nutrição mineral de plantas**. São Paulo: Editora Agronômica Ceres, 2006. 638p.

MARCELINO, R. **Inibidor de nitrificação em fertilizantes nitrogenados e rendimento de milho**. 2009. 81 f. Dissertação (Mestrado). Instituto Agronômico, Campinas, 2009.

MATZENAUER, R. et al. **Consumo de água e disponibilidade hídrica para milho e soja, no Rio Grande do Sul**. Porto Alegre: Fepagro, 2002. 105p. (BOLETIM Fepagro, 10).

MENEGATI, G. B. **Estratégias de manejo para minimizar estresse por deficiência hídrica e para potencializar rendimento de grãos de milho irrigado**. 2013. 132 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013.

MENEZES, B. G. **Estratégias de manejo para minimizar perdas de N por volatilização e aumentar o rendimento de grãos de milho irrigado**. 2015. 75 f. Dissertação (Mestrado) – Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

MOTA, M. R. et al. Fontes estabilizadas de nitrogênio como alternativa para aumentar o rendimento de grãos e a eficiência de uso do nitrogênio pelo milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 2, p. 512–522, 2015.

PENG, X. et al. A Laboratory Evaluation of Ammonia Volatilization and Nitrate Leaching following Nitrogen Fertilizer Application on a Coarse-Textured Soil. **Agronomy Journal**, Madison, v. 107, n. 3, p. 871 , 2015.

PERECIN, D.; FILHO, A.C. Efeitos por comparações e por experimento em interações de experimentos fatoriais. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32,

n.1, p. 68-72, 2008.

PRAKASH, V. et al. Annual carbon input to soil through rainfed soybean (*Glycine max*)-wheat (*Triticum aestivum*) cropping sequence in mid-hills of Northwest Himalaya. **Indian Journal of Agricultural Sciences**, v.72, p.14-17, 2002.

QUEMADA, M. et al. Meta-analysis of strategies to control nitrate leaching in irrigated agricultural systems and their effects on crop yield. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 174, 1-10, 2013.

RAMBO, L. et al. Índices nutricionais de N e produtividade de milho em diferentes níveis de manejo e de adubação nitrogenada. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.46, p.390-397, 2011.

RITCHIE, S. W. et al. **How a corn plant develops**. Ames: Iowa State University of Science and Technology, 1993. 26 p. (Special Report, v. 48) Disponível em: <<http://www.maize.agron.iastate.edu/corngrows.html>>. Acesso em: 15 ago. 2014.

SAINZ ROZAS, H. R.; ECHEVERRÍA, H. E.; BARBIERI, P. A. Nitrogen balance as affected by application time and nitrogen fertilizer rate in irrigated no-tillage maize. **Agronomy Journal**, Madison, v. 96, n. 6, p. 1622-1631, 2004.

SAIZ-FERNÁNDEZ, I. et al. High nitrate supply reduces growth in maize, from cell to whole plant. **Journal of Plant Physiology**, New York, v.173, p.120-129, 2015.

SANGOI, L. et al. **Ecofisiologia da cultura do milho para altos rendimentos**. Lages: Graphel, 2010. 87p.

SANTOS, M.M. et al. Épocas de aplicação de nitrogênio em cobertura na cultura do milho em plantio direto, e alocação do nitrogênio (15N) na planta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, n.4, p.1185-1194, 2010.

SAS INSTITUTE. **Sas user's guide: statistics**. Cary, 2003. 846p.

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**, Madison, v.25, p.983-992, 1996.

SILVA, E. C. et al. Épocas e formas de aplicação de nitrogênio no milho sob plantio direto Em Solo De Cerrado. **Revista Brasileira de Ciencia do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 3, p. 725–733 , 2005.

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

TEDESCO, M. J. et al. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2.ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 175p (Boletim).

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

No capítulo sobre a disponibilidade de amônio e nitrato em Argissolo ao longo do ciclo e rendimento de grãos de milho (Capítulo 1) foram observados teores de amônio muito semelhantes na camada de solo avaliada (0-40 cm), nos dois anos agrícolas, independentemente de manejo da irrigação. No entanto, os teores de nitrato foram diminuindo ao longo do ciclo de desenvolvimento do milho no segundo ano em relação ao primeiro ano. A maior interação do íon amônio com os colóides do solo pode explicar a menor variação de seus teores no solo, diferente do nitrato que é facilmente perdido.

