

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

**ÉPOCA DE SEMEADURA E FERTILIZANTES ESTABILIZADOS COMO
ESTRATÉGIAS PARA AUMENTAR A EFICIÊNCIA DE USO DE NITROGÊNIO
EM MILHO**

Laís Corrêa Miozzo
Engenheira Agrônoma/UFRGS

Dissertação apresentada como um dos requisitos
À obtenção do Grau de Mestre em Fitotecnia
Área de Concentração Sistemas de Produção Vegetal

Porto Alegre (RS), Brasil
Março de 2017

CIP - Catalogação na Publicação

MIOZZO, LAÍS CORRÊA

ÉPOCA DE SEMEADURA E FERTILIZANTES ESTABILIZADOS
COMO ESTRATÉGIAS PARA AUMENTAR A EFICIÊNCIA DE USO DE
NITROGÊNIO EM MILHO / LAÍS CORRÊA MIOZZO. -- 2017.
102 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,
2017.

1. A ÉPOCA DE SEMEADURA INFLUENCIA A RESPOSTA DO
MILHO À ADUBAÇÃO NITROGENADA EM COBERTURA. 2.
EFICIÊNCIA DE FERTILIZANTES NITROGENADOS
ESTABILIZADOS EM MILHO. I. FERREIRA DA SILVA, PAULO
REGIS, orient. II. Título.

LAÍS CORRÊA MIOZZO
Engenheira Agrônoma - UFRGS

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: 10.03.2017
Pela Banca Examinadora

Homologado em: 25.04.2017
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

CIMÉLIO BAYER
PPG Ciência do Solo/UFRGS

LUÍS SANGOI
UDESC/SC

CARLOS ALBERTO BISSANI
Diretor da Faculdade de
Agronomia

DEDICATÓRIA

Aos meus pais e ao meu irmão,
pelo amor, carinho e incentivo constante
para conclusão de mais uma etapa.

AGRADECIMENTOS

A Deus, pelo dom da vida, proteção e força para realização de mais uma etapa.

Ao professor Paulo Regis Ferreira da Silva, incansável, amigo e muito paciente, responsável por minha formação científica nesses anos de convivência, exemplo de pessoa e profissional.

Aos colegas da pós-graduação Natan Henrique Ferrari Pagliarini, Matheus Barreto Maass, Silmara da Luz Correia, Andrei Marafon, José Antônio Selestino Severo Alves, aos bolsistas de iniciação científica Isadora Jaeger, Cristhian Richetti, João Pedro Machado Felin, Matheus Guilherme Goldmeier, Bruno Picetti Chiesa, Leonardo Rosa Picetti e Bruno Tadashi, pela ajuda na realização do trabalho e, sobretudo, pela amizade que levo para a vida.

Aos meus pais Vitacir Luiz Miozzo e Rosangela Dilamar Corrêa Miozzo, ao meu irmão Diéser Miozzo e ao meu padrinho Claudir Corrêa, pelo incentivo, amor e, acima de tudo, compreensão.

Aos alunos de doutorado Fernando Arnuti e Fernando Viero, pela imensa ajuda nas atividades de laboratório e nas análises estatísticas.

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

Aos meus amigos Edi, Taís, Milena, Leonardo Cenci e Leonardo Guasso, pela amizade.

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, em especial aos professores Christian Bredemeier e Carla Andrea Delatorre.

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela bolsa concedida.

ÉPOCA DE SEMEADURA E FERTILIZANTES ESTABILIZADOS COMO ESTRATÉGIAS PARA AUMENTAR A EFICIÊNCIA DE USO DE NITROGÊNIO EM MILHO¹

Autor: Laís Corrêa Miozzo

Orientador: Paulo Regis Ferreira da Silva

RESUMO

O nitrogênio (N) é suscetível a perdas, o que reduz sua eficiência de uso pelas plantas. Diante disso, estratégias que visem aumentar a eficiência de uso do N e minimizar o impacto ambiental de sua aplicação devem ser buscadas. Os objetivos do trabalho foram: a) avaliar o efeito da adubação nitrogenada em função de época de semeadura e b) determinar a eficiência agrônômica de uso de fertilizantes nitrogenados estabilizados aplicados em cobertura. Dois experimentos foram conduzidos a campo, o primeiro no ano agrícola de 2014/15 e o segundo em 2015/16, no município de Eldorado do Sul-RS. No Experimento I, os tratamentos consistiram de duas épocas de semeadura (15 de agosto e 13 de outubro de 2014), caracterizadas, respectivamente, como sendo início e período intermediário da época de semeadura recomendada, e cinco doses de N em cobertura (0, 100, 200, 300 e 400 kg ha⁻¹). No Experimento II foram testadas quatro fontes de fertilizantes nitrogenados em cobertura: ureia comum, ureia com inibidor de urease, ureia com inibidor de nitrificação e ureia com os dois inibidores, e três doses de N em cobertura (50, 120 e 270 kg ha⁻¹). No Experimento I os rendimentos de grãos nas doses de N de 100 e 200 kg ha⁻¹ foram 11 %, e nas doses de 300 e 400 kg ha⁻¹ foram 18% e 4 % maiores na época de semeadura do início do período recomendado (agosto) em relação à época de semeadura intermediária (outubro), respectivamente. No experimento II, na dose intermediária (120 kg ha⁻¹), o rendimento de grãos aumentou em 20,5 % e 10,5 % com a aplicação da ureia com inibidor da urease e da ureia com os dois inibidores, respectivamente, em relação à ureia comum. Na dose alta (270 kg ha⁻¹), o rendimento de grãos foi 11 % e 24,2 % maior quando se utilizou a ureia com inibidor da urease e a com os dois inibidores, respectivamente, em relação à ureia comum. A aplicação da ureia com o inibidor da enzima urease na dose intermediária (120 kg ha⁻¹) e com os dois inibidores na dose mais alta (270 kg ha⁻¹) foram estratégias eficientes para aumentar a eficiência de uso do N em milho em relação a ureia comum. A antecipação da semeadura do milho, para o início do período recomendado, e a utilização de adubos nitrogenados estabilizados são estratégias eficientes para aumentar a eficiência agrônômica de uso do N.

¹Dissertação de Mestrado em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brasil (102 f.) Março, 2017.

SOWING DATE AND FERTILIZERS STABILIZED AS STRATEGIES TO INCREASE NITROGEN EFFICIENCY USE IN MAIZE ¹

Author: Laís Corrêa Miozzo

Adviser: Paulo Regis Ferreira da Silva

ABSTRACT

Nitrogen (N) is susceptible to losses, which reduces its efficiency of use by plants. Therefore, strategies that aim to increase N efficiency use and to minimize the environmental impact of its application should be sought. The objectives of the study were to: a) determine if the response of maize to nitrogen fertilization varies according to sowing season and b) evaluate the agronomic efficiency of stabilized nitrogen fertilizers applied in top dressing. Two experiments were conducted, the first in the growing season of 2014/15 and the second in 2015/16, in Eldorado do Sul-RS, Brazil. In Experiment I, the treatments consisted of two sowing dates (August, 15th and October, 13th, 2014), characterized as the beginning and intermediate period of the recommended sowing season, and five N doses in top dressing (0, 100, 200, 300 and 400 kg ha⁻¹). In Experiment II, four nitrogen fertilizer sources were tested in top dressing: common urea, urea with urease inhibitor, urea with nitrification inhibitor and urea with both inhibitors and three doses of N in top dressing (50, 120 and 270 kg ha⁻¹). In Experiment I grain yields at N doses of 100 and 200 kg ha⁻¹ were 11%, and at N doses of 300 and 400 kg ha⁻¹ were 18% and 4% higher in the sowing season at the beginning of the recommended period (August) in relation to the intermediate sowing season (October), respectively. In the Experiment II at the intermediate dose, grain yield increased by 20.5 % (1.8 Mg ha⁻¹) and 10.54 % (0.9 Mg ha⁻¹) with the application respectively of urea with urease inhibitor and urea with the two inhibitors in relation to common urea. At the highest N dose (270 kg ha⁻¹), grain yield was 11 % (1.2 Mg ha⁻¹) and 24.2 % (2.7 Mg ha⁻¹) higher with the application, respectively, of urea with urease inhibitor and urea with the two inhibitors, in relation to common urea. The use of urea with inhibitor of urease, at the intermediate and high N doses, and urea with the two inhibitors, at the highest dose, are efficient strategies to obtain higher grain yields and to improve N efficiency use in relation to common urea. The anticipation of maize sowing at the beginning of the recommended period and the use of stabilized nitrogen fertilizers are efficient strategies to increase the agronomic efficiency of N.

¹Master of Science Dissertation in Plant Science, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, RS, Brazil (102 p.) March, 2017.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO.....	1
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	4
2.1 Fatores que determinam a dose de N a ser aplicada em milho.....	4
2.2 Eficiência dos fertilizantes nitrogenados estabilizados	7
2.3 Referências bibliográficas.....	10
3 CAPÍTULO 1 - A ÉPOCA DE SEMEADURA INFLUENCIA A RESPOSTA DO MILHO À ADUBAÇÃO NITROGENADA EM COBERTURA	15
RESUMO.....	15
ABSTRACT.....	16
3.1 INTRODUÇÃO.....	17
3.2 MATERIAL E MÉTODOS	19
3.2.1 Caracterização do ambiente.....	19
3.2.2 Delineamento experimental e tratamentos	19
3.2.3 Procedimento experimental.....	20
3.2.4 Análise estatística.....	24
3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	25
3.3.1 Radiação solar, temperatura e precipitação pluvial	25
3.3.2 Características associadas ao desenvolvimento da planta	27
3.3.3 Componentes do rendimento e rendimento de grãos de milho	30
3.3.4 Eficiência agrônômica de uso de nitrogênio (EAN)	36
3.4 CONCLUSÕES.....	37
3.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	37
4 CAPÍTULO 2 – EFICIÊNCIA DE FERTILIZANTES NITROGENADOS ESTABILIZADOS EM MILHO	42
RESUMO.....	42
ABSTRACT.....	43
4.1 INTRODUÇÃO.....	44
4.2 MATERIAL E MÉTODOS	47
4.2.1 Caracterização do ambiente.....	47
4.2.2 Delineamento experimental e tratamentos	47

4.2.3 Procedimento experimental.....	48
4.2.4 Análise estatística.....	52
4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO	53
4.3.1 Regimes hídrico e térmico durante o período de quantificação de perdas de N por volatilização de amônia	53
4.3.2 Taxa de volatilização diária e perdas acumuladas de amônia	55
4.3.3 Teores de N-mineral no solo	59
4.3.4 Características associadas ao desenvolvimento da planta	64
4.3.5 Componentes do rendimento e rendimento de grãos.....	68
4.3.6 Eficiência agronômica do uso do N	74
4.4 CONCLUSÕES.....	75
4.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	75
5 CONSIDERAÇÕES FINAIS	82
6 APÊNDICES.....	85
7 VITA.....	91

RELAÇÃO DE TABELAS

Capítulo 1

- 3.1 Doses e estádios de aplicação da adubação nitrogenada no milho.....20
- 3.2 Estatura de planta, diâmetro de colmo e senescência foliar no estágio R₁, conforme escala de Ritchie *et al.* (1993), em função de época de semeadura. Eldorado do Sul-RS, 2014/15.27
- 3.3 Rendimento de grãos de milho no tratamento sem aplicação de N em cobertura em sucessão à aveia branca e ao pousio no outono-inverno e taxa de mineralização aparente da matéria orgânica do solo (MOS), em duas épocas de semeadura. Eldorado do Sul-RS, 2014/15.33

Capítulo 2

- 4.1 Perda acumulada de N-NH₃ em função de fontes e doses de N aplicado em cobertura na cultura do milho. Eldorado do Sul-RS 2015/16.57
- 4.2 Percentagem de senescência foliar no espigamento (estádio R₁) em função de doses de nitrogênio aplicado em cobertura no milho, na média de quatro fontes de N. Eldorado do Sul-RS 2015/16.65
- 4.3 Percentagem de senescência foliar nos estádios R₃ e R₄ em função de fontes e doses de nitrogênio (N) em cobertura no milho. Eldorado do Sul-RS, 2015/16.66
- 4.4 Rendimento de massa seca e quantidade de N acumulado na parte aérea no espigamento em função da aplicação de fontes e doses de nitrogênio em cobertura no milho. Eldorado do Sul-RS, 2015/16.67
- 4.5 Componentes do rendimento de grãos em função da aplicação de fontes e doses de nitrogênio (N) em cobertura no milho irrigado. Eldorado do Sul-RS, 2015/16.69
- 4.6 Rendimento de grãos em função de fontes e doses de nitrogênio (N) aplicado em cobertura no milho. Eldorado do Sul-RS, 2015/16.71
- 4.7 Eficiência agrônômica de uso do N (EAN) em função de fontes de nitrogênio (N), na média de doses de N, e em função de doses de N, na média de fontes de N aplicado em cobertura no milho. Eldorado do Sul-RS, 2015/16.74

RELAÇÃO DE FIGURAS

Capítulo 1

- 3.1 Precipitação pluvial e irrigação realizada por decêndio nos meses de agosto a fevereiro referente ao ano agrícola 2014/15 e à normal climatológica de 1970 a 2000. Eldorado do Sul-RS, RS. Fonte INMET, 2016.22
- 3.2 Radiação solar global por decêndio nos meses de agosto a fevereiro, referente ao ano agrícola 2014/15 e à normal climatológica de 1970 a 2000. Eldorado do Sul-RS. Fonte INMET (2016).....25
- 3.3 Temperatura média do ar por decêndio nos meses de agosto a fevereiro, referente ao ano agrícola 2014/15 e à normal climatológica relativa ao período 1970 a 2000. Eldorado do Sul-RS. Fonte INMET (2016).....26
- 3.4 Senescência foliar no milho no estágio R₁, conforme escala de Ritchie *et al.* (1993), em função de doses de N aplicadas em cobertura, na média de duas épocas de semeadura. Eldorado do Sul-RS, 2014/15.28
- 3.5 Senescência foliar do milho nos estádios R₃ e R₄, conforme escala de Ritchie *et al.* (1993), em função de doses de N aplicadas em cobertura, em duas épocas de semeadura. Eldorado do Sul-RS, 2014/15.29
- 3.6 Quantidade de N acumulado por hectare na parte aérea do milho no espigamento em função de doses de N aplicadas em cobertura, em duas épocas de semeadura. Eldorado do Sul-RS, 2014/15.30
- 3.7 Número de espigas por metro quadrado de milho em função de doses de N aplicado em cobertura, na média de duas épocas de semeadura. Eldorado do Sul-RS, 2014/15.31
- 3.8 Número de grãos por espiga de milho em função de doses de N aplicado em cobertura, na média de duas épocas de semeadura. Eldorado do Sul-RS, 2014/15.31
- 3.9 Peso do grão de milho em função de doses de N aplicado em cobertura, em duas épocas de semeadura. Eldorado do Sul-RS, 2014/15.32
- 3.10 Rendimento de grãos de milho em função de doses de aplicação de N em cobertura, em duas épocas de semeadura. Eldorado do Sul-RS, 2014/15. .34

3.11 Eficiência agrônômica de uso do N (EAN) em milho em função de doses de N aplicado em cobertura, em duas épocas de semeadura. Eldorado do Sul-RS, 2014/15.....	37
--	----