Neste primeiro capítulo, também foi observado que os maiores teores de amônio e nitrato no perfil do solo são encontrados nas primeiras três semanas após a aplicação do adubo nitrogenado. Essa resposta pode ser explicada pela alta disponibilidade de N logo após a aplicação da adubação nitrogenada. Nesse período, devido ao menor desenvolvimento inicial da planta e de seu sistema radicular a absorção do N é pequena.

Outro aspecto observado foi de que quanto maior a dose de N aplicada maior é o potencial de perdas de N no sistema solo-planta. Essa resposta foi confirmada no balanço de nitrato no solo. Altas doses de N podem atender as exigências nutricionais por N da planta. No entanto, a alta disponibilidade de N em um único momento para a planta pode favorecer sua perda para camadas inexploradas pelas raízes. No segundo ano, em que o milho foi semeado numa época mais do cedo (início de setembro), foram evidenciadas maiores perdas de N-mineral do sistema, o que pode explicar a resposta do rendimento de grãos de milho até à aplicação da maior dose de N (400 kg ha<sup>-1</sup>). No primeiro ano, o rendimento de grãos de milho respondeu até à dose intermediária de N (200 kg ha<sup>-1</sup>). O menor desenvolvimento da planta, que ficou mais evidenciado no



segundo ano, devido à época de semeadura do cedo, proporcionou menor absorção do N do solo e maiores perdas no sistema solo-planta e, conseqüentemente, menor rendimento de grãos, principalmente na dose intermediária ( $200 \text{ kg ha}^{-1}$ ).

Os resultados obtidos no Capítulo 1 apresentaram informações interessantes sobre a dinâmica do N no solo. Essas informações podem ser utilizadas para ajustar as entradas de N no sistema de acordo com as necessidades das culturas. Com isso, promove-se uma sintonia entre a demanda e a oferta, para diminuir o risco de perdas de N durante a estação de crescimento da cultura.

No Capítulo 2 foram avaliados os teores de amônio e nitrato no perfil do solo, a absorção de N pelas plantas e o rendimento de grãos de milho. As hipóteses do trabalho foram: a) a aplicação de um excesso hídrico aos oito e 18 dias após a aplicação da adubação nitrogenada potencializa as perdas de amônio e nitrato no perfil do solo e b) maiores perdas de N por lixiviação resultam em menor disponibilidade de N para absorção pelas plantas e, em consequência, em menores quantidades de N acumulado na planta, rendimento de massa seca e rendimento de grãos.

A primeira hipótese não foi confirmada, mesmo no segundo ano, em que o rendimento de grãos, o teor de N e a quantidade de N acumulado na planta responderam até à aplicação da maior dose de N ( $400 \text{ kg ha}^{-1}$ ). Essa resposta pode estar mais relacionada ao menor desenvolvimento da planta, que foi observado no segundo ano, quando o milho foi semeado mais no cedo (início de setembro). As temperaturas mais amenas do ar e do solo verificadas no segundo ano reduziram o desenvolvimento inicial da planta e a absorção do N do solo, favorecendo as perdas devido à alta disponibilidade do nutriente por um período maior de tempo no solo. No entanto, a segunda hipótese foi confirmada. No primeiro ano foi observada resposta do rendimento de grãos até à dose intermediária de N ( $200 \text{ kg ha}^{-1}$ ), mantendo-se estável com a aplicação da maior dose. Neste ano, foram observadas menores perdas de N por lixiviação, muito provavelmente pelo maior desenvolvimento da planta, devido à semeadura do milho mais tardia (outubro). Isto provavelmente determinou uma absorção mais

rápida de N pela planta, principalmente nos estádios iniciais, quando comparado ao segundo ano, em que as plantas apresentaram menor desenvolvimento. Isso se refletiu em maior disponibilidade de N no solo e maior eficiência de seu uso, reduzindo, assim, perdas por lixiviação.

As informações obtidas no Capítulo 2 sobre os teores de N-mineral no solo ao longo do perfil do solo e sua influência nas características relacionadas ao desenvolvimento da planta são muito importantes. Há poucos estudos sobre medição de perdas de N por lixiviação, sob condições de campo, nas diferentes camadas do solo. Com isso, essas informações podem servir de subsídios para monitorar a disponibilidade de N do solo e adequá-las com as necessidades da planta, maximizando assim, o potencial de rendimento.

Já no Capítulo 3 avaliou-se o efeito do parcelamento da adubação nitrogenada sobre o desempenho agrônômico do milho. A hipótese desse trabalho é de que o parcelamento da adubação nitrogenada em milho diminui perdas por lixiviação e aumenta a absorção de N. Isso resultaria em maior rendimento de grãos e eficiência de seu uso, especialmente sob condições de alta disponibilidade hídrica durante o ciclo de desenvolvimento da planta e sob altas doses de N. Essa hipótese foi confirmada apenas no segundo ano e somente sob condições de aplicação de um excesso hídrico de 160 mm. No segundo ano houve resposta do rendimento de grãos e da eficiência de uso do N ao parcelamento da adubação nitrogenada com a aplicação das doses intermediárias de N (100 e 200 kg ha<sup>-1</sup>). Com a aplicação da maior dose de N (400 kg ha<sup>-1</sup>) não foi observada resposta ao parcelamento, nos dois anos agrícolas, mesmo sob condições de excesso hídrico de 160 mm. A aplicação de altas doses de N pode acarretar em uma ausência de resposta ao parcelamento do N, devido à alta disponibilidade de N para a planta em estádios críticos, que definem o potencial de rendimento de grãos de milho.

A resposta do rendimento de grãos e do rendimento de massa seca da parte aérea no espigamento ao parcelamento do N ocorreu apenas no segundo ano e somente nos tratamentos com excesso hídrico. No segundo ano, o milho foi semeado numa época precoce (setembro), em que as plantas apresentaram menor desenvolvimento da parte aérea e, em consequência, do sistema radicular.

Esse menor desenvolvimento inicial da parte aérea da planta e de seu sistema radicular pode comprometer o sincronismo entre o N-mineral disponível no solo e sua cinética de absorção pelas plantas. Diante disso, o parcelamento do adubo nitrogenado pode ser uma alternativa para aumentar a disponibilidade de N para a cultura por um período maior de tempo e reduzir perdas, principalmente por lixiviação.

As informações obtidas na dissertação são de grande importância para o manejo e a recomendação de N na cultura do milho. A caracterização do comportamento do N-mineral no solo possibilita buscar novas estratégias para aumentar a eficiência de seu uso pela planta e reduzir perdas no sistema solo-planta-atmosfera. Com isso, sincronizar as exigências da planta em relação ao fornecimento de N pela adubação nitrogenada é de fundamental importância para tornar o sistema mais sustentável e com maior retorno econômico.

## 7 APÊNDICES

APÊNDICE 1. Quadrados médios obtidos na análise de variância do Capítulo 1 para teores de nitrato e amônio em função de épocas de coleta de solo ao longo do tempo no primeiro ano. Eldorado do Sul-RS, 2013/14.

Fontes de variação	Graus de liberdade	Análise de variância			
		N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>		N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	
		QM	Pr>Fc	QM	Pr>Fc
<b>Parcela principal</b>					
Blocos	2	1,947	0,551	7,281	0,308
Irrigação (I)	1	9,636	0,182	1,986	0,516
<b>Resíduo (a)</b>	2	2,392		3,244	
<b>Subparcela</b>					
Dose (N)	2	91,717	0,006	307,754	0,000
I x N	2	0,300	0,967	2,982	0,489
<b>Resíduo (b)</b>	8	8,967		3,808	
<b>Subsubparcela</b>					
Tempo (T)	3	322,079	0,000	374,006	0,002
<b>Resíduo (c)</b>	6	3,558		20,381	
I x T	3	11,804	0,094	32,755	0,002
N x T	6	24,286	0,002	88,318	0,000
I x N x T	6	30,446	0,0003	33,891	0,0002
<b>Resíduo (d)</b>	30	5,061		5,351	
<sup>1</sup> CV <sup>2</sup> Irrigação (%)			9,0		12,4
CV <sup>3</sup> Dose (%)			17,5		13,4
CV Tempo (%)			11,0		31,0
CV Resíduo d (%)			13,1		15,9

<sup>1</sup>CV: Coeficiente de Variação; Pr>0,05: não significativo; Pr<0,05: significativo; <sup>2</sup>Aplicada aos oito (80 mm) e 18 (80 mm) dias após a realização da primeira adubação nitrogenada em cobertura; <sup>3</sup>Metade aplicada no estádio V<sub>3-4</sub> e metade no estádio V<sub>9-10</sub>, conforme escala de Ritchie *et al.* (1993).

APÊNDICE 2. Quadrados médios e níveis de significância obtidos na análise de variância do Capítulo 1 para teores de nitrato e amônio em função de épocas de coleta ao longo do tempo no segundo ano. Eldorado do Sul-RS, 2014/15.