Capítulo 2

4.1 Precipitação, irrigação, temperatura máxima e mínima e excesso hídrico (\downarrow) aplicado durante o ciclo de desenvolvimento do milho, no ano agrícola 2015/16, Eldorado do Sul-RS.	49
4.2 Precipitação, irrigação e temperaturas máxima, mínima e média durante o período de coleta de volatilização de amônia, após a aplicação dos adubos nitrogenados em cobertura. Eldorado do Sul-RS, 2015/16.....	54
4.3 Umidade relativa do ar (UR) durante o período de coleta de volatilização de amônia, após a aplicação dos adubos nitrogenados em cobertura. Eldorado do Sul-RS, 2015/16.....	55
4.4 Taxa de volatilização diária de N-NH ₃ em função de fontes e doses de fertilizantes nitrogenados aplicados em cobertura em milho. UC: ureia comum; IN: ureia com inibidor da nitrificação; IU: ureia com inibidor da urease e IU+ IN: ureia com inibidores da urease e da nitrificação. Doses de N aplicadas no estágio V ₇ , segundo escala de Ritchie <i>et al.</i> (1993); Eldorado do Sul-RS 2015/16.....	56
4.5 Perda acumulada de N-NH ₃ em função de fontes e doses de N aplicado em cobertura na cultura do milho. Eldorado do Sul-RS 2015/16. Fontes: UC: ureia comum; IN: ureia com inibidor da nitrificação; IU: ureia com inibidor da urease e IN+ IU: ureia com inibidor da nitrificação e urease; Doses de N aplicadas no estágio V ₇ , segundo escala de Ritchie <i>et al.</i> (1993).....	58
4.6 Teores de N-NH ₄ ⁺ (mg kg ⁻¹) no solo em função de fontes e doses de nitrogênio em cobertura na amostragem de solo realizada aos 41 dias (espigamento) após a aplicação da adubação nitrogenada em cobertura no milho irrigado e aos 25 dias após o excesso hídrico, Eldorado do Sul-RS, 2015/16. Fontes: UC: ureia comum; IN: ureia com inibidor da nitrificação; IU: ureia com inibidor da urease e IN+ IU: ureia com inibidor da nitrificação e urease; Doses: Aplicado em cobertura no estágio V ₇ , segundo escala de Ritchie <i>et al.</i> , (1993). A barra horizontal representa o DMS do teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.	61
4.7 Teores de N-NO ₃ ⁻ (mg kg ⁻¹) no solo em função de fontes e doses de nitrogênio em cobertura na amostragem de solo realizada aos 41 dias (espigamento) após a aplicação da adubação nitrogenada em cobertura no milho irrigado e aos 25 dias após a aplicação do excesso hídrico, Eldorado do Sul-RS, 2015/16. Fontes: UC: ureia comum; IN: ureia com inibidor da nitrificação; IU: ureia com inibidor da urease e IN+ IU: ureia com inibidores da nitrificação e da urease; Doses: aplicação em cobertura no estágio V ₇ , segundo escala de Ritchie <i>et al.</i> , (1993). A barra horizontal representa o DMS do teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.	63

1 INTRODUÇÃO

O milho é uma das principais commodities produzidas no Brasil, exercendo importante papel sócio-econômico. Entretanto, apesar de sua grande importância, a produtividade média de grãos no país tem se situado entre 5,0 e 5,4 Mg ha⁻¹ nos últimos cinco anos agrícolas (Conab, 2016). Por outro lado, o potencial de rendimento da cultura é alto, chegando a atingir em áreas experimentais 21,0 Mg ha⁻¹ (Fontoura *et al.*, 2015). Assim, observa-se uma grande lacuna entre as produtividades obtidas em lavouras e o potencial produtivo do milho. Essa lacuna pode ser causada por diversos fatores, dentre eles o manejo inadequado da adubação nitrogenada.

O nitrogênio (N) é de importância fundamental no metabolismo vegetal, constituindo muitos componentes da célula, como aminoácidos, proteínas, ácidos nucleicos, coenzimas e pigmentos. Ele estimula o crescimento e o desenvolvimento vegetativo da planta. Atualmente, a recomendação da adubação nitrogenada para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina é influenciada pelo teor de matéria orgânica no solo, pela cultura antecessora e pela expectativa de rendimento de grãos (SBCS, 2016). Até o presente momento, a época de semeadura não é um fator levado em consideração para recomendação da adubação nitrogenada. Contudo, com base em dois trabalhos anteriores (Menezes, 2015; Pagliarini, 2016) realizados em Eldorado do Sul-RS, há indícios de que essa recomendação possa variar de acordo com a época de semeadura.

É possível que a adubação nitrogenada possa variar em função da época de semeadura, devido às diferentes condições meteorológicas. Em semeaduras realizadas no início do período recomendado, as plantas diminuem seu crescimento e desenvolvimento, devido às baixas temperaturas. Por outro lado, o oposto ocorre em semeaduras mais tardias, em que as altas temperaturas favorecem o crescimento e o desenvolvimento das plantas. Em função do menor desenvolvimento das plantas nas semeaduras realizadas no

início do período recomendado (agosto/setembro), é possível que menos nitrogênio absorvido seja direcionado para o desenvolvimento vegetativo da planta. Assim, mais N pode permanecer no solo para posteriormente ser absorvido, resultando em maior disponibilidade de N para enchimento de grãos e por consequência em maior rendimento de grãos.

Dentre as várias fontes nitrogenadas utilizadas na agricultura no Brasil, a ureia é a mais usada, devido à elevada concentração de N no grânulo (45 %). No entanto, a eficiência de uso do N é baixa, estando em torno de 50 % (Saiz-Fernández *et al.*, 2015), devido à complexidade de sua dinâmica no solo. Dentre os mecanismos de perdas, destaca-se a volatilização de amônia (N-NH₃). Inicialmente ocorre a hidrólise da ureia pela enzima urease, resultando na formação do carbonato de amônio, que é instável e reage formando NH₃, por ser um gás pode ser perdido para atmosfera. Outro mecanismo importante de perda de N é por lixiviação de nitrato (N-NO₃⁻), pelo fato desse íon se deslocar para camadas mais profundas do solo, inexploradas pelas raízes.

Nesse sentido, estratégias que otimizem o uso e minimizem perdas de N do sistema solo-planta-atmosfera devem ser consideradas. Para aumentar a eficiência da adubação nitrogenada é preciso adequar à época de semeadura, a fim de que a planta tenha maior aproveitamento do N e utilizar fontes de N adequadas, como as fontes estabilizadas. Como estratégia para minimizar as perdas de N por volatilização e lixiviação foram desenvolvidos, respectivamente, inibidores da urease e da nitrificação. A utilização de inibidores da urease faz com que a ureia tenha maior tempo de incorporação ao solo pela ocorrência de precipitação pluvial. Já os inibidores da nitrificação são compostos que retardam a oxidação bacteriana do amônio, diminuindo, assim, a atividade dos organismos nitrificadores do solo.

O conhecimento da dinâmica do N e do distinto comportamento das plantas de milho em função da adubação nitrogenada em diferentes épocas de semeaduras em condições edafoclimáticas da Depressão Central no Estado do Rio Grande do Sul são importantes. Essas informações podem servir de subsídio para o manejo da adubação nitrogenada em milho, para determinação de dose, época de semeadura e fonte de aplicação de N mais adequadas. Isso deverá contribuir para o aumento da eficiência agrônômica do uso do N e para redução do impacto ambiental decorrente de sua aplicação.

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

a) Na época de semeadura antecipada (agosto) há maior resposta à adubação nitrogenada em cobertura em milho em relação à época de semeadura intermediária (outubro), devido à menor demanda de N para desenvolvimento vegetativo da planta.

b) O uso de ureia com inibidor de urease diminui as perdas de N por volatilização de amônia.

c) O inibidor da nitrificação aumenta a eficiência de uso de N por diminuir o processo de nitrificação, minimizando a lixiviação de nitrato no perfil de um Argissolo.

d) Maiores perdas de N por lixiviação e volatilização resultam em menor disponibilidade de N para absorção pelas plantas e, em consequência, em menores rendimentos de massa seca e quantidades de N acumulado na parte aérea da planta, rendimento de grãos e eficiência de uso do N.

Para testar essas hipóteses, foram conduzidos dois experimentos a campo, um relativo a doses de N em duas épocas de semeadura e outro relacionado a fontes e doses de N, com os seguintes objetivos:

a) Verificar se a resposta do milho à adubação nitrogenada em cobertura varia em função de época de semeadura.

b) Determinar os efeitos de fontes de N aplicado em cobertura, sob três doses de N, sobre, as perdas por volatilização de amônia, teores de amônio e nitrato no perfil de um Argissolo, senescência foliar, rendimento de massa seca e a quantidade de N acumulado na parte aérea da planta no espigamento, rendimento de grãos, componentes do rendimento e eficiência agrônômica de uso do N em milho.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Apesar de sua relevância no país, o rendimento médio de milho ainda é baixo, correspondendo a 5,4 Mg ha⁻¹ (Conab, 2016). Esses valores são muito baixos se comparados aos máximos rendimentos que têm sido obtidos em condições experimentais, de 17,4, 18,6 e 21,0 Mg ha⁻¹, respectivamente nos estados do Rio Grande do Sul (Menegati, 2012), Santa Catarina (Schmidt *et al.*, 2014) e do Paraná (Fontoura *et al.*, 2015). Considerando-se esses altos rendimentos obtidos em condições experimentais e o rendimento médio de grãos obtido na região Sul do Brasil (6,1 Mg ha⁻¹), observa-se que há uma grande lacuna no rendimento de grãos de milho.

Vários fatores têm contribuído para obtenção de baixos rendimentos em lavouras, destacando-se a escolha inadequada da época de semeadura, a baixa adição de fertilizantes, principalmente os nitrogenados, o uso de cultivares com baixo potencial de rendimento, a utilização do arranjo de plantas inadequado e o controle ineficiente de plantas daninhas, pragas e doenças (Sangoi *et al.*, 2010).

2.1 Fatores que determinam a dose de N a ser aplicada em milho

O manejo da adubação nitrogenada é decisivo para obtenção de altos rendimentos de grãos de milho. O nitrogênio (N) é o nutriente que é exigido em maior quantidade pelas plantas, sendo constituinte dos vários componentes da célula vegetal, incluindo clorofilas, aminoácidos, proteínas e ácidos nucleicos. A disponibilidade de N afeta o crescimento e o desenvolvimento da planta, pois está envolvido diretamente nos processos de divisão e expansão celular (Sangoi *et al.*, 2016).

A planta absorve o nitrogênio do solo pelas raízes em duas formas: nitrato (NO₃⁻) e amônio (NH₄⁺). Normalmente, o nitrato é absorvido em maiores quantidades, independentemente da fonte de N aplicada, devido à oxidação do amônio pelas bactérias nitrificantes do solo (Sangoi *et al.*, 2016). Após a

absorção, o NO_3^- e o NH_4^+ são translocados através da membrana plasmática das células da epiderme e do córtex da raiz por transportadores específicos para essas formas de nitrogênio. Depois da entrada na célula, o amônio pode ser incorporado diretamente em aminoácidos na planta. O amônio é incorporado em aminoácidos através das enzimas glutamina sintetase (GS) e glutamato sintase (GOGAT), formando glutamina (GLN), glutamato (GLU) e outros aminoácidos e seus metabólitos. Já o nitrato necessita ser reduzido a nitrito (NO_2^-) no citosol pela enzima redutase do nitrato (RN). Após, ele é convertido a amônio (NH_4^+) no plastídio, pela enzima redutase do nitrito (RNi) (Taiz & Zeiger, 2013).

A recomendação da adubação nitrogenada para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina depende do teor de matéria orgânica no solo, da cultura antecessora e da expectativa de rendimento de grãos (SBCS, 2016). Quanto menor o teor de matéria orgânica, maior a dose de N a ser aplicada. De outra parte, quanto mais alta é a expectativa de rendimento de grãos, maior deve ser a dose de N aplicada. Isto se deve ao fato de que para cada tonelada de grãos de milho a ser produzida são necessários de 25 a 28 kg de N (Sangoi *et al.*, 2016).

Além desses dois fatores, a escolha da dose de N também é afetada pelo tipo de cobertura de solo no outono-inverno e pela intensidade dos processos de imobilização e mineralização. Esses processos dependem basicamente, da relação C:N dos resíduos deixados no solo. Se o resíduo for de uma espécie da família das fabáceas ou brassicáceas, com baixa relação C:N, ocorre rapidamente a mineralização e o nitrogênio fica disponível para a planta, podendo haver redução na dose de N aplicada em cobertura. No caso de espécies poáceas, com alta relação C:N, ocorre grande aporte de carbono ao solo e os micro-organismos imobilizam o N, deixando-o indisponível às plantas. Assim, é necessário aumentar a dose de N aplicada em cobertura (Amado *et al.*, 2002). Em rotação com a soja, pode-se reduzir em até 20 % a quantidade total de N a ser aplicada no milho (Sangoi *et al.*, 2016).

Até o presente momento, a época de semeadura do milho não é um fator levado em consideração para recomendação de dose de adubação nitrogenada. Em regiões mais quentes do estado do RS, é possível realizar-se a semeadura do milho em uma ampla faixa de época de semeadura, devido a menor probabilidade de ocorrência de geadas durante o ciclo de desenvolvimento (Sangoi *et al.*, 2010). Em experimentos anteriores realizados na região ecoclimática da Depressão

Central, durante dois anos, verificou-se, nos tratamentos sem adubação nitrogenada em cobertura no milho, menor rendimento de grãos na época de semeadura antecipada (agosto) em relação à época de semeadura mais tardia (outubro) (Menezes, 2015; Pagliarini, 2016). No primeiro experimento, os rendimentos médios obtidos em dois anos, sem aplicação de N em cobertura, foram de 4,90 e 8,0 Mg ha⁻¹, respectivamente na primeira e segunda épocas. Já no segundo experimento (Pagliarini, 2016), foram obtidos rendimentos de grãos de 4,97 e 10,25 Mg ha⁻¹ respectivamente na primeira e segunda épocas. Essa grande variação no rendimento de grãos indica que é possível que a resposta do milho à adubação nitrogenada em cobertura também possa variar com a época de semeadura.

As oscilações na temperatura do ar, na radiação solar e na disponibilidade hídrica influenciam a fenologia, o crescimento e o desenvolvimento das plantas de milho (Lozada & Angelocci, 1999). Nas regiões mais quentes do Sul do Brasil e com estação de crescimento longa, preferencialmente realiza-se a semeadura do milho mais cedo (agosto, setembro) como estratégia para reduzir o risco de ocorrência de deficiência hídrica no período crítico da cultura. Contudo, nessas épocas de semeaduras antecipadas as temperaturas do ar e do solo e a disponibilidade de radiação solar são menores, o que poderia restringir o potencial produtivo do milho (Serpa *et al.*, 2011). No entanto, em vários experimentos realizados na Depressão Central do estado do RS, conduzidos sob condições de irrigação e alto nível de manejo, tem-se obtido elevadas produtividades de grãos, mesmo quando o milho é semeado em agosto (Serpa *et al.*, 2011; Menegatti, 2013; Menezes, 2015; Pagliarini, 2016).

São denominadas semeaduras antecipadas, aquelas realizadas antes do início da primavera, entre o final de julho e a primeira quinzena de setembro. Quando se antecipa a época de semeadura do milho, a cultura se desenvolve vegetativamente baseada nas precipitações que ocorrem na primavera, geralmente bem distribuídas, com temperaturas mais amenas, menor disponibilidade de radiação solar e sob menor demanda evaporativa da atmosfera. Assim, devido às baixas temperaturas do solo e do ar, as plantas diminuem suas velocidades de crescimento e desenvolvimento. Por outro lado, semeaduras tardias são aquelas efetuadas após o período ideal para o aproveitamento da radiação solar, entre início de novembro e meados de março. Nessas semeaduras, o desenvolvimento inicial das plantas coincide com as mais

elevadas temperaturas do ar e do solo, com conseqüente aumento da disponibilidade térmica, estimulando, assim, o crescimento e o desenvolvimento vegetativo das plantas (Sangoi & Silva, 2016).

2.2 Eficiência dos fertilizantes nitrogenados estabilizados

O manejo da adubação nitrogenada é complexo em função da quantidade de reações químicas e biológicas que o N pode sofrer e da sua grande dependência das condições edafoclimáticas para absorção pela planta (Cantarella & Duarte, 2004). No Brasil, o principal adubo nitrogenado utilizado na agricultura é a ureia (Sangoi *et al.*, 2016), em função de sua alta concentração de N (~44%) e de seu menor custo por unidade de N. No entanto, a dinâmica desse nutriente é influenciada pelas condições ambientais, pela forma de aplicação, pelo manejo e pela fonte do adubo nitrogenado utilizado (Meira, 2006). Essa dinâmica se reflete em baixa eficiência do N aplicado, estando em torno de 50 % (Lara Cabezas *et al.*, 2000; Saiz-Fernández *et al.*, 2015; Franco *et al.*, 2011).