Fontes de variação	Graus de liberdade	Análise de variância			
		N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>		N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	
Parcela principal		QM	Pr>Fc	QM	Pr>Fc
Blocos	2	6,058	0,433	2,623	0,664
Irrigação (I)	1	12,616	0,241	54,496	0,083
<b>Resíduo (a)</b>	2	4,637		5,195	
<b>Subparcela</b>					
Dose (N)	2	145,164	0,000	88,229	0,001
I x N	2	37,754	0,017	12,863	0,135
<b>Resíduo (b)</b>	8	5,306		4,955	
<b>Subsubparcela</b>					
Tempo (T)	3	291,609	0,000	521,036	0,000
<b>Resíduo (c)</b>	6	2,636		2,575	
I x T	3	4,247	0,472	18,928	0,000
N x T	6	54,364	0,000	32,978	0,000
I x N x T	6	12,142	0,047	9,046	0,003
<b>Resíduo (d)</b>	30	4,933		2,103	
<sup>1</sup> CV <sup>2</sup> Irrigação (%)			15,02		23,69
CV <sup>3</sup> Dose (%)			16,07		23,14
CV Tempo (%)			11,33		16,68
CV Resíduo d (%)			15,49		15,07

<sup>1</sup>CV: Coeficiente de Variação; Pr>0,05: não significativo; Pr<0,05: significativo; <sup>2</sup>Aplicada aos oito (80 mm) e 18 (80 mm) dias após a realização da primeira adubação nitrogenada em cobertura; <sup>3</sup>Metade aplicada no estádio V<sub>3-4</sub> e metade no estádio V<sub>9-10</sub>, conforme escala de Ritchie *et al.* (1993).

APÊNDICE 3. Quadrados médios e níveis de significância obtidos na análise de variância do Capítulo 2 para teores de amônio em função de épocas de coleta no primeiro ano. Eldorado do Sul-RS, 2013/14.

Fontes de variação	Graus de liberdade	Coleta 10 dias após aplicação do adubo nitrogenado		Coleta 20 dias após aplicação do adubo nitrogenado		Coleta no espigamento	
		N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>		N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>		N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	
		QM	Pr>Fc	QM	Pr>Fc	QM	Pr>Fc
<b>Parcela principal</b>							
Blocos	2	1,987	0,875	55,664	0,119	2,165	0,772
Irrigação (I)	1	2,652	0,705	0,738	0,784	5,324	0,484
<b>Resíduo (a)</b>	2	13,964		7,545		7,353	
<b>Subparcela</b>							
Dose (N)	2	181,983	0,001	290,934	0,009**	128,922	0,009
I x N	2	99,883	0,004	60,789	0,218	30,564	0,187
<b>Resíduo (b)</b>	8	8,033		32,857		14,712	
<b>Subsubparcela</b>							
Camada (C)	3	17,104	0,019	382,931	0,000	31,139	0,078
<b>Resíduo (c)</b>	6	0,831		10,334		8,261	
I x C	3	4,539	0,405	54,849	0,048	11,842	0,295
N x C	6	14,164	0,017	79,831	0,003	18,146	0,100
I x N x C	6	11,472	0,042	81,236	0,003	24,59	0,033
<b>Resíduo (d)</b>	30	4,984		18,479		9,173	
<sup>1</sup> CV <sup>2</sup> Irrigação (%)			20,9		17,7		22,1
CV <sup>3</sup> Dose (%)			15,9		36,9		31,3
CV Camada de solo (%)			8,5		20,7		23,5
CV Resíduo d (%)			11,9		27,7		24,7

<sup>1</sup>CV: Coeficiente de Variação; Pr>0,05: não significativo; Pr<0,05: significativo; <sup>2</sup>Aplicada aos oito (80 mm) e 18 (80 mm) dias após a realização da primeira adubação nitrogenada em cobertura; <sup>3</sup>Metade aplicada no estágio V<sub>3-4</sub> e metade no estágio V<sub>9-10</sub>, conforme escala de Ritchie *et al.* (1993).

APÊNDICE 4. Quadrados médios obtidos na análise de variância do Capítulo 2 para teores de nitrato em função de épocas de coleta no primeiro ano. Eldorado do Sul-RS, 2013/14.

Fontes de variação	Graus de liberdade	Coleta 10 dias após aplicação do adubo nitrogenado		Coleta 20 dias após aplicação do adubo nitrogenado		Coleta no espigamento	
		N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	
		QM	Pr>Fc	QM	Pr>Fc	QM	Pr>Fc
<b>Parcela principal</b>							
Blocos	2	58,324	0,561	93,985	0,131	0,638	0,042
Irrigação (I)	1	4,243	0,834	81,366	0,140	98,677	0,003
<b>Resíduo (a)</b>	2	74,484		14,342		0,028	
<b>Subparcela</b>							
Dose (N)	2	724,482	0,006	1317,96	0,000	66,334	0,022
I x N	2	74,396	0,395	140,458	0,005	25,423	0,146
<b>Resíduo (b)</b>	8	71,161		12,898		10,327	
<b>Subsubparcela</b>							
Camada (C)	3	118,183	0,011	201,241	0,048	17,989	0,007
<b>Resíduo (c)</b>	6	12,358		41,646		1,616	
I x C	3	81,504	0,008	17,537	0,324	4,391	0,292
N x C	6	40,02	0,059	48,616	0,121	4,279	0,301
I x N x C	6	89,612	0,001	45,954	0,016	9,345	0,028
<b>Resíduo (d)</b>	30	17,303		14,537		3,369	
<sup>1</sup> CV <sup>2</sup> Irrigação (%)			43,3		23,3		16,8
CV <sup>3</sup> Dose (%)			42,3		22,2		31,9
CV Camada de solo (%)			17,6		39,8		12,6
CV Resíduo d (%)			20,9		23,5		18,2

<sup>1</sup>CV: Coeficiente de Variação; Pr>0,05: não significativo; Pr<0,05: significativo; <sup>2</sup>Aplicada aos oito (80 mm) e 18 (80 mm) dias após a realização da primeira adubação nitrogenada em cobertura; <sup>3</sup>Metade aplicada no estágio V<sub>3-4</sub> e metade no estágio V<sub>9-10</sub>, conforme escala de Ritchie *et al.* (1993).

APÊNDICE 5. Quadrados médios obtidos na análise de variância do Capítulo 2 para teores de amônio em função de épocas de coleta no segundo ano. Eldorado do Sul-RS, 2014/15.

Fontes de variação	Graus de liberdade	Coleta aos 10 dias após aplicação do adubo nitrogenado		Coleta aos 20 dias após aplicação do adubo nitrogenado		Coleta no espigamento	
		N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>		N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>		N-NH <sub>4</sub> <sup>+</sup>	
		QM	Pr>Fc	QM	Pr>Fc	QM	Pr>Fc
<b>Parcela principal</b>							
Blocos	2	19,781	0,801	2,871	0,918	0,314	0,913
Irrigação (I)	1	416,161	0,149	30,291	0,435	0,906	0,653
<b>Resíduo (a)</b>	2	79,728		32,453		3,308	
<b>Subparcela</b>							
Dose (N)	2	448,473	0,005	279,661	0,006	15,519	0,136
I x N	2	11,059	0,765	106,721	0,066	2,028	0,723
<b>Resíduo (b)</b>	8	39,914		27,596		5,999	
<b>Subsubparcela</b>							
Camada (C)	3	247,216	0,001	95,185	0,073	82,178	0,011
<b>Resíduo (c)</b>	6	7,899		24,325		8,826	
I x C	3	26,734	0,025	50,671	0,001	42,163	0,000
N x C	6	45,245	0,000	29,117	0,005	11,523	0,012
I x N x C	6	17,991	0,050	26,568	0,009	13,326	0,006
<b>Resíduo (d)</b>	30	7,461		7,395		3,483	
<sup>1</sup> CV <sup>2</sup> Irrigação (%)			43,7		35,9		13,4
CV <sup>3</sup> Dose (%)			30,9		33,1		18,1
CV Camada de solo (%)			13,8		31,1		21,9
CV Resíduo d (%)			13,4		17,1		13,8

<sup>1</sup>CV: Coeficiente de Variação; Pr>0,05: não significativo; Pr<0,05: significativo; <sup>2</sup>Aplicada aos oito (80 mm) e 18 (80 mm) dias após a realização da primeira adubação nitrogenada em cobertura; <sup>3</sup>Metade aplicada no estádio V<sub>3-4</sub> e metade no estádio V<sub>9-10</sub>, conforme escala de Ritchie *et al.* (1993).