Essa baixa eficiência do aproveitamento dos fertilizantes nitrogenados aplicados às culturas ocorre em função de perdas, principalmente, por volatilização de amônia (N-NH₃), e por lixiviação de nitrato (N-NO₃⁻) (Rogeri, 2010). O processo de perda por volatilização de amônia ocorre inicialmente pela hidrólise da ureia pela enzima urease, formando carbonato de amônio, que é instável e reage formando N-NH₃. Por ser um gás, esse íon pode ser perdido para atmosfera, quando não incorporado ao solo (Bissani *et al.*, 2008). A enzima urease é persistente no solo, pois fica protegida da ação de outras proteases. Ela permanece no interior de agregados do solo, onde a ureia consegue penetrar, mas outras substâncias de peso molecular maior, como proteases, não têm acesso (Palucci, 2004). Após a adubação nitrogenada com ureia, essa é rapidamente hidrolisada. Os picos de perdas por volatilização ocorrem em dois ou três dias após a aplicação da ureia (Duarte *et al.*, 2007; Viero *et al.*, 2014). Condições ambientais como: alta umidade do solo, temperaturas do ar elevada e a aplicação de ureia na superfície, sem incorporação, podem acarretar em perdas de N para a atmosfera na forma gasosa (Tasca, 2009).

Outro processo importante de perda de N no solo é por lixiviação. Estima-se que a proporção de perda de nitrato por lixiviação varie entre 30 e 60 %, principalmente abaixo da zona de alcance das raízes (Knudsen *et al.*, 2003; Kros *et al.*, 2013). Esse processo consiste na perda de N, principalmente na forma de

nitrate (N-NO_3^-), com o deslocamento da água para camadas mais profundas do solo (Peng *et al.*, 2015). A lixiviação é afetada pela concentração de N-NO_3^- na solução do solo e pelo tipo de solo. Solos argilosos possuem maior capacidade de reter o N-NO_3^- em relação aos arenosos, sendo, portanto, menos propensos a perdas por lixiviação (Sangoi *et al.*, 2003).

As perdas por lixiviação, principalmente de nitrato, são influenciadas pelo processo de nitrificação. Com pH adequado, na presença de oxigênio e com altas temperaturas, a maior parte do N-NH_4^+ aplicado é nitrificada dentro de 15 a 30 dias após a aplicação do adubo nitrogenado (Arnuti, 2014). Por ser um cátion, o N-NH_4^+ fica adsorvido aos colóides do solo e aos grupos funcionais da matéria orgânica. No entanto, isso não ocorre com o N-NO_3^- , que é altamente móvel no solo e, por isso, mais sujeito a perdas por lixiviação (Subbarao *et al.*, 2006). O processo de nitrificação inicia-se com as bactérias do gênero *Nitrosomonas spp.*, as quais são responsáveis pela transformação do amônio (N-NH_4^+) em nitrito (N-NO_2^-). Em seguida, bactérias do gênero *Nitrobacter* e *Nitrosolobus spp.* rapidamente oxidam o nitrito a nitrato (N-NO_3^-) (Moreira & Siqueira, 2006).

As perdas de N pelos processos de volatilização de N-NH_3 e de lixiviação de N-NO_3^- podem reduzir a produtividade das culturas. Diante disso, a indústria tem buscado novos métodos para aumentar a eficiência de uso dos fertilizantes nitrogenados (Trenkel, 2010). Uma estratégia para minimizar essas perdas é a utilização de fertilizantes estabilizados. Esses são definidos dessa maneira por atrasar a disponibilidade de N para absorção e uso pelas plantas após a aplicação ou por prolongar o tempo de sua liberação no solo, comparado a fontes de N tradicionais (Trenkel, 1997; Nascimento *et al.*, 2012). Há uma variedade de novas práticas e tecnologias que podem promover o aumento da eficiência de uso do N e reduzir a poluição ambiental. Algumas tecnologias de mitigação mostraram-se altamente eficazes na redução de perdas de fertilizantes nitrogenados e em aumentar a eficiência do uso do N e o rendimento de grãos, em alguns sistemas de cultivo. Dentre essas tecnologias, destaca-se a aplicação de inibidores de urease e de nitrificação (Cui *et al.*, 2011.; Moir *et al.*, 2012; Viero *et al.*, 2014; Menezes, 2015).

Os inibidores da urease minimizam as perdas por volatilização de amônia (N-NH_3), permitindo que o fertilizante nitrogenado permaneça por mais tempo no solo, até ser incorporado pela precipitação pluvial ou irrigação. Alguns estudos relataram a eficiência na redução de perdas de N-NH_3 quando se adicionou o

inibidor de urease (NBPT) [N-(n-butyl) thiophosphoric triamide] à ureia. O NBPT age inibindo a atividade da enzima urease, uma vez que ocupa o local ativo, causando uma desaceleração em sua atividade (Christianson *et al.*, 1990), o que minimiza as perdas de N-NH₃ por volatilização (Viero *et al.*, 2014). A utilização de NBPT é mais eficiente quando as condições edafoclimáticas são propícias à alta volatilização de N-NH₃, como solos arenosos, com elevada atividade da urease, com baixas CTC e MO (Watson *et al.*, 1994).

Em milho, maiores perdas de N por volatilização foram registradas quando utilizado a ureia comum, variando entre 10 e 13,5 % do N aplicado (Viero *et al.* 2014). Com a utilização da ureia com inibidor de urease as perdas não ultrapassaram 2 % do N aplicado. A utilização da ureia com inibidor de urease em milho reduziu em 48,1 % as perdas de N por volatilização de N-NH₃, quando comparada à ureia comum, refletindo-se em aumento do rendimento de grãos, o qual foi 16 % superior com a utilização do inibidor da urease (Menezes, 2015). Em arroz irrigado, no período de 10 dias antes da entrada da água, a utilização da ureia tratada com NBPT aumentou em 700 kg ha⁻¹ o rendimento de grãos em relação à ureia comum (Scivittaro *et al.*, 2010).

O nitrogênio pode ser absorvido pelas plantas em duas formas distintas: como ânion (N-NO₃⁻) e como cátion (N-NH₄⁺). Dessas formas, o nitrato é a mais absorvida pelas raízes das plantas (Kerbuay, 2008), devido à ação de bactérias nitrificadoras no solo (*Nitrosomonas* e *Nitrobacter*), que oxidam rapidamente o amônio a nitrato (Knoblauch, 2011). O uso de inibidores de nitrificação pode retardar a oxidação microbiana de N-NH₄⁺ a nitrito (N-NO₂⁻) durante um período de tempo, que pode ser de várias semanas (Zerulla *et al.*, 2001). Dentre os inibidores de nitrificação, os mais usados são o fosfato de 3,4-dimetilpirazole (DMPP), a dicianodiamida (DCD) e a nitrapirina (Cantarella, 2007). Eles atuam desativando as enzimas das bactérias que convertem as formas de N amoniacais em nítrica, resultando em significativa redução da lixiviação de N-NO₃⁻. Assim, o N fica na forma amoniacal, que é menos suscetível à lixiviação, permanecendo no solo por maior período de tempo (Trenkel, 2010).

Na Europa e na China, o uso de DCD e DMPP reduziram as perdas de N para o ambiente, resultando em aumento da produtividade e da eficiência de seu uso (Mariano *et al.*, 2011; Liu *et al.*, 2013). Entretanto, a eficiência de uso dos inibidores da nitrificação está diretamente ligada ao tipo de solo. Em experimento realizado em um solo com predomínio de argila no estado de Santa Catarina não

se observou resposta ao uso de inibidores da nitrificação em comparação à utilização de outras fontes de N, sem uso de inibidores (Mota *et al.*, 2015). Esse fato pode estar relacionado à maior capacidade de retenção de água nesse tipo de solo, resultando em pouco movimento do N no perfil. Isso faz com que o N fique mais tempo no solo, o que reduz o efeito do inibidor da nitrificação.

Em condições controladas de laboratório, o inibidor de nitrificação DCD inibiu a nitrificação, mantendo mais da metade do N-inorgânico na forma de amônio até 30 dias após sua aplicação (Marcelino, 2009). Já em condições de campo, em solos de textura arenosa, a aplicação desse inibidor não aumentou o rendimento de grãos de milho (Marcelino, 2009). A utilização do inibidor de nitrificação (DCD) em solo arenoso aumentou a quantidade de N nas folhas, sem, no entanto, afetar o rendimento de grãos de milho (Soratto *et al.*, 2011).

O inibidor de nitrificação (DCD) junto com o inibidor de urease (NBPT) tem proporcionado redução de perdas de N, contribuindo para aumentar a eficiência de seu aproveitamento e as produtividades em pastagens na Nova Zelândia (Zaman *et al.*, 2009). A combinação do inibidor da urease (NBPT) e do inibidor de nitrificação (DCD) adicionados à ureia diminuiu a volatilização de N-NH₃ desse fertilizante em condições de laboratório em relação à ureia (Soares, 2011).

O N é o nutriente que o milho tem maior demanda. Assim, estratégias que visem aumentar o rendimento de grãos de milho e a eficiência de seu uso, pela adequação da dose de N à época de semeadura e pela mitigação de perdas por volatilização de amônia e lixiviação de nitrato devem ser avaliadas.

2.3 Referências bibliográficas

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 plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 1, 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.

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

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

CHRISTIANSON, C. B.; BYRNES, B. H.; CARMONA, G. A comparison of the sulfur and oxygen analogs of phosphoric triamide urease inhibitors in reducing urea hydrolysis and ammonia volatilization. **Fertilizer Research**, The Hague, v. 26, n. 1-3, p. 21-27, 1990.

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

CUI, M. et al. Effective mitigation of nitrate leaching and nitrous oxide emissions in intensive vegetable production systems using a nitrification inhibitor, dicyandiamide. **Soils Sediments**, Christchurch, v. 11, n. 5, p. 722-730, 2011.

DUARTE, F. M. et al. Perdas de nitrogênio por volatilização de amônia com aplicação de ureia em solo de várzea com diferentes níveis de umidade. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 3, p. 705-711, 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, n. 1, p. 29-41, 2011.

KERBAUY, G. B. **Fisiologia Vegetal**. 2. ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan, 2008.

KNOBLAUCH, R. **Dinâmica do nitrogênio em solos alagados destinados ao cultivo de arroz irrigado**. 2011. 111 f. Tese (Doutorado) – Centro de Ciências Agroveterinárias, Universidade Estadual do Estado de Santa Catarina, Lages, 2011.

KNUDSEN, M.T. et al. Estimated N leaching losses for organic and conventional farming in Denmark. **Journal of Agricultural Science**, Cambridge, v. 144, n. 2, p. 135-149, 2006.

KROS, J. et al. Integrated analysis of the effects of agricultural management on nitrogen fluxes at landscape scale. **Environmental Pollution**, Barking, v. 159, n. 11, p. 3171-3182, 2011.

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, n. 2, p. 363-376, 2000.

LIU, C.; WANG K.; ZHENG, X. Effects of nitrification inhibitors (DCD and DMPP) on nitrous oxide emission, crop yield and nitrogen uptake in a wheat-maize cropping system. **Biogeosciences**, Pequim, v. 10, p. 2427-2437, 2013.

LOZADA, B. I. ANGELOCCI, L. R. Efeito da temperatura do ar e da disponibilidade hídrica no solo na saturação de subperíodos e na produtividade de um híbrido de milho. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v. 7, n. 1, p. 3-43, 1999.

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

MARIANO, E.; COSTA, H. T.; CORRALES, R. A. F. **Ureia: Novas tecnologias para fertilizantes nitrogenados**. Piracicaba: [s.n.], 2011. 32 p.

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. **Estratégias de manejo para minimizar estresse por deficiência hídrica e para potencializar rendimento de grãos em milho sob condições de irrigação**. 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, G. B. **Estratégias de manejo para minimizar perdas de N por volatilização e aumentar o rendimento de grãos de milho irrigado**. 2015. 70 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2015.

MOIR, J. L. et al. The effect of dicyandiamide on pasture nitrate concentration, yield and N offtake under high N loading in winter and spring. **Grass and Forage Science**, Oxford, v. 67, n. 3, p. 39-402, 2012.

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

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.

PAGLIARINI, N. H. F. **Teores de amônio e nitrato no solo e desempenho agrônomo do milho em função de regimes hídricos, doses e épocas de aplicação de nitrogênio em cobertura**. 2016. 117 f. Dissertação (Mestrado em Fitotecnia) – Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

PALUCCI, J. A. **Biomassa microbiana e atividade enzimática em um solo degradado pela exploração de cassiterita adubado com compostos de**

diferentes granulometrias. 2004. 113 f. Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Agronomia) – Universidade Estadual Paulista, Jaboticabal, 2004.

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.

ROGERI, D. A. **Suprimento e perdas de nitrogênio no solo decorrentes da adição de cama de aves.** 2010. 94 f. Dissertação (Mestrado em Ciências do Solo) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2010.

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.

SANGOI, L. et al. Lixiviação de nitrogênio afetada pela forma de aplicação da ureia e manejo dos restos culturais de aveia em dois solos com texturas contrastantes. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 1, p. 65-70, 2003.

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

SANGOI, L.; SILVA P. R. F. Crescimento, desenvolvimento e épocas de semeadura. In: WORDELL FILHO, J. A.; CHIARADIA, L. A. (Org.). **A cultura do milho em Santa Catarina.** 3. ed. Florianópolis: Dioesc, 2016. cap. 2. p. 25-83.

SANGOI, L. et al. **Estratégias de manejo da adubação nitrogenada em milho na região sul do Brasil.** Lages, Sc: Graphel, 2016. 119 p.

SCHMITT, A. **Arranjo de plantas para maximizar o desempenho agrônomico do milho em ambientes de alto manejo.** 2014. 226 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agronomia, Universidade Estadual de Santa Catarina, Lages, 2014.

SCIVITTARO, W. B. et al. Nitrogen losses by ammonia volatilization and lowland rice response to NBPT urease inhibitor-treated urea. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 40, n. 6, p. 1283-1289, 2010.

SERPA, M. S. et al. Densidade de plantas em híbridos de milho semeados no final do inverno em ambientes irrigados e de sequeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 47, n. 4, p. 541-549, 2012.

SOARES, J. R. **Efeito de inibidores de urease e de nitrificação na volatilização de NH₃ pela aplicação superficial de ureia no solo.** 2011. 79 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agricultura Tropical e Subtropical, Instituto Agrônomico, Campinas, 2011.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DE SOLO – NÚCLEO REGIONAL SUL. **Manual de calagem e adubação:** para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. Santa Maria: Comissão de Química e Fertilidade do Solo – RS/SC, 2016. 376 p.

SORATTO, R. P. et al. Doses e fontes alternativas de nitrogênio no milho sob plantio direto em solo arenoso. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 1, p. 62 -70, 2011.

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

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

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. 167 p.

VIERO, F. et al. Ammonia volatilization from nitrogen fertilizers in no-till wheat and maize in southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, n. 5, p. 1515-1525, 2014.

WATSON, C.J. et al. Soil properties and the ability of the urease inhibitor N-(n-butyl) thiophosphoric triamide (NBTPT) to reduce ammonia volatilization from surface-applied urea. **Soil Biology and Biochemistry**, Belfast, v. 26, n. 9, p. 1165-1171, 1994.

ZAMAN, M. et al. Effect of urease and nitrification inhibitors on N transformation, gaseous emissions of ammonia and nitrous oxide, pasture yield and N uptake in grazed pasture system. **Soil Biology Biochemistry**, Elmsford, v. 41, n. 6, p. 1270-1280, 2009.

ZERULLA, W. et al. 3,4-Dimethylpyrazole phosphate (DMPP) – a new nitrification inhibitor for agriculture and horticulture. **Biology and Fertility of Soils**, Berlin, v. 34, n. 2, p. 79-84, 2001.

3 CAPÍTULO 1 - A ÉPOCA DE SEMEADURA INFLUENCIA A RESPOSTA DO MILHO À ADUBAÇÃO NITROGENADA EM COBERTURA

RESUMO

Em regiões mais quentes do estado do RS, o milho é semeado em uma ampla faixa de época de semeadura. Em virtude de diferenças na temperatura do ar, o crescimento da planta varia conforme a época de semeadura, podendo determinar diferenças na resposta do rendimento de grãos à adubação nitrogenada em cobertura. O objetivo do trabalho foi avaliar o efeito da adubação nitrogenada em função de época de semeadura. O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados, dispostos em parcelas subdivididas, com quatro repetições. Os tratamentos consistiram de duas épocas de semeaduras (15 de agosto e 13 de outubro de 2014), caracterizadas, respectivamente, como sendo início e período intermediário da época de semeadura, e cinco doses de nitrogênio (N) aplicadas em cobertura (0, 100, 200, 300 e 400 kg ha⁻¹). O híbrido utilizado foi o Pioneer 30F53 YR. As plantas de milho apresentaram menores estatura, diâmetro de colmo e percentagem de senescência foliar na semeadura realizada no início do período recomendado (agosto) em relação à realizada em um período intermediário (outubro). Houve interação de época de semeadura e doses de N para rendimento de grãos e eficiência agronômica de uso de N (EAN). Os rendimentos de grãos nas doses de N de 100 e 200 kg ha⁻¹ foram 11 % (1,2 Mg ha⁻¹), e nas doses de 300 e 400 kg ha⁻¹ foram 18% (2,5 Mg ha⁻¹) e 4 % (0,6 Mg ha⁻¹) maiores na época de semeadura do início do período recomendado (agosto) em relação à época de semeadura intermediária (outubro). A EAN foi 31, 19, 45 e 7 % maior com a aplicação das doses de 100, 200, 300 e 400 kg de N ha⁻¹, respectivamente, na época de semeadura de agosto em relação à de outubro. Nas duas épocas de semeadura, a EAN diminuiu à medida que aumentou a dose de N aplicada. A antecipação da semeadura do milho, para o início do período recomendado (agosto) é uma estratégia eficiente para aumentar a resposta do rendimento de grãos à adubação nitrogenada em cobertura e a eficiência agronômica de uso do N em relação à semeadura realizada num período intermediário (outubro).

3 CHAPTER 1 - MAIZE RESPONSE TO NITROGEN FERTILIZATION IN TOP DRESSING IS AFFECTED BY SOWING DATE

ABSTRACT

In warmer regions of the state of Rio Grande do Sul, Brazil, maize is sown in a wide range of growing season. Due to differences in air temperature, plant growth varies according to the sowing date and could determine differences in grain yield response to nitrogen fertilization in top dressing. The objective of this work was to evaluate the effect of nitrogen fertilization as a function of sowing season. The experimental design was randomized blocks, arranged in subdivided plots, with four replications. Treatments consisted of two sowing dates (August, 15th and October 13th, 2014), characterized as respectively the beginning and intermediate period of the growing season, and five nitrogen (N) doses applied in top dressing (0, 100, 200, 300 and 400 kg ha⁻¹). Maize hybrid used was the Pioneer 30F53 YR. Plants showed lower height stem diameter and leaf senescence percentage at the sowing at the beginning of the recommended period (August) than in the intermediate period (October). There was interaction between sowing date and N rates for grain yield and N efficiency use (NEU). Grain yields at N rates of 100 and 200 kg ha⁻¹ were 11% (1.2 Mg ha⁻¹), and at the rates of 300 and 400 kg ha⁻¹ were 18% (2.5 Mg ha⁻¹) and 4% (0.6 Mg ha⁻¹) higher in the sowing season at the beginning of the recommended period (August) than in the sowing season (October). NEU was 31, 19, 45 and 7% higher with the application of the doses of 100, 200, 300 and 400 kg of N ha⁻¹, respectively, at the sowing season of August in relation to October. In the two sowing times, the NEU decreased as the dose of N applied increased. The anticipation of maize sowing to the beginning of the recommended period (August) is an efficient strategy to increase grain yield response to nitrogen fertilization and the N efficiency use in relation to sowing in an intermediate period (October).

3.1 INTRODUÇÃO

O nitrogênio (N) é o nutriente mineral que o milho tem maior demanda, sendo, geralmente, limitante ao seu desenvolvimento. Ele é fundamental no metabolismo vegetal, pois participa diretamente da biossíntese de proteínas e clorofilas. Além disso, o N é o nutriente mineral que faz parte de muitos componentes da célula vegetal, incluindo aminoácidos, proteínas e ácidos nucleicos (Büll, 1993; Taiz & Zieger, 2013). Pelo fato do N apresentar uma dinâmica muito complexa, é necessário o uso de adubação nitrogenada para complementar a quantidade desse nutriente fornecida pelo solo. Nesse sentido, é o nutriente que, geralmente, apresenta maior custo no sistema de produção do milho (Cantarella & Marcelino, 2008).

O suprimento inadequado de N é considerado um dos principais fatores limitantes à obtenção de elevados rendimentos de grãos na cultura do milho. Assim, o manejo da adubação nitrogenada deve objetivar suprir a demanda das plantas nos períodos críticos, maximizar a eficiência agrônômica de uso do nitrogênio (EAN) e minimizar o impacto ambiental, com redução de perdas. Além de ter um alto custo, a eficiência agrônômica do uso do N em milho é baixa, sendo ao redor de 50 % (Saiz-Fernández, 2015). Por isso, é importante otimizar a dose de N a ser aplicada em milho.

Os atuais critérios de adubação nitrogenada para o milho levam em consideração o teor de matéria orgânica do solo, a cultura antecessora e a expectativa de rendimento de grãos (SBCS, 2016). Até o presente momento, a época de semeadura não é um fator levado em consideração para recomendação da adubação nitrogenada. Contudo, com base em dois trabalhos anteriores (Menezes, 2015; Pagliarini, 2016) realizados em Eldorado do Sul-RS, há indícios de que essa recomendação possa variar de acordo com a época de semeadura. Nesses experimentos, verificou-se que, no tratamento sem adubação nitrogenada em cobertura, o rendimento de grãos foi menor na época de semeadura

antecipada (agosto) em relação a uma época intermediária (outubro). No primeiro trabalho (Menezes, 2015), os rendimentos médios obtidos, na média de dois anos, foram de 4,90 e 8,90 Mg ha⁻¹, respectivamente na primeira e segunda épocas. Já no segundo experimento (Pagliarini, 2016), foram obtidos, rendimentos de 4,97 e 10,25 Mg ha⁻¹ respectivamente na primeira e segunda épocas, no tratamento sem adubação nitrogenada em cobertura. Esses resultados indicam que é possível que a resposta do milho à adubação nitrogenada em cobertura varie com a época de semeadura.

A fenologia, o crescimento e o desenvolvimento das plantas de milho são influenciados pelas variações de temperatura do ar e pelas disponibilidades de radiação solar e hídrica (Sangoi *et al.*, 2010). Além dos fatores intrínsecos à planta e das condições meteorológicas da região de cultivo, o manejo da cultura, principalmente relacionado à adubação nitrogenada, tem grande importância. Esse fator intervém na produção de biomassa por unidade de área, na interceptação da radiação solar e na acumulação de fotoassimilados e, portanto, no rendimento de grãos (Argenta *et al.*, 2001).

As condições climáticas das regiões mais quentes do Sul do Brasil, como o caso da região da Depressão Central do estado do Rio Grande do Sul, permitem que a cultura do milho seja cultivada em uma ampla faixa de época de semeadura. Em semeaduras realizadas no início do período recomendado (agosto/setembro), as plantas têm a velocidade de crescimento e o desenvolvimento diminuídos em relação a épocas de semeaduras realizadas mais tarde ainda dentro do período recomendado, em função das menores temperaturas do solo e do ar. Nessas condições, aumenta as durações dos subperíodos semeadura-emergência, emergência-diferenciação do primórdio da inflorescência masculina e diferenciação do primórdio da inflorescência masculina-pendoamento, devido ao menor acúmulo de unidades de calor por dia. Temperaturas mais baixas diminuem o crescimento vegetativo do milho. Assim, em semeaduras realizadas no início do período recomendado as plantas apresentam menores área foliar, estatura de planta e altura de inserção de espiga em relação a semeaduras realizadas mais tarde dentro do período recomendado, sob condições semelhantes de manejo (Sangoi & Silva, 2016). Devido ao menor desenvolvimento das plantas nas semeaduras realizadas no início do período recomendado (agosto/setembro) é possível que menos nitrogênio absorvido seja direcionado para o desenvolvimento vegetativo. Assim, mais nitrogênio ficaria no

solo para possivelmente ser absorvido durante o período de enchimento de grãos, resultando, em consequência, em maior rendimento de grãos.

Com isso, a hipótese do presente trabalho foi de que, nas sementeiras realizadas no início do período recomendado (agosto), há maior resposta à adubação nitrogenada quando comparada as sementeiras realizadas mais tardiamente (outubro). Para testar essa hipótese, esse trabalho foi conduzido a campo, durante o ano agrícola 2014/15, com o objetivo de avaliar o efeito da adubação nitrogenada em função de época de sementeira.

3.2 MATERIAL E MÉTODOS

3.2.1 Caracterização do ambiente

A pesquisa foi conduzida a campo na Estação Experimental Agronômica, da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (EEA-UFRGS), no município de Eldorado do Sul (30° 05' latitude Sul, 51° 39' longitude Oeste e 42 m altitude), região ecoclimática da Depressão Central do estado do Rio Grande do Sul, no ano agrícola 2014/15. O clima da região é subtropical úmido, de verão quente, do tipo fundamental "Cfa", conforme classificação climática de Köppen. O solo da área experimental é classificado como Argissolo Vermelho Distrófico típico (Streck *et al.*, 2008). Em maio de 2014 foram coletadas amostras de solo na área para subsidiar a recomendação de adubação para o milho. As amostras de solo apresentaram os seguintes valores: argila: 250 g kg⁻¹; pH (água): 5,1; P: 34 mg dm⁻³ (Mehlich-1); K: 146 mg dm⁻³ (Mehlich-1); MO: 20 g kg⁻¹ e CTC: 9,6 cmolc dm⁻³.

A área experimental está sendo cultivada em sistema de plantio direto há 25 anos. Na primavera-verão é feita rotação entre as culturas de soja e milho. No outono-inverno de 2014 foi cultivada aveia branca (*Avena sativa*) como cobertura de solo, como cultura antecessora ao milho.

3.2.2 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental utilizado foi o de blocos casualizados, dispostos em parcelas subdivididas, com quatro repetições. Nas parcelas principais foram locadas as épocas de sementeira e, nas subparcelas, as doses de adubo nitrogenado. Os tratamentos consistiram de duas épocas de sementeira

e cinco doses de N aplicado em cobertura no milho cultivado em sucessão à aveia branca (*Avena sativa*). O milho foi semeado em duas épocas, sendo uma no início do período recomendado (15 de agosto de 2014) e a outra em período intermediário (13 de outubro de 2014). As doses de N utilizadas nas duas épocas foram 0, 100, 200, 300 e 400 kg de N ha⁻¹. Uma testemunha com pousio no outono-inverno, sem aplicação de N em cobertura no milho, foi incluída com a finalidade de verificar a taxa de mineralização aparente de N da matéria orgânica do solo.

As doses e estádios de aplicação da adubação nitrogenada em cobertura nas duas épocas de semeadura do milho estão descritas a seguir (Tabela 3.1).

Tabela 3.1 Doses e estádios de aplicação da adubação nitrogenada no milho.

Doses de N (kg ha ⁻¹)	Estádios de aplicação ¹ (kg ha ⁻¹ de N)
0	
100	50 (V ₄) + 50 (V ₇)
200	50 (V ₄) + 150 (V ₇)
300	50 (V ₄) + 125 (V ₇) + 125 (V ₁₂)
400	50 (V ₄) + 175 (V ₇) + 175 (V ₁₂)

¹ De acordo com a escala de Ritchie *et al.* (1993).

3.2.3 Procedimento experimental

No outono-inverno foi cultivada aveia branca, que foi semeada em duas épocas, a primeira em 08 de maio e a segunda em 15 de julho de 2015, para que resultasse em rendimentos de massa seca similares por ocasião da semeadura do milho. A densidade de semeadura foi de 100 kg ha⁻¹ de sementes, com espaçamento entrelinhas de 17,0 cm. A adubação de base foi de 10, 60 e 30 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ e K₂O, respectivamente, utilizando-se 200 kg ha⁻¹ de adubo químico NPK, da fórmula 05-30-15. Em cobertura, aplicou-se 50 kg de N ha⁻¹ quando as plantas estavam com três a quatro folhas expandidas. Para determinação do rendimento de massa seca da parte aérea foram coletadas, no dia da realização da dessecação em cada época, quatro amostras de 0,25 m² de área representativa da área experimental. Posteriormente, estas foram secas em estufa a 60° C até atingir peso constante. Por regra de três simples, a produção de massa seca da área coletada foi extrapolada para um hectare. A dessecação da aveia foi realizada 30 dias antes da semeadura do milho em cada época. Na época de semeadura no início do período recomendado (15 de agosto de 2014) o

rendimento de massa seca de aveia branca foi de 0,9 Mg ha⁻¹ e na época de semeadura em período intermediário (13 de outubro de 2014), o rendimento de massa seca de aveia branca foi de 1,6 Mg ha⁻¹.

O genótipo de milho utilizado foi o P30F53 YR, da empresa Pioneer Sementes, que é um híbrido simples, com ciclo precoce, com eventos RR e Bt. Utilizou-se o sistema de semeadura direta para o milho em sucessão à aveia branca no outono-inverno. A densidade de plantas foi de 9,0 pl m⁻², com espaçamento entrelinhas de 0,5 m. A adubação na semeadura constou da aplicação de 25, 150 e 75 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ e K₂O, respectivamente, visando atingir alto rendimento (15,0 Mg ha⁻¹). O ajuste da densidade de plantas foi efetuado aos 14 dias após emergência das plântulas, com desbaste manual. Plantas daninhas, doenças e pragas foram controladas para não interferirem no rendimento de grãos.

A fonte de N utilizada foi a ureia com inibidor de urease. Para incorporar o N e minimizar perdas por volatilização, foram aplicados, logo após a realização das adubações nitrogenadas em cobertura no milho, 20 mm de água por irrigação por aspersão.

O milho foi irrigado sempre que necessário. A necessidade de irrigações complementares foi determinada baseada 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. Este é o valor próximo à umidade correspondente ao limite hídrico inferior da cultura do milho, obtido a partir da curva de retenção de água no solo da área experimental. Foi utilizado o sistema de irrigação por aspersão, com vazão de 8,0 mm por hora. Na Figura 3.1 são apresentados os dados de precipitação pluvial registrada na área experimental e das irrigações complementares realizadas durante o ciclo de desenvolvimento do milho.

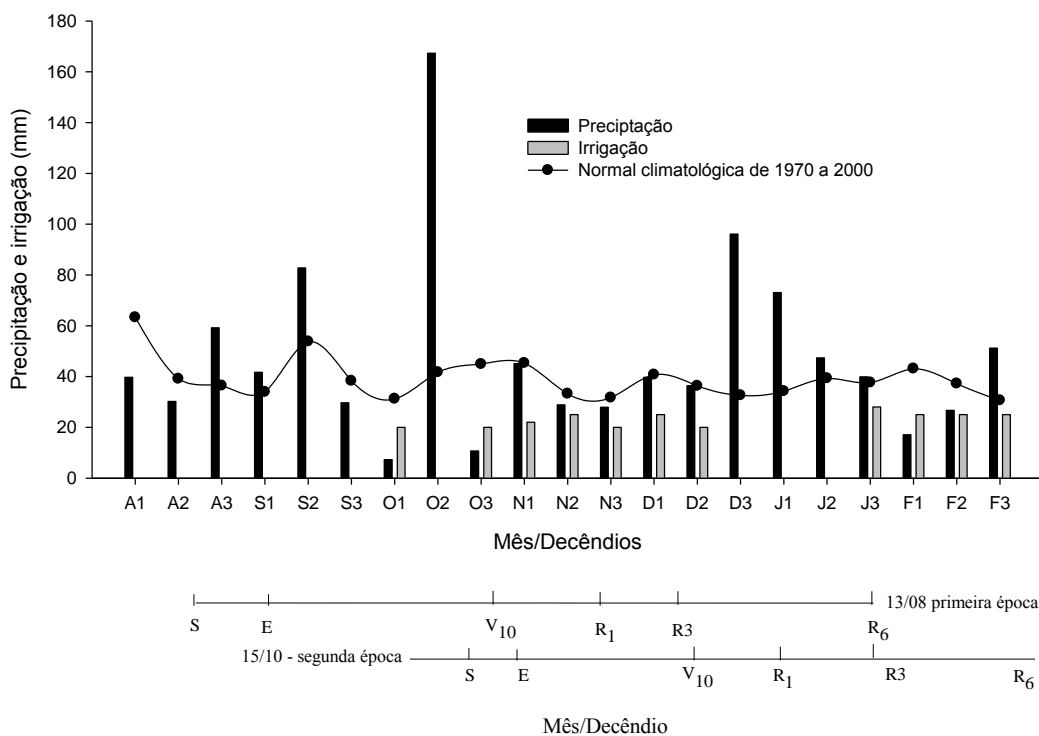


Figura 3.1 Precipitação pluvial e irrigação realizada por decêndio nos meses de agosto a fevereiro referente ao ano agrícola 2014/15 e à normal climatológica de 1970 a 2000. Eldorado do Sul-RS, RS. Fonte INMET, 2016.