APÊNDICE 6. Quadrados médios obtidos na análise de variância do Capítulo 2 para teores de nitrato em função de épocas de coleta no segundo ano. Eldorado do Sul-RS, 2014/15.

Fontes de variação	Graus de liberdade	Coleta aos 10 dias após aplicação do adubo nitrogenado		Coleta aos dias após aplicação do adubo nitrogenado		Coleta no espigamento	
		N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>		N-NO <sub>3</sub> <sup>-</sup>	
		QM	Pr>Fc	QM	Pr>Fc	QM	Pr>Fc
<b>Parcela principal</b>							
Blocos	2	0,903	0,867	25,249	0,617	8,994	0,024
Irrigação (I)	1	130,088	0,042	322,537	0,106	1,245	0,144
<b>Resíduo (a)</b>	2	5,919		40,798		0,228	
<b>Subparcela</b>							
Dose (N)	2	449,005	0,001	280,256	0,000	4,752	0,372
I x N	2	45,886	0,216	81,563	0,031	6,378	0,279
<b>Resíduo (b)</b>	8	24,648		14,707		4,243	
<b>Subsubparcela</b>							
Camada (C)	3	483,443	0,000	7,276	0,354	2,048	0,304
<b>Resíduo (c)</b>	6	9,983		5,546		1,354	
I x C	3	132,998	0,000	12,701	0,183	8,503	0,017
N x C	6	92,021	0,000	8,218	0,376	6,846	0,015
I x N x C	6	44,241	0,021	18,513	0,043	6,655	0,018
<b>Resíduo (d)</b>	30	14,957		7,364		2,165	
<sup>1</sup> CV <sup>2</sup> Irrigação (%)			15,5		55,1		17,8
CV <sup>3</sup> Dose (%)			31,7		33,1		76,6
CV Camada de solo (%)			20,2		20,3		43,3
CV Resíduo d (%)			24,7		23,4		54,7

<sup>1</sup>CV: Coeficiente de Variação; Pr>0,05: não significativo; Pr<0,05: significativo; <sup>2</sup>Aplicada aos oito (80 mm) e 18 (80 mm) dias após a realização da primeira adubação nitrogenada em cobertura; <sup>3</sup>Metade aplicada no estádio V<sub>3-4</sub> e metade no estádio V<sub>9-10</sub>, conforme escala de Ritchie *et al.* (1993).

APÊNDICE 7. Quadrados médios e níveis de significância obtidos na análise de variância do Capítulo 2 para rendimento de massa seca, teor e quantidade de N acumulado e rendimento de grãos de milho no primeiro ano. Eldorado do Sul-RS, 2013/14.

Fontes de variação	Graus de liberdade	Massa seca		Teor de N		N acumulado		Rendimento de grãos	
		QM	Pr>Fc	QM	Pr>Fc	QM	Pr>Fc	QM	Pr>Fc
<b>Parcela principal</b>									
Blocos	3	0,870	0,442	0,155	0,449	3100,88	0,547	0,082	0,974
Irrigação (I)	1	2,541	0,158	0,398	0,181	4880,23	0,328	1,505	0,353
<b>Resíduo (a)</b>	3	0,725		0,132		3591,11		1,252	
<b>Subparcela</b>									
Manejo (M)	2	72,968	0,000	0,578	0,030**	32904,1	0,000	67,061	0,000
I x M	2	5,403	0,013	0,213	0,216	8640,44	0,013	1,555	0,370
<b>Resíduo (b)</b>	12	0,848		0,122		1371,81		1,439	
<sup>1</sup> CV <sup>2</sup> Irrigação (%)			8,02		28,28		38,95		8,74
CV <sup>3</sup> Dose (%)			8,67		27,15		24,08		9,37

<sup>1</sup>CV: Coeficiente de Variação; Pr>0,05: não significativo; Pr<0,05: significativo; <sup>2</sup>Aplicada aos oito (80 mm) e 18 (80 mm) dias após a realização da primeira adubação nitrogenada em cobertura; <sup>3</sup>Metade aplicada no estágio V<sub>3-4</sub> e metade no estágio V<sub>9-10</sub>, conforme escala de Ritchie *et al.* (1993).

APÊNDICE 8. Quadrados médios e níveis de significância obtidos na análise de variância do Capítulo 2 para rendimento de massa seca, teor e quantidade de N acumulado e rendimento de grãos de milho no segundo ano. Eldorado do Sul-RS, 2014/15.