Para estimar a quantidade de nitrogênio total no solo foram realizadas coletas de solo nas profundidades de 0-5, 5-10 e 10-20 cm, nas subparcelas que estavam em pousio no outono-inverno, no dia da semeadura do milho, nas duas épocas de semeadura. O teor de N total no solo foi determinado pela metodologia descrita por Tedesco *et al.* (1995). Para estimar a taxa de mineralização aparente do nitrogênio da matéria orgânica do solo foi utilizada a fórmula proposta por Fontoura e Bayer (2009):

$$\text{Taxa de mineralização aparente (\%)} = \frac{\text{N na biomassa do milho}}{\text{Estoque de N do solo (0-20 cm)}} \times 100$$

A estatura de planta foi determinada medindo-se com a régua a base do colmo até a extremidade da inflorescência masculina (pendão). Este parâmetro foi determinado no estágio de espigamento, em cinco plantas por unidade experimental.

A senescência foliar foi avaliada nos estádios R₁ (espigamento), R₃ (grãos leitosos) e R₄ (grãos pastosos), de acordo com a escala de Ritchie *et al.* (1993),

sendo obtida pela razão entre o número de folhas senescentes e o número total de folhas de cinco plantas por subparcela, sendo expressa em percentagem. Foram consideradas folhas senescentes aquelas que apresentavam menos de 50% da área da folha verde.

Para avaliação do rendimento de grãos, o milho foi colhido na maturação de colheita, aproximadamente sete a 10 dias após a maturação fisiológica, em uma área útil de 10,0 m² por subparcela. A subparcela era composta por oito linhas com 5 m de comprimento, sendo que somente as quatro linhas centrais foram colhidas para evitar o efeito “bordadura”. As espigas foram colhidas manualmente e, posteriormente, trilhadas em debulhador estacionário, para separar os grãos da palha, do sabugo e dos estigmas remanescentes. O rendimento de grãos foi obtido pela extrapolação da produção obtida na área útil para um hectare, corrigindo-se a umidade para 130 g kg⁻¹.

Avaliou-se, também, os componentes do rendimento, número de espigas por metro quadrado, número de grãos por espiga e peso do grão. O número de espigas por metro quadrado foi determinado pela razão entre o número de espigas colhidas na unidade experimental pelo valor da área útil colhida. 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⁻¹ e divisão da massa obtida por 200. Já o número de grãos por espiga foi calculado, indiretamente, da seguinte forma: obteve-se inicialmente o número de grãos das espigas da área útil pela razão entre o peso de grãos da área útil e o peso do grão. Após, dividiu-se este valor pela área útil, obtendo-se o número de grãos por metro quadrado. Por fim, o número de grãos por espiga foi obtido pela razão entre o número de grãos por metro quadrado e o número de espigas por metro quadrado.

A eficiência agronômica do uso do N (EAN) foi calculada conforme metodologia proposta por Baligar *et al.* (1990) pela fórmula: $EAN = (RF - RNF)/QNA$. Onde RF é o rendimento de grãos nos tratamentos com adubação nitrogenada (kg ha⁻¹), RNF é o rendimento de grãos no tratamento sem adubação nitrogenada (kg ha⁻¹) e QNA é a quantidade de N aplicada em cobertura (kg ha⁻¹).

3.2.4 Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F para os efeitos principais ($p < 0,05$) e para a interação ($p < 0,20$), conforme descrito por Perecin & Cargnelutti Filho (2008). Quando significativo, foram ajustadas curvas de respostas a N pela análise de regressão polinomial. Para comparação dos efeitos principais de época de semeadura aplicou-se o teste de Tukey ($p < 0,05$).

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

- a) Taxa de mineralização aparente da matéria orgânica do solo e rendimento de grãos de milho sem aplicação de N:

$$Y_{ij} = \mu_i + \text{erro}_{ij}$$

onde: i = média geral do experimento; e Erro = erro experimental.

- b) Rendimento de grãos de milho e características associadas ao desenvolvimento da planta:

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

onde: μ = média geral do experimento; B = bloco; E = época de semeadura; N = dose de N; $i = 1,2,3,4$; $j = 1,2$ e $k = 1,2,3,4,5$ e Erro = erro experimental.

- c) Eficiência agronômica do uso do N (EAN)

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

onde: μ = média geral do experimento; B = bloco; E = época de semeadura; N = dose de N; $i = 1,2,3,4$; $j = 1,2$ e $k = 1,2,3,4$ e Erro = erro experimental.

3.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para melhor entendimento, a apresentação dos resultados será dividida em quatro partes: radiação solar, regimes hídrico e térmico relativos às duas épocas de semeadura, características associadas ao desenvolvimento da planta, rendimento de grãos e componentes do rendimento e eficiência agrônômica de uso do N. Os Apêndices 1, 2 e 3 contém o resumo da análise de variância das variáveis avaliadas.

3.3.1 Radiação solar, temperatura e precipitação pluvial

A radiação solar global vigente durante o período experimental ficou muito próxima da média da normal climatológica (Figura 3.2). Em ambas as épocas de semeadura, durante o estágio R₁, florescimento, período em que a planta de milho possui maior área foliar, a radiação solar foi alta (450 cm⁻²dia⁻¹). Assim, é provável que a radiação solar não foi um fator limitante.

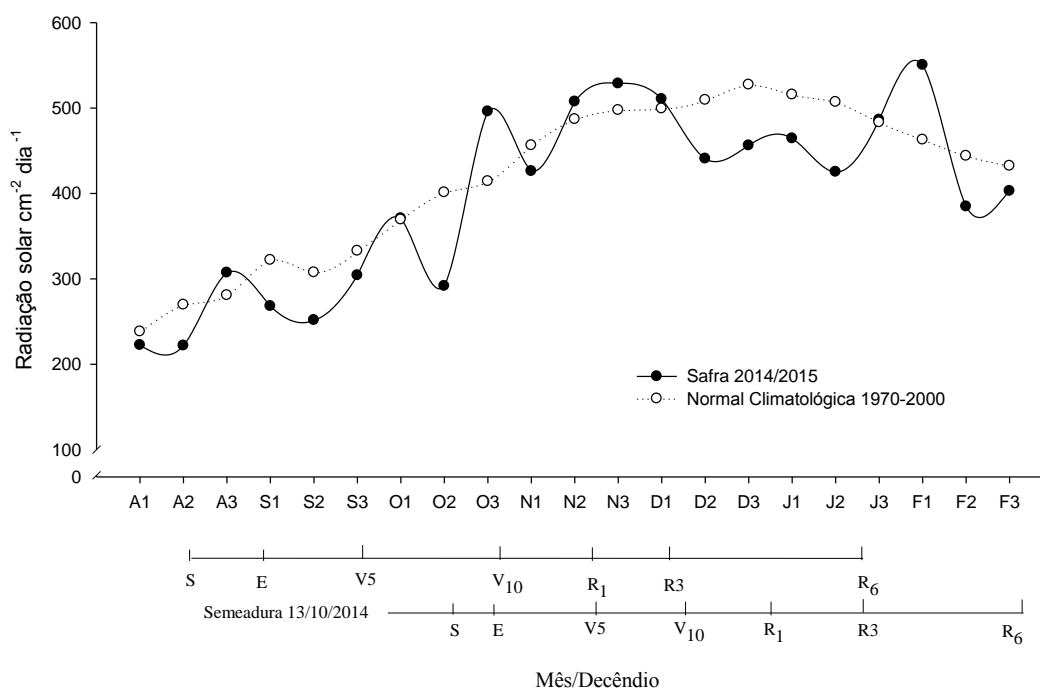


Figura 3.2 Radiação solar global por decêndio nos meses de agosto a fevereiro, referente ao ano agrícola 2014/15 e à normal climatológica de 1970 a 2000. Eldorado do Sul-RS. Fonte INMET (2016)

Durante a estação de crescimento do milho, ano agrícola 2014/15, a temperatura do ar foi, em média, 8 % maior em relação à normal climática durante

todo seu ciclo nas duas épocas de semeadura (Figura 3.3). Na época de semeadura de agosto, durante o período do segundo decêndio de agosto ao terceiro decêndio de janeiro, a temperatura média foi 13 % inferior à verificada na semeadura de outubro, a qual engloba o período do terceiro decêndio de outubro até o terceiro decêndio de fevereiro. Observa-se que a menor temperatura média durante o período experimental ocorreu no segundo decêndio de agosto, coincidindo com a data de semeadura do milho nessa época. Já na data de semeadura da segunda época (13 de outubro) as temperaturas foram maiores, por volta de 20 °C. Assim, as menores temperaturas médias registradas durante o período experimental afetaram mais as plantas de milho na época de semeadura de agosto em relação à de outubro. Na época de semeadura de agosto as baixas temperaturas fazem com que a plantas tenham menores desenvolvimento e crescimento vegetativo (Sangoi *et al.*, 2016).

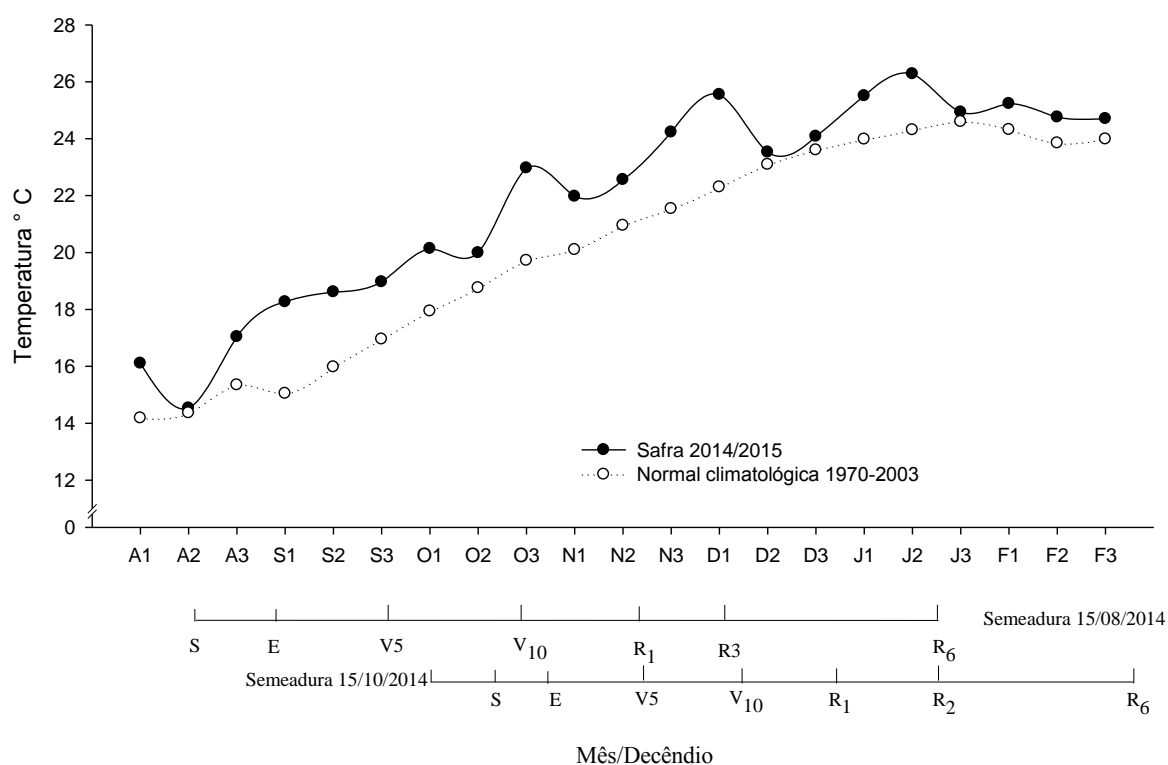


Figura 3.3 Temperatura média do ar por decêndio nos meses de agosto a fevereiro, referente ao ano agrícola 2014/15 e à normal climatológica relativa ao período 1970 a 2000. Eldorado do Sul-RS. Fonte INMET (2016).

Durante o ciclo do milho a precipitação pluvial foi 46 % maior na época de semeadura de agosto (793,3 mm) em relação à de outubro (540,2 mm) (Figura 3.1). Em função disso, a quantidade de água aplicada nas irrigações foi menor na

semeadura de agosto (152 mm) em relação à de outubro (235 mm). Assim, na época de semeadura de agosto a disponibilidade hídrica total (precipitação + irrigação) foi de 945,3 mm, enquanto na de outubro foi de 775,3 mm (Figura 3.1). Segundo a Embrapa (2006), a necessidade hídrica da cultura do milho durante seu ciclo varia de 500 a 700 mm. Assim, é provável que as plantas, devido à irrigação complementar, não tenham sofrido com deficiência hídrica em nenhuma das épocas de semeadura.

3.3.2 Características associadas ao desenvolvimento da planta

Para estatura de planta e diâmetro de colmo, houve efeito principal de épocas de semeadura, sendo, respectivamente, 16 e 22 % menores na época de semeadura de agosto em relação à de outubro (Tabela 3.2). Isso se deve à ocorrência de menores temperaturas do solo e do ar durante o ciclo de desenvolvimento do milho na época de semeadura de agosto (Figura 3.3). Em um experimento realizado no mesmo local, utilizando épocas de semeadura semelhantes (setembro e outubro) e nível de manejo similar, o diâmetro de colmo e estatura de planta também foram menores na época de semeadura antecipada (setembro) (Menegatti, 2013). No entanto, em uma condição edafoclimática diferente, sob condições naturais de precipitação, a estatura de planta não diferiu entre as épocas de semeadura testadas (setembro, outubro e novembro), provavelmente devido à limitação hídrica (Cantele, 2009).

Tabela 3.2 Estatura de planta, diâmetro de colmo e senescência foliar no estágio R₁, conforme escala de Ritchie *et al.* (1993), em função de época de semeadura. Eldorado do Sul-RS, 2014/15.

Características	Época de semeadura		CV ¹ %
	15/08/2014	13/10/2014	
Diâmetro de colmo (cm)	1,8 b*	2,1 a	5,9
Estatura de planta (m)	2,2 b	2,7 a	3,6
Senescência foliar R ₁ (%)	31,0 b	35,0 a	7,6

¹CV: coeficiente de variação. Médias seguidas por letras iguais, na linha não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Para senescência foliar no espigamento (R₁) foram significativos os efeitos principais de épocas e doses de N. Na época de semeadura de agosto, a senescência foliar foi 13 % menor quando comparada à semeadura de outubro (Tabela 3.2). É provável que isso tenha ocorrido devido à menor estatura de

planta na época de semeadura de agosto, que determinou menor demanda de fotoassimilados, resultando em menor senescência foliar.

A senescência foliar no estágio R_1 diminuiu à medida que se aumentou a dose de nitrogênio aplicada (Figura 3.4). A senescência foliar pode ser acelerada tanto pelo excesso como pela falta de carboidratos para suprir as demandas da planta. Para manter a atividade fotossintética das folhas é necessária uma faixa ótima de equilíbrio entre fonte e dreno (Maddoni *et al.*, 2002). Sob estresse por deficiência de N, pode ocorrer um desequilíbrio dessa faixa ótima e essa ficar abaixo do limite ideal. Assim, ocorre aceleração da senescência foliar devida à remobilização de N das estruturas vegetativas para as reprodutivas. Por outro lado, o acúmulo de carboidratos não estruturais nos cloroplastos, quando há excesso de energia, inibe a fotossíntese, devido à alta relação entre fonte e dreno, o que aumenta a senescência foliar (Rajcan & Tollenaar, 1999).

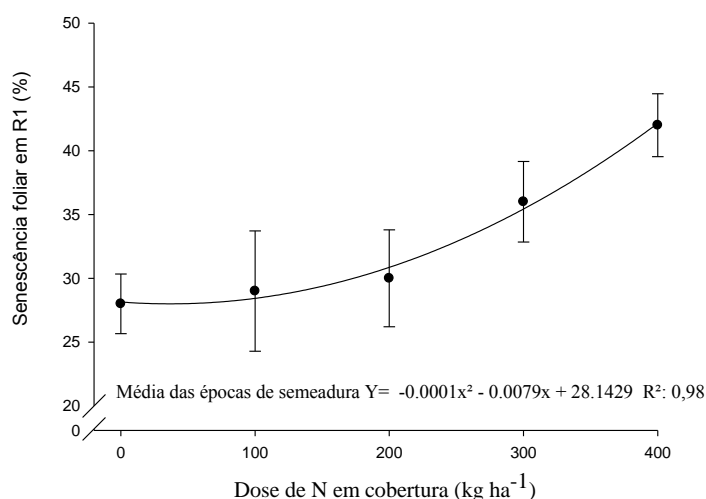


Figura 3.4 Senescência foliar no milho no estágio R_1 , conforme escala de Ritchie *et al.* (1993), em função de doses de N aplicadas em cobertura, na média de duas épocas de semeadura. Eldorado do Sul-RS, 2014/15.

Nas duas avaliações de senescência foliar realizadas mais tarde, nos estádios R_3 e R_4 , houve interação de épocas de semeadura e doses de N. No estágio R_3 , a senescência foliar diminuiu de forma quadrática e linear com o aumento da dose de N, respectivamente nas épocas de semeadura de agosto e outubro (Figura 3.5). Isso significa que, com o aumento da dose de N, a senescência foliar foi menor na época de semeadura de agosto. Já na avaliação realizada no estágio R_4 , a senescência foliar diminuiu de forma linear com o aumento da dose de N, em ambas as épocas. No entanto, também se observou

nessa avaliação menor senescência na época de semeadura de agosto com o incremento da dose de N.

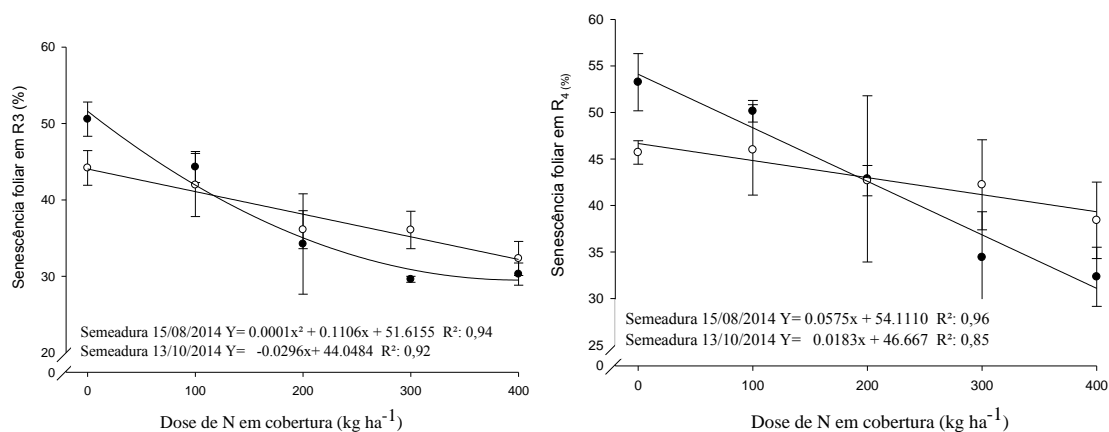


Figura 3.5 Senescência foliar do milho nos estádios R₃ e R₄, conforme escala de Ritchie *et al.* (1993), em função de doses de N aplicadas em cobertura, em duas épocas de semeadura. Eldorado do Sul-RS, 2014/15.

Quando se aplicou N em cobertura, especialmente a partir da dose de 200 kg ha⁻¹, verificou-se maior senescência foliar na época de semeadura de outubro em relação à de agosto (Figura 3.5). Nessa época de semeadura o desenvolvimento da planta foi maior do que na de agosto, devido à ocorrência de temperaturas mais altas (Figura 3.3). Plantas mais desenvolvidas possuem maior demanda por fotoassimilados, podendo haver maior competição por água, luz e nutrientes. Diante disso, pode ocorrer redução na disponibilidade de fotoassimilados para enchimento de grãos e para manutenção do resto da planta (Sangoi & Salvador, 1997). O aumento da demanda exercida pelos grãos por fotoassimilados conduz tecidos da raiz e da base do colmo a senescerem precocemente, deixando essas regiões mais frágeis (Tollenaar *et al.*, 1994).

Diferentemente do que ocorreu com a aplicação das diferentes doses de N em cobertura, observou-se que no tratamento sem aplicação de N em cobertura, houve maior senescência foliar na época de semeadura de agosto em relação à de outubro (Figura 3.5). Esse fato pode estar associado à menor contribuição de N vindo do solo, devido à menor temperatura do solo (Figura 3.3). Já na época de semeadura de outubro, devido à maior temperatura do solo, (Figura 3.3), é provável que se tenha maior disponibilidade de N vindo do solo, retardando,

assim, a senescência foliar nesse tratamento testemunha. A disponibilidade de N no solo está intimamente ligada à taxa de mineralização aparente da matéria orgânica do solo, a qual foi o dobro na época de semeadura de outubro (6,4 %) em relação à de agosto (3,2 %). Essa maior senescência foliar observada no tratamento sem aplicação de N na época de semeadura de agosto pode explicar, pelo menos parcialmente, os menores rendimentos de grãos obtidos nessa época nesse tratamento testemunha.

Para quantidade de N acumulada na parte aérea da planta no espigamento houve interação de épocas de semeaduras e doses de N. Enquanto na semeadura de agosto o N acumulado aumentou de forma linear com o incremento da dose de N, na de outubro a resposta foi quadrática (Figura 3.6). Exceto no tratamento testemunha, sem aplicação de N em cobertura, foram observadas menores quantidades de N acumulada por hectare nas plantas na época de semeadura de agosto em relação à de outubro. É provável que essa maior quantidade de N acumulado na época de semeadura de outubro ocorreu devido à maior demanda da planta para crescimento vegetativo.

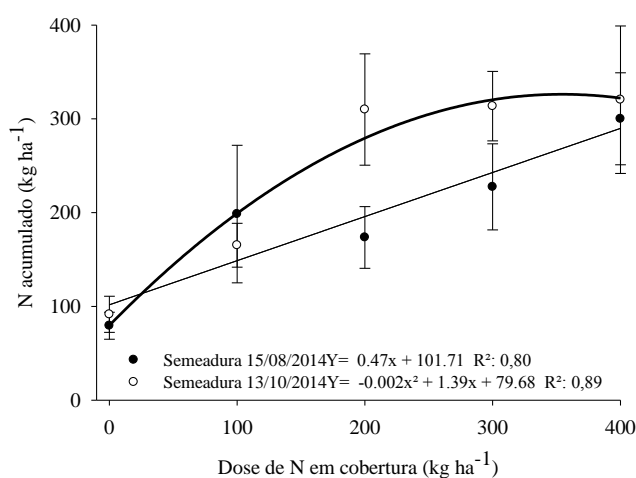


Figura 3.6 Quantidade de N acumulado por hectare na parte aérea do milho no espigamento em função de doses de N aplicadas em cobertura, em duas épocas de semeadura. Eldorado do Sul-RS, 2014/15.

3.3.3 Componentes do rendimento e rendimento de grãos de milho

Para dois dos componentes do rendimento, número de espigas por metro quadrado e número de grãos por espiga, foi significativo apenas o efeito principal de doses de N (Figuras 3.7 e 3.8), não variando em função de época de semeadura. Esses dois componentes do rendimento aumentaram de forma quadrática com o incremento da dose de N aplicada em cobertura. A redução no

número de espigas por metro quadrado sem a aplicação de N em cobertura deve ter ocorrido em função da falta de nitrogênio, assim aumentando a esterilidade de plantas. A deficiência de N também pode ter se refletido na diminuição do número de grãos por espiga. Isso deve ter ocorrido, pois o N é o nutriente mineral que o milho tem maior demanda, podendo ser limitante ao seu desenvolvimento, pois serve como muitos componentes da célula vegetal, incluindo aminoácidos, proteínas e ácidos nucleicos. Assim, a deficiência de N rapidamente inibe o crescimento vegetal. Se essa deficiência for prolongada, ocorre clorose, principalmente nas folhas mais velhas, próximas à base da planta (Taiz & Ziger, 2013). Quanto maior o nível de manejo, maior o rendimento de grãos. Isso se deve, principalmente, à elevação dos números de espigas por unidade de área e de grãos por espiga (Forsthofer *et al.* 2006).

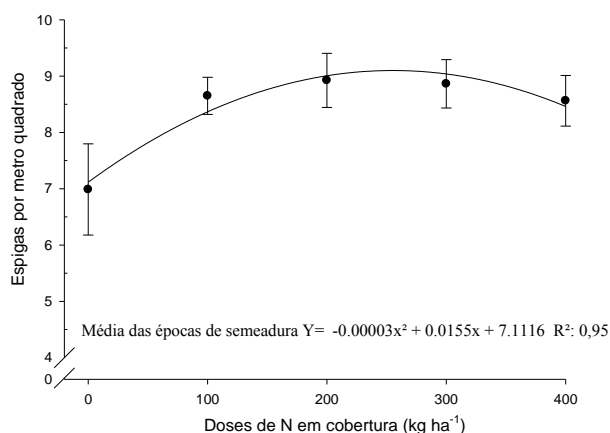


Figura 3.7 Número de espigas por metro quadrado de milho em função de doses de N aplicado em cobertura, na média de duas épocas de semeadura. Eldorado do Sul-RS, 2014/15.

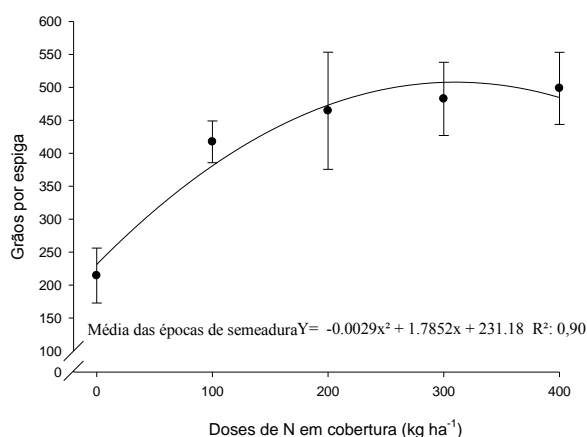


Figura 3.8 Número de grãos por espiga de milho em função de doses de N aplicado em cobertura, na média de duas épocas de semeadura. Eldorado do Sul-RS, 2014/15.

O peso do grão foi o componente mais associado ao rendimento de grãos. Houve interação de épocas de semeadura e doses de N (Figura 3.9). Na época de semeadura de agosto, o peso do grão aumentou de forma quadrática com o incremento da dose de N, enquanto na de outubro esse componente não foi afetado pela adubação nitrogenada em cobertura.

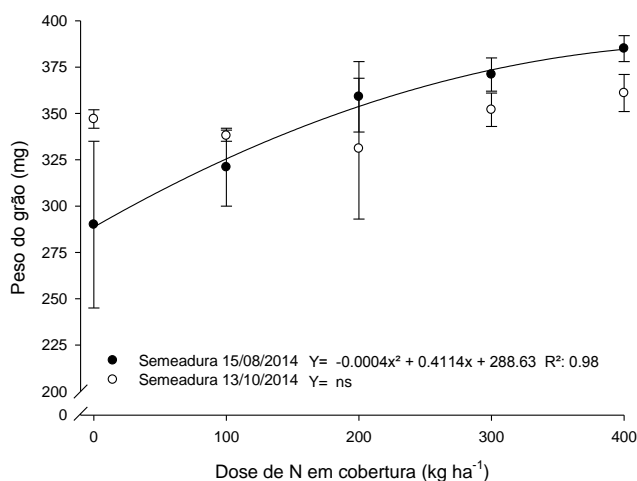


Figura 3.9 Peso do grão de milho em função de doses de N aplicado em cobertura, em duas épocas de semeadura. Eldorado do Sul-RS, 2014/15.

Exceto nos tratamentos testemunha, sem aplicação de N, e com a aplicação da menor dose de N (100 kg ha⁻¹), com a aplicação das demais doses de N o peso do grão foi maior na época de semeadura de agosto em relação à de outubro (Figura 3.9). Essa maior resposta das plantas à adubação nitrogenada na época de semeadura de agosto pode estar associada a menor estatura (Tabela 1) e ao menor desenvolvimento vegetativo da planta, devido às menores temperaturas do ar ocorridas nessa época (Figura 3.3). Assim, a planta desloca mais fotoassimilados (nitrogênio) para enchimento de grãos e menos para crescimento vegetativo.

Em pesquisas mais recentes conduzidas no Brasil e nos Estados Unidos da América foram verificadas respostas da produtividade de grãos à aplicação tardia de N (emborrachamento e espigamento), sendo mais pronunciadas nos híbridos modernos de milho, que apresentam maior absorção deste nutriente após o florescimento (Bruin & Butzen, 2014). A maior resposta dos híbridos cultivados atualmente a adubação nitrogenada em estádios mais tardios de aplicação se deve ao seu potencial produtivo mais alto e ao ciclo mais curto,

características que aumentam a demanda da planta por N durante o enchimento de grãos. Resultados similares ao do presente experimento, em que o peso do grão foi maior na época antecipada (setembro), comparada a época intermediária (outubro) utilizando a dose de 200 kg de N ha⁻¹, foram relatados anteriormente no mesmo local, estando de acordo com os dados obtidos (Menegatti, 2013).

De maneira inversa ao que ocorreu com a aplicação das diferentes doses de N, no tratamento testemunha, sem aplicação de N em cobertura, o peso do grão foi 19 % maior na época de semeadura de outubro em relação à de agosto (Figura 3.9). Isso pode estar relacionado à maior disponibilidade de N no solo, em função da maior taxa de mineralização aparente da matéria orgânica (Tabela 3.3), devida às maiores temperaturas do ar na semeadura de outubro (Figura 3.3).

Tabela 3.3 Rendimento de grãos de milho no tratamento sem aplicação de N em cobertura em sucessão à aveia branca e ao pousio no outono-inverno e taxa de mineralização aparente da matéria orgânica do solo (MOS), em duas épocas de semeadura. Eldorado do Sul-RS, 2014/15.

Características	Época de semeadura		CV (%) ¹
	15/08/2014	13/10/2014	
Rendimento de grãos de milho em sucessão à aveia branca (Mg ha ⁻¹)	4,2 a *	4,8a	21,6
Rendimento de grãos de milho em sucessão ao pousio (Mg ha ⁻¹)	3,3 b	6,8 a	11,4
Taxa de mineralização da MOS (%)	3,2 b	6,4 a	24,9

¹CV: coeficiente de variação. Médias seguidas por letras iguais não diferem significativamente, na linha pelo teste de Tukey (p<0,05).

Para rendimento de grãos houve interação de épocas de semeadura e doses de N (Figura 3.10), similarmente ao que ocorreu com o componente peso do grão. Nas duas épocas de semeadura, o rendimento de grãos aumentou de forma quadrática com o incremento da dose de N aplicada (Figura 3.10). Assim, as doses de máxima eficiência técnica foram de 394 e 364 kg de N ha⁻¹, respectivamente nas épocas de semeadura de agosto e outubro.