Fontes de variação	Graus de liberdade	Massa seca		Teor de N		N acumulado		Rendimento de grãos	
		QM	Pr>Fc	QM	Pr>Fc	QM	Pr>Fc	QM	Pr>Fc
<b>Parcela principal</b>									
Blocos	3	0,204	0,947	0,035	0,432	194,842	0,935	0,789	0,364
Irrigação (I)	1	0,001	0,985	0,495	0,025	4137,88	0,194	6,563	0,037
<b>Resíduo (a)</b>	3	1,815		0,029		1487,23		0,510	
<b>Subparcela</b>									
Dose (N)	2	81,242	0,000	0,3681	0,000	111402,7	0,000	213,751	0,000
I x N	2	0,001	0,999	0,034	0,798	795,386	0,569	0,045	0,932
<b>Resíduo (b)</b>	12	0,678		0,151		1344,843		0,662	
<sup>1</sup> CV <sup>2</sup> Irrigação (%)			16,45		7,33		19,05		7,09
CV <sup>3</sup> Dose (%)			10,05		16,80		18,12		8,07

<sup>1</sup>CV: Coeficiente de Variação; Pr>0,05: não significativo; Pr<0,05: significativo; <sup>2</sup>Aplicada aos oito (80 mm) e 18 (80 mm) dias após a realização da primeira adubação nitrogenada em cobertura; <sup>3</sup>Metade aplicada no estágio V<sub>3-4</sub> e metade no estágio V<sub>9-10</sub>, conforme escala de Ritchie *et al.* (1993).

APÊNDICE 9. Quadrados médios obtidos na análise de variância do Capítulo 3 para rendimento de grãos e outras características agrônômicas do milho no primeiro ano. Eldorado do Sul-RS, 2013/14.

Fontes de variação	Graus de liberdade	Rendimento de grãos	Nº de espigas m <sup>-2</sup>	Nº de grãos por espiga	Peso do grão	<sup>4</sup> Massa seca	Teor de N	<sup>4</sup> N acumulado	EAN
<b>Parcela principal</b>									
Blocos	3	0,881 <sup>ns</sup>	0,678 <sup>ns</sup>	3041,285 <sup>ns</sup>	124,017 <sup>ns</sup>	0,613 <sup>ns</sup>	0,662 <sup>ns</sup>	11329,922 <sup>ns</sup>	75,578 <sup>ns</sup>
Irrigação (I)	1	3,517 <sup>ns</sup>	0,025 <sup>ns</sup>	77,785 <sup>ns</sup>	986,161 <sup>ns</sup>	1,775 <sup>ns</sup>	0,917 <sup>ns</sup>	12802,329 <sup>ns</sup>	900,754 <sup>ns</sup>
<b>Resíduo (a)</b>	3	6,035	0,351	14608,404	605,065	1,179	0,505	10014,355	316.749
<b>Subparcela</b>									
Dose (N)	6	30,581 <sup>***</sup>	0,35351 <sup>**</sup>	54604,202 <sup>***</sup>	406,952 <sup>ns</sup>	29,259 <sup>***</sup>	0,627 <sup>***</sup>	23558,807 <sup>***</sup>	677,867 <sup>***</sup>
I x N	6	2,372 <sup>*</sup>	0,8113 <sup>ns</sup>	11490,869 <sup>***</sup>	310,702 <sup>ns</sup>	2,192 <sup>**</sup>	0,205 <sup>*</sup>	4889,3421 <sup>**</sup>	137,724 <sup>*</sup>
<b>Resíduo (b)</b>	36	1,275	0,10692	3731,956	213,375	0,845	0,125	2074,3794	59.905
<sup>1</sup> CV <sup>2</sup> Irrigação (%)		14,02	9,35	15,45	6,92	8,54	30,68	29,54	30,68
CV <sup>3</sup> Dose (%)		8,52	4,13	10,06	5,27	8,31	27,86	28,72	30,42

<sup>1</sup>CV: Coeficiente de Variação. ns: não significativo. \* Significativo pelo F-teste ao nível de 20% de probabilidade. \*\* Significativo pelo F-teste ao nível de 5% de probabilidade. \*\*\* Significativo pelo F-teste ao nível de 1% de probabilidade. <sup>2</sup>Aplicada aos oito (80 mm) e 18 (80 mm) dias após a realização da primeira adubação nitrogenada em cobertura; <sup>3</sup>Metade aplicada no estádio V<sub>3-4</sub> e metade no estádio V<sub>9-10</sub>; <sup>4</sup>No espigamento, segundo escala de Richie *et al.*, 1993.