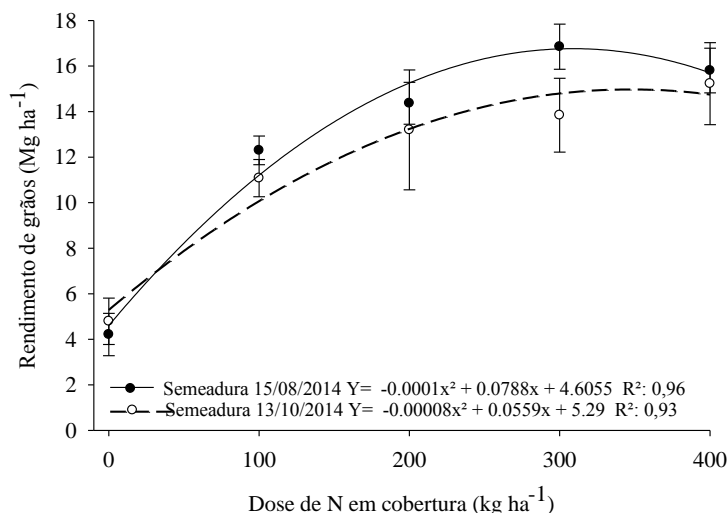


Figura 3.10 Rendimento de grãos de milho em função de doses de aplicação de N em cobertura, em duas épocas de semeadura. Eldorado do Sul-RS, 2014/15.

O peso do grão foi o componente do rendimento mais associado ao rendimento de grãos. Na época de semeadura de agosto, esse aumentou com o incremento das doses de N (Figura 3.9). No entanto, na época de semeadura de outubro, esse componente não foi afetado pela adubação nitrogenada em cobertura. Os demais componentes não foram influenciados pelas épocas de semeaduras, somente pelas doses de N em cobertura (Figura 3.7 e 3.8).

A resposta das plantas de milho à adubação nitrogenada foi maior na época de semeadura de agosto em relação à de outubro. Com as mesmas doses de N, o rendimento de grãos de milho foi maior na época de semeadura de agosto em relação à de outubro, exceto na testemunha sem N (Figura 3.10). Isso pode estar relacionado principalmente a, temperatura diurna e a temperatura noturna. Entre os diversos fatores que reduzem o crescimento e o desenvolvimento da planta se destacam a temperatura, disponibilidade de água e radiação solar, sendo que sua ação varia com o estágio fenológico da planta (Alves *et al.*, 2010). Assim, o que pode explicar a maior resposta das plantas de milho à adubação nitrogenada em cobertura na semeadura de agosto, exceto na testemunha, quando comparada às plantas da época de semeadura de outubro são as menores temperaturas do ar (Figura 3.3).

Além disso, temperaturas elevadas principalmente no período noturno (superior a 24° C) promovem um consumo energético elevado, em função do aumento da respiração celular, diminuindo o saldo de fotoassimilados, com

consequente queda no rendimento de grãos da cultura (Cantele, 2009). Temperaturas noturnas elevadas restringem o rendimento de grãos, pois à noite a planta continua respirando, no entanto paralisa a fotossíntese, ocorrendo o consumo de produtos metabólicos produzidos de dia (Grossi *et al.*, 2011).

Com relação à radiação solar incidente, em ambas as épocas de semeadura, durante o estágio R₁, florescimento, período em que a planta de milho possui maior área foliar, a radiação solar foi alta (450 cm⁻²dia⁻¹). Assim, é provável que a radiação solar não foi um fator limitante para o rendimento de grãos.

Outras características também influenciaram a maior resposta das plantas de milho à adubação nitrogenada em cobertura na época de semeadura de agosto quando comparada à de outubro, dentre elas a senescência foliar e a estatura de planta. Na época de semeadura de agosto as plantas apresentaram, considerando um mesmo estágio de desenvolvimento, menor estatura em relação às plantas da época de semeadura de outubro (Tabela 3.2), devido à ocorrência de menores temperaturas do ar (Figura 3.3). Em plantas menos desenvolvidas, há menor gasto de fotoassimilados em crescimento vegetativo, havendo maior disponibilidade dos mesmos para enchimento de grãos. Com efeito, a percentagem de senescência foliar, avaliada nos estádios R₃ e R₄, foi menor na época de semeadura de agosto em relação à de outubro, exceto no tratamento sem N e na dose de 100 kg de N ha⁻¹ em cobertura (Tabela 3.2). Isto evidencia que houve a necessidade de menor mobilização de nutrientes das folhas mais velhas para as mais novas nessa época antecipada.

Com a diminuição da senescência foliar, a planta permanece com maior área fotossintética ativa. Dessa forma, é possível que se tenha maior translocação de fotoassimilados para o enchimento de grãos, contribuindo para o aumento do rendimento de grãos. A atividade fotossintética das folhas durante o período de enchimento de grãos também foi associada ao incremento no rendimento de grãos de milho (Tollenaar & Lee 2003; Valentinuz & Tollenaar, 2003).

Maiores rendimentos de grãos de milho na época de semeadura antecipada (setembro) também foram obtidos anteriormente no mesmo local, com as doses de 100, 200 e 300 kg de N ha⁻¹, quando comparada à época intermediária de semeadura (outubro) (Menegatti, 2013; Menezes, 2015). Em condições edafoclimáticas distintas (solos argilosos e temperaturas amenas), com irrigação complementar, quando utilizada as doses de 40, 80, 120, 160, 200 e 240

kg de N ha⁻¹, as plantas de milho da época de semeadura antecipada (setembro), também apresentaram maiores rendimentos de grãos de milho quando comparadas às plantas da época de semeadura intermediária (outubro) (Silva, 2008).

No tratamento sem N em cobertura em que o milho sucedeu ao pousio, o rendimento de grãos foi 102 % maior na época de semeadura de outubro em relação à de agosto (Tabela 3.3). Resultados similares foram obtidos por Menezes (2015) e Pagliarini (2016) em experimentos anteriores realizados no mesmo local. Uma possível explicação para isso seria a maior taxa de mineralização aparente da matéria orgânica do solo, que foi 118 % maior quando a cultura foi implantada na época de semeadura de outubro em relação à agosto (Tabela 3.3). Essa maior mineralização da matéria orgânica do solo (MOS) pode ter sido em função da maior temperatura do solo na época intermediária de semeadura (outubro) (Figura 3.3), que torna os microrganismos do solo mais ativos. A qualidade do substrato (Frey *et al.*, 2013), e a sua disponibilidade (Fissore *et al.*, 2013), a estrutura da comunidade microbiana (Wei *et al.*, 2014), assim como fatores ambientais (temperatura, umidade, precipitação) (Conant *et al.*, 2011) influenciam a taxa de mineralização da MOS.

3.3.4 Eficiência agrônômica de uso de nitrogênio (EAN)

Para EAN houve interação de épocas de semeaduras e doses de N (Figura 3.11). Com a aplicação de N observou-se maior eficiência do uso do N na época de semeadura de agosto em relação à de outubro. A EAN foi 31, 19, 45 e 7 % maior com a aplicação das doses de 100, 200, 300 e 400 kg de N ha⁻¹, respectivamente, na época de semeadura de agosto em relação à de outubro. (Figura 3.11). Isso pode estar associado ao menor desenvolvimento vegetativo da planta na época de semeadura de agosto (Tabela 3.3), devido à ocorrência de menores temperaturas do ar (Figura 3.3). Outro fator que pode explicar esse fato é o rendimento de grãos, o qual foi superior na época de semeadura de agosto quando comparada à de outubro (Figura 3.10). Em altas doses de N, é provável que a planta possua N suficiente para crescimento e enchimento de grãos, assim, minimizando as diferenças na eficiência agrônômica do uso do N entre épocas de semeadura. Em arroz irrigado também se observou redução da EAN com o atraso da época de semeadura de outubro para dezembro (Freitas, 2007).

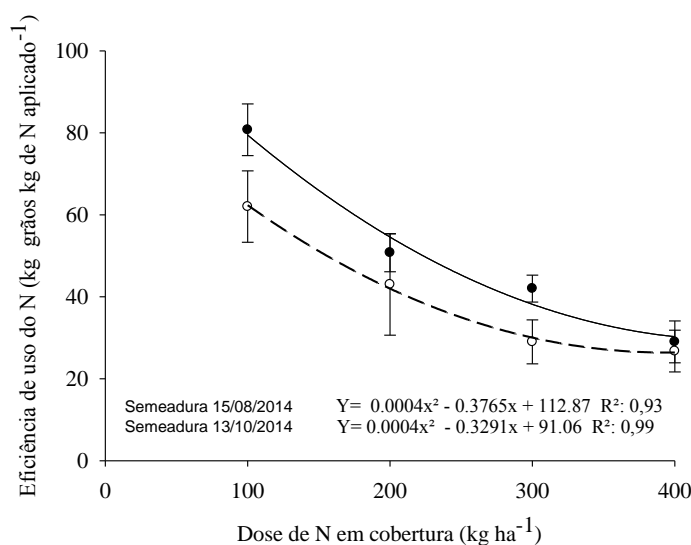


Figura 3.11 Eficiência agrônômica de uso do N (EAN) em milho em função de doses de N aplicado em cobertura, em duas épocas de semeadura. Eldorado do Sul- RS, 2014/15.

Nas duas épocas de semeadura, a EAN diminuiu de forma quadrática com o incremento da dose de N aplicada (Figura 3.11). Esses resultados estão de acordo com a Lei de Mitscherlich. Segundo essa lei, quando se aplicam doses crescentes de um nutriente, o aumento no rendimento é elevado inicialmente, mas decresce posteriormente (Andrade *et al.*, 2014). Decréscimos na EAN com o incremento da dose de N também foram observados por Sangoi *et al.* (2015) e Mota *et al.* (2015) em milho e por Freitas (2007, em arroz irrigado).

3.4 CONCLUSÕES

A antecipação da semeadura do milho para o início do período recomendado é uma estratégia eficiente para aumentar a resposta do rendimento de grãos à adubação nitrogenada em cobertura e a eficiência agrônômica de uso do N em relação à semeadura realizada num período intermediário.

3.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ANDRADE, C. L. T. et al. **Viabilidade e Manejo da Irrigação da Cultura do Milho**. Sete Lagoas: Embrapa, 2006.

ANDRADE, F.H. Analysis of growth and yield of maize, sunflower and soybean grown at Balcarce, Argentina. **Field Crops Research**, Buenos Aires, v.41, p.1-12, 1995.

ARGENTA, G.; SILVA, P.R.F. da; SANGOI, L. Arranjo de plantas em milho: análise do estado-da-arte. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.31, p.1075-1084, 2001.

BALIGAR, V. C.; DUNCAN, R. R.; FAGERIA, N, K. Soil-plant interaction on nutrient efficiency in plants: an overview. In Baligar, R. V.; Duncan, R. R. (Ed.). **Crops as enhancers of nutrient use**. San Diego: Academic, 1990. p. 351- 373.

BRUIN, J.; BUTZEN, S. Nitrogen Uptake in Corn. **Crop Insights**, v.24, n. 4, Illinois, 2014

BÜLL, L. T. Nutrição mineral do milho. In: BÜLL, L. T.; CANTARELLA, H. (Ed.). **Cultura do milho: fatores que afetam a rendimento**. Piracicaba: Potafos, 1993. p. 63-145.

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

CANTELE, E. F. **Desempenho da cultura de milho em diferentes**. 73 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agronomia, Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz - Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

CONANT, R.T., et al., Temperature and soil organic matter decomposition rates - synthesis of current knowledge and a way forward. **Global Change Biology**, Colorado, v. 17, p. 3392-3404, 2011.

FISSORE, C., et al., Reduced substrate supply limits the temperature response of soil organic carbon decomposition. **Soil Biology & Biochemistry**, Whittier, v. 67, 306-311, 2013.

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

FORSTHOFER, E. L. et al. Desempenho agrônômico e econômico do milho em diferentes níveis de manejo e épocas de semeadura. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 3, p.399-407, 2006.

FREITAS, T. F. S. **Densidade de semeadura e adubação nitrogenada em cobertura na época de semeadura tardia de arroz irrigado**. 68 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

FREY, S.D., et al. The temperature response of soil microbial efficiency and its feedback to climate. **Nature Climate Change**, Massachusetts v. 3, p. 395-398, 2013.

GOMES, R. F.; et al. Efeito de doses e da época de aplicação de nitrogênio nos caracteres agronômicos da cultura do milho sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência sem s do Solo**, Campinas, v. 31, 931-938, 2007.

GROSSI, M. C.; et al. Influência da radiação solar e da temperatura do ar na rendimento potencial simulada do milho (*Zea mays*) em Sete Lagoas, MG. In: Congresso brasileiro de agrometeorologia, 17., 2011, **Anais...**Guarapari-ES, 2011.

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/>>. Acesso em: 12 set. 2016.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DE SOLO – NÚCLEO REGIONAL SUL. **Manual de calagem e adubação: para os estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. Santa Maria: Comissão de Química e Fertilidade do Solo – RS/Sc, 2016. 376 p.

LOOMIS, R.S., AMTHOR, J.S. Yield potential, plant assimilatory capacity, and metabolic efficiencies. **Crop Science**, Madison, v.39, p.1584-1596, 1999.

MADDONI, G. A. et al. Maize leaves turn away from neighbors. **Plant Physiology**, Bethesda, v. 130, p.1181-1189, 2002.

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

MENEZES, G. B. **Estratégias de manejo para minimizar perdas de N por volatilização e aumentar o rendimento de grãos de milho irrigado**. 70 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Fitotecnia, 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.

PERECIN, D. & CARGNELUTTI FILHO, A. Efeitos por comparações e por experimento em interações de experimentos fatoriais. **Ciencia e Agrotecnologia**, v. 32, n. 1, p. 68-72, 2008.

RAJCAN, I.; TOLLENAAR, M. Source:sink ration and leaf senescence in maize. 1. Dry matter accumulation and partitioning during grain filling. **Field Crops Research**, Amsterdam, v. 60, p. 245- 253, 1999.

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. 87 p.

SANGOI, L., SALVADOR, R.J. Dry matter production and partitioning of maize hybrids and dwarf lines at four plant populations. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 27, n.1, p.1-6, 1997.

SANGOI, L. et al. Senescência foliar e resposta de híbridos de milho liberados comercialmente para cultivo em diferentes épocas ao adensamento. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v. 12, n. 1, p.21-32, jan. 2013.

SANGOI, L. et al. Desempenho agrônômico do milho em razão do tratamento de sementes com *Azospirillum* sp. e da aplicação de doses de nitrogênio mineral. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, Viçosa, v. 39, n. 1, p.1141-1150, 2015.

SANGOI L.; SILVA P. R. F. (Santa Catarina). Crescimento, desenvolvimento e épocas de semeadura. In: WORDELL FILHO, J. A.; CHIARADIA, L. A. (Org.). **A cultura do milho em Santa Catarina**. 3. ed. Florianópolis: Dioesc, 2016. Cap. 2. p. 25-83.

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

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.

SILVA, M. B. **Épocas de semeadura e características agrônômicas de híbridos de milho irrigado cultivados com diferentes doses de nitrogênio**. 72 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agronomia, Universidade de Passo Fundo, Passo Fundo, 2008.

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

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 5. ed. Porto Alegre: Artmed, 2013. 954 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)

TOLLENAAR M., A. AHMADZADEH, E.A. LEE, Physiological basis for grain yield improvement in maize. . **Crop Science Society of America**, Nova York, v. 44, n 6, p. 2086-2094, 2002.

TOLLENAAR, M.; LEE, E. Yield potential, yield stability and stress tolerance in maize. **Field Crop Research**, Amsterdam, v. 75, p. 161-169, 2002.

VALENTINUZ, O. R.; TOLLENA, M. Vertical Profile of Leaf Senescence during the Grain-Filling Period in Older and Newer Maize Hybrids. **Crop Science Society of America**, Nova York, v. 44, n. 3, p.827-834, 2003.

WEI, H., et al., Thermal acclimation of organic matter decomposition in an artificial forest soil is related to shifts in microbial community structure. **Soil Biology & Biochemistry** v. 71, p. 1-12, 2014.