APÊNDICE 10. Quadrados médios obtidos na análise de variância do Capítulo 3 para rendimento de grãos e outras características agrônômicas do milho no segundo ano. Eldorado do Sul-RS, 2014/15.

Fontes de variação	Graus de liberdade	Rendimento de grãos	Nº de espigas m <sup>-2</sup>	Nº de grãos por espiga	Peso do grão	<sup>2</sup> Massa seca	Teor de N	<sup>2</sup> N acumulado	EAN
Parcela principal									
Blocos	3	3,308 <sup>ns</sup>	0,984 <sup>ns</sup>	2811,303 <sup>ns</sup>	1862,161 <sup>ns</sup>	1,859 <sup>ns</sup>	0,239 <sup>ns</sup>	6337,017 <sup>ns</sup>	141,124 <sup>ns</sup>
Irrigação (I)	1	11,886 <sup>***</sup>	0,078 <sup>ns</sup>	17608,018 <sup>***</sup>	3,017 <sup>ns</sup>	3,733 <sup>ns</sup>	0,423 <sup>ns</sup>	11343,017 <sup>***</sup>	255,722 <sup>**</sup>
Resíduo (a)	3	0,599	0,451	673,827	1,643,208	0,753	0,144	2,531,589	23,451
Subparcela									
Dose N)	6	112,978 <sup>***</sup>	0,809 <sup>ns</sup>	115415,1 <sup>***</sup>	3838,404 <sup>***</sup>	32,215 <sup>***</sup>	2,948 <sup>***</sup>	70621,351 <sup>***</sup>	930,719 <sup>***</sup>
I x N	6	1,417 <sup>*</sup>	3,318 <sup>*</sup>	3327,434 <sup>*</sup>	365,976 <sup>ns</sup>	2,708 <sup>*</sup>	0,174 <sup>ns</sup>	1413,851 <sup>ns</sup>	111,059 <sup>*</sup>
Resíduo (b)	36	0,801	1,527	1658,482	455,309	1,631	0,149	2094,664	46,048
<sup>1</sup> CV <sup>2</sup> Irrigação (%)		6,96	8,09	6,10	5,16	9,87	14,99	21,54	13,48
CV <sup>3</sup> Dose (%)		8,04	14,92	9,57	6,71	14,52	15,25	19,60	18,84

<sup>1</sup>CV: Coeficiente de Variação. ns: não significativo. \* Significativo pelo F-teste ao nível de 20% de probabilidade. \*\* Significativo pelo F-teste ao nível de 5% de probabilidade. \*\*\* Significativo pelo F-teste ao nível de 1% de probabilidade. <sup>2</sup>Aplicada aos oito (80 mm) e 18 (80 mm) dias após a realização da primeira adubação nitrogenada em cobertura; <sup>3</sup>Metade aplicada no estádio V<sub>3-4</sub> e metade no estádio V<sub>9-10</sub>; <sup>4</sup>No espigamento, segundo escala de Richie *et al.*, 1993.

## 8 VITA

Natan Henrique Ferrari Pagliarini, filho de Jussará Ferrari Pagliarini e Leocir Pagliarini, nasceu em 29 de novembro de 1990, em Selbach, Rio Grande do Sul, Brasil.

Concluiu em 2008, o Ensino Médio concomitante com o Técnico em Agropecuária no Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia (IFET), *campus* Sertão-RS.

Em 2009 ingressou na Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Pampa (UNIPAMPA), onde desenvolveu atividades como bolsista de iniciação durante o segundo semestre letivo. Em 2010, ingressou na Faculdade de Agronomia da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), *campus* Frederico Westphalen, RS. Entre os anos de 2010 a 2013 desenvolveu atividades como bolsista de iniciação científica no Departamento de Plantas de Lavoura sob orientação do Dr. Claudir José Basso. No período de 2013 a 2014 desenvolveu atividades como bolsista de iniciação científica na Estação Experimental do Arroz do Instituto Rio Grandense do Arroz (IRGA), em Cachoeirinha, RS, sob orientação dos pesquisadores Dra. Claudia Lange e Msc. Anderson Vedelago.

Graduou-se Engenheiro Agrônomo em fevereiro de 2014. Em março de 2015 ingressou no curso de Mestrado em Fitotecnia da UFRGS, no Departamento de Plantas de Lavoura, sob orientação do Professor Paulo Regis Ferreira da Silva.