4 CAPÍTULO 2 – EFICIÊNCIA DE FERTILIZANTES NITROGENADOS ESTABILIZADOS EM MILHO

RESUMO

O nitrogênio (N) é o nutriente mais complexo de se manejar, pois está sujeito a múltiplas reações químicas e biológicas. Dentre as maneiras de reduzir perdas e aumentar sua eficiência está o uso de fontes de N estabilizadas, como os inibidores de urease e de nitrificação. O objetivo do trabalho foi avaliar a eficiência agrônômica de fertilizantes nitrogenados estabilizados aplicados em cobertura em milho num Argissolo Vermelho Distrófico típico. A pesquisa foi conduzida a campo durante o ano agrícola 2015/16 em Eldorado do Sul, estado do Rio Grande do Sul, Brasil. O delineamento experimental foi o de blocos casualizados, dispostos em fatorial 4 X 3, com quatro repetições. Os tratamentos consistiram de quatro fontes de adubo nitrogenado aplicadas em cobertura: ureia comum, ureia com inibidor de urease, ureia com inibidor de nitrificação e ureia combinada com os dois inibidores, e três doses de N em cobertura (50, 120 e 270 kg ha⁻¹). Uma testemunha sem aplicação de N em cobertura no milho foi incluída. O híbrido regente foi o AG 9025, com tecnologia PRO3. A senescência foliar e as perdas de N por volatilização de amônia foram menores quando utilizada a ureia com inibidor de urease, de forma isolada ou associada ao inibidor de nitrificação, em relação à ureia comum, nas doses de N intermediária (120 kg ha⁻¹) e alta (270 kg ha⁻¹). A resposta do rendimento de grãos de milho a fontes de N dependeu da dose de N aplicada em cobertura. Na mais baixa (50 kg ha⁻¹), não houve efeito de fontes de N. Na dose intermediária, o rendimento de grãos aumentou em 20,5 % (1,8 Mg ha⁻¹) e 10,5 % (0,9 Mg ha⁻¹) com a aplicação da ureia com inibidor da urease e da ureia com os dois inibidores, respectivamente, em relação à ureia comum. Na dose alta (270 kg ha⁻¹), o rendimento de grãos foi 11 % (1,2 Mg ha⁻¹) e 24,2 % (2,7 Mg ha⁻¹) maior quando se utilizou a ureia com inibidor da urease e a com os dois inibidores, respectivamente, em relação à ureia comum. O uso da ureia com inibidor da urease, nas doses de N intermediária e alta, e o da ureia com os dois inibidores, na dose mais alta, são estratégias eficientes para obtenção de maiores rendimentos de grãos e maior eficiência de uso do N em relação à ureia comum. Já a adição do inibidor da nitrificação não aumenta a eficiência de uso de N da ureia comum.

4 CHAPTER 2 – EFFICIENCY OF STABILIZED NITROGEN FERTILIZERS IN MAIZE

ABSTRACT

Nitrogen (N) is the most complex nutrient to handle because it is subject to multiple chemical and biological reactions. Among the ways to reduce losses and increase N efficiency is the use of stabilized N sources, such as urease and nitrification inhibitors. The objective of this study was to evaluate the agronomic efficiency of stabilized nitrogen fertilizers in top dressing application in maize in a Ultisol. The experiment was conducted during the 2015/16 growing season, in Eldorado do Sul, state of Rio Grande do Sul, Brazil. The experimental design was randomized block design, arranged in a 4 x 3 factorial, with four replications. Treatments consisted of four nitrogen fertilizer sources: common urea, urea with urease inhibitor, urea with nitrification inhibitor and urea combined with the two inhibitors and three N doses in top dressing (50, 120 and 270 kg ha⁻¹). A control without N application in top dressing in maize was included. The hybrid regent was AG 9025, with PRO3 technology. Leaf senescence and N losses due to volatilization of ammonia were lower with the application of urea with urease inhibitor, alone or in combination with nitrification inhibitor, in relation to the common urea at intermediate (120 kg ha⁻¹) and high (270 kg ha⁻¹) N rates. Maize grain yield response to N sources depended on N dose applied in top dressing. At the lower dose (50 kg ha⁻¹), there was no effect of N sources. At the intermediate dose, grain yield increased by 20.5 (1.8 Mg ha⁻¹) and 10.54 % (0.9 Mg ha⁻¹) with the application respectively of urea with urease inhibitor and urea with the two inhibitors in relation to common urea. At the highest N dose (270 kg ha⁻¹), grain yield was 11 % (1.2 Mg ha⁻¹) and 24.2 % (2.7 Mg ha⁻¹) higher with the application, respectively, of urea with urease inhibitor and urea with the two inhibitors, in relation to common urea. The use of urea with inhibitor of urease, at the intermediate and high N doses, and urea with the two inhibitors, at the highest dose, are efficient strategies to obtain higher grain yields and to improve N efficiency use in relation to common urea. However, the addition of the nitrification inhibitor does not increase N efficiency use of common urea.

4.1 INTRODUÇÃO

O milho é uma das culturas mais exigentes em nitrogênio (N), sendo que os baixos teores de N no solo são um dos principais limitantes à produtividade de grãos (Civardi *et al.* 2011). No entanto, é o nutriente que a planta tem maior demanda, pois integra os aminoácidos e os ácidos nucleicos, além de outros componentes (Epstein & Bloom, 2006). O N está, também, envolvido no desenvolvimento da área foliar, na taxa de fotossíntese, no crescimento radicular, no tamanho de espigas e no número e na massa de grãos (Vargas, 2010).

A eficiência do N proveniente de fertilizantes minerais é variável, sendo dificilmente superior a 50 % da quantidade aplicada (Lara Cabezas *et al.*, 2000). É o nutriente mais complexo de se manejar, pois está sujeito a múltiplas reações químicas e biológicas, as quais são dependentes das condições edafoclimáticas e da capacidade de absorção pela planta (Cantarella & Duarte, 2004). Somente parte do N mineral oriundo da aplicação é absorvido pelas plantas. Devido às inúmeras reações químicas e biológicas que ocorrem no solo, parte do N é perdida do sistema solo-planta-atmosfera por diversos processos, dentre eles: a lixiviação, a volatilização, a erosão e a desnitrificação. No entanto, parte do N continua no solo na forma orgânica (Vargas, 2010).

Dentre os mecanismos de perdas, destaca-se a volatilização de amônia (N-NH₃). As perdas por volatilização de amônia podem ser: derivadas do amônio, em função da mineralização da matéria orgânica, ou do fertilizante aplicado (Fenn & Kissel, 1973). Devido a seu menor custo e à maior concentração de N (~44%), a ureia é a fonte de N mineral mais utilizada para atender à demanda da planta (Saiz-Fernández *et al.*, 2015). Quando aplicada ao solo, a ureia é transformada pela urease (enzima presente no solo) em carbonato de amônio. Assim, ocorre a elevação do pH ao redor do grânulo, podendo haver perdas de N-NH₃ por volatilização (Bissani *et al.*, 2008). Devido à complexa dinâmica do N, a eficiência

da ureia aplicada é baixa, estando em torno de 50 % (Franco *et al.*, 2011; Saiz-Fernández *et al.*, 2015).

A atividade da enzima urease depende da temperatura, do pH e da umidade do solo. Em solo seco, a ureia pode permanecer estável. Entretanto, à medida que ocorre um incremento na umidade do solo, a taxa de hidrólise aumenta até que a umidade atinja 20 % (Volk, 1959). Com a finalidade de diminuir perdas de N por volatilização de amônia e, com isso, aumentar o aproveitamento de N pelas plantas, pode-se utilizar inibidores da urease. A ureia com inibidor da urease permanece maior tempo no solo sem que ocorram perdas significativas por volatilização de amônia, até que possa ser incorporada pela precipitação pluvial e/ou irrigação (Menezes, 2015). Em experimentos anteriores conduzidos em Eldorado do Sul-RS, verificou-se a eficiência de uso do inibidor da urease como estratégia pra reduzir perdas de N por volatilização (Menezes, 2015).

Outra causa importante de perdas de N é pelo processo de lixiviação de nitrato, que consiste no movimento vertical desse íon no perfil do solo para profundidades abaixo das exploradas pelas raízes (Ernani, 2008). A lixiviação de N-NO_3^- é influenciada por diferentes fatores, como textura do solo, quantidade e tipo de adubo aplicado, exigência e absorção de N pelas plantas, quantidade e frequência de precipitação pluvial, manejo da irrigação e transformações do N, como mineralização, imobilização e desnitrificação (Campbell *et al.*, 1993). Em áreas de alta precipitação pluvial, é a reação de maior importância que ocorre com o N, principalmente em solos de países de clima tropical (Ernani, 2008).

As principais formas de N disponíveis para as plantas são o amônio (N-NH_4^+) e o nitrato (N-NO_3^-) que, no entanto, representam menos de 5 % do N total do solo (Ernani, 2003). Por possuírem carga predominantemente negativa, os íons N-NO_3^- não são retidos na fase sólida do solo. Assim, ficam normalmente dissolvidos em sua solução e podem ser lixiviados com maior ou menor intensidade, dependendo da percolação de água no perfil de solo. Dessa forma, sua disponibilidade reduz-se para as plantas, com aumento de riscos de contaminação de águas superficiais e subsuperficiais. (Jadoski *et al.*, 2010). Estima-se que cerca de 10 a 30 % do N aplicado no solo é perdido pelo processo de lixiviação (Meisinger *et al.*, 2008).

Dentre as práticas que têm sido utilizadas para reduzir perdas de N por lixiviação e aumentar a eficiência de uso do N, destaca-se o uso de inibidores da nitrificação (Cui *et al.*, 2011; Moir *et al.*, 2012). Eles têm como objetivo diminuir

perdas de N, principalmente pela lixiviação do íon nitrato. Sua adição aos adubos nitrogenados diminui a formação de $N-NO_3^-$ no solo, fazendo com que o N permaneça na forma amoniacal, que é menos sujeita à lixiviação (Trenkel, 1997). Em estudo anterior realizado em Eldorado do Sul verificou-se que a aplicação de um excesso hídrico de 160 mm reduz os teores de amônio e nitrato do solo, principalmente quando utilizadas altas doses de N, indicando que houve perdas por lixiviação (Pagliarini, 2016). No entanto, nesse estudo não foi testado o uso de inibidor da nitrificação. Portanto, não se dispõe de dados sobre o uso de inibidores da nitrificação para as condições do estado do Rio Grande do Sul.

Neste contexto, estratégias de manejo que visem minimizar perdas e otimizar o uso de N devem ser consideradas. Assim, necessita-se avaliar a eficiência do inibidor da nitrificação isolado ou associado ao inibidor da urease em condições de solo arenoso, onde ocorrem as maiores perdas por lixiviação, como é o caso da Depressão Central do RS. O aperfeiçoamento do manejo e da recomendação da adubação nitrogenada é importante para aumentar a eficiência de uso do fertilizante pela planta, minimizar impactos ambientais e diminuir o custo de produção para o agricultor.

Com isso, as hipóteses do presente trabalho foram: a) a utilização de ureia com inibidor de urease diminui as perdas de N por volatilização de $N-NH_3$; b) a adição do inibidor da nitrificação à ureia comum é eficiente para mitigar o processo de nitrificação, minimizando a lixiviação de $N-NO_3^-$ no perfil de um Argissolo; c) maiores perdas de N por lixiviação e volatilização resultam em menor disponibilidade de N para absorção pelas plantas e, em consequência, em menores rendimento de massa seca e quantidades de N acumulado na parte aérea da planta, rendimento de grãos e eficiência agrônômica de uso do N e maior senescência foliar.

Para testar essas hipóteses, foi conduzido um experimento a campo, no ano agrícola 2015/16, com os objetivos de a) quantificar os efeitos de fontes de N, em três doses, nas perdas de N por volatilização de $N-NH_3$; b) avaliar os teores de $N-NH_4^+$ e $N-NO_3^-$ no perfil de um Argissolo, no estágio de espigamento do milho, em função de fontes de N aplicado em cobertura, sob três doses de N e c) avaliar os efeitos de inibidores da urease e da nitrificação, aplicados isoladamente ou em combinação, na absorção de N pelas plantas, na senescência foliar, no rendimento de massa seca e na quantidade de N acumulado na parte aérea da

planta, no rendimento de grãos e componentes do rendimento e na eficiência agrônômica de uso do N pelo milho.

4.2 MATERIAL E MÉTODOS

4.2.1 Caracterização do ambiente

A pesquisa foi conduzida a campo durante o ano agrícola 2015/16 em Eldorado do Sul (30° 05' latitude Sul, 51° 39' longitude Oeste e 42 m altitude), região ecoclimática da Depressão Central, do estado do Rio Grande do Sul. O clima da região é subtropical úmido, de verão quente, do tipo fundamental "Cfa", conforme classificação climática de Köppen, com temperatura média anual de 19,4° C, variando de 9° C no mês mais frio e 29° C no mês mais quente do ano. A precipitação pluvial média anual é de 1.455 mm, com curtos períodos de déficit hídrico no verão (Bergamaschi *et al.*, 2013).

O solo da área experimental é classificado como Argissolo Vermelho Distrófico típico (Streck *et al.*, 2008). As amostras de solo foram coletadas em maio de 2015 e apresentaram os seguintes resultados: argila: 240 g kg⁻¹; pH (água): 5.3; P: 61 mg dm⁻³ (Mehlich-1); K: 136 mg dm⁻³ (Mehlich-1); MO: 21 g kg⁻¹ e CTC: 9,7 cmol_c dm⁻³, conforme Tedesco *et al.* (1995).

A área experimental está sendo cultivada em sistema de plantio direto há 26 anos. No verão, é feita rotação entre as culturas de soja e milho. No outono-inverno de 2015 foi utilizada como cobertura de solo a aveia branca (*Avena sativa*). A dessecação da cobertura foi realizada com a aplicação do herbicida glifosato, aos 30 dias antes da semeadura do milho.

4.2.2 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental foi o de blocos casualizados, dispostos em fatorial 4 X 3, com quatro repetições. Os tratamentos consistiram de dois fatores, sendo quatro fontes de fertilizantes nitrogenados aplicados em cobertura, ureia comum (UC), ureia com inibidor de urease (IU), ureia com inibidor de nitrificação (IN) e ureia com os dois inibidores simultaneamente (IU+IN) e três doses de nitrogênio aplicado em cobertura (50, 120 e 270 kg ha⁻¹). As doses de N utilizadas foram para baixa expectativa de rendimento (8 Mg ha⁻¹), média (10 Mg ha⁻¹) e alta (15 Mg ha⁻¹). Todas as fontes de N utilizadas continham aproximadamente 45 %

de N. Uma testemunha sem aplicação de N no milho foi incluída. O inibidor da urease utilizado foi o NBPT, o qual atua inibindo a atividade da enzima urease, pois ele ocupa o sítio de ação dessa enzima, diminuindo sua atividade (Christianson *et al.*, 1990). Por sua vez, o inibidor de nitrificação utilizado foi o DCD (dicianodiamida). Ele tem efeito bacteriostático sobre as bactérias do gênero *Nitrosomonas*, sem afetar a população microbiana do solo (Di & Cameron, 2004; O'Callaghan *et al.*, 2010), e reduz a oxidação de amônio a nitrato.

Realizou-se uma primeira adubação de cobertura de 30 kg de N ha⁻¹ no estádio V₄ de desenvolvimento do milho conforme escala de Ritchie *et al.* (1993), uniformemente em todos os tratamentos, exceto no tratamento testemunha, sem aplicação de N em cobertura. A aplicação das diferentes fontes e doses de N foram realizadas no estádio V₇. Para estimular perdas por lixiviação foi realizada uma irrigação de 65 mm aos 16 dias após a adubação nitrogenada em cobertura, período em que a maior parte do nitrogênio vindo de fertilizantes amoniacais se converte em nitrato, em um intervalo de até 15 ou 30 dias (Cantarella & Montezano, 2010). Além disso, ocorreu uma precipitação de 18 mm aos 16 dias após a adubação nitrogenada, totalizando 83 mm durante esse período.

4.2.3 Procedimento experimental

A semeadura do milho foi realizada no dia 01 de setembro de 2015, em sistema de semeadura direta, em sucessão à aveia branca (*Avena sativa*) como cobertura de outono-inverno. O genótipo utilizado foi o híbrido simples AG 9025 PRO3, de ciclo precoce e com eventos Bt e RR. A densidade final de plantas foi de 8,0 pl m⁻² e o espaçamento entrelinhas de 0,5 m. A adubação na semeadura foi de 30, 180 e 90 kg ha⁻¹ de N, P₂O₅ e K₂O, respectivamente. O ajuste da densidade de plantas foi efetuado aos 16 dias após emergência das plântulas, com desbaste manual. Plantas daninhas, doenças e pragas foram controladas para não interferirem no rendimento de grãos.

O ano de realização do experimento foi um ano de “El Niño”, em que foram observadas precipitações acima da média climatológica da região. No entanto, o milho foi irrigado sempre que necessário. A necessidade de irrigações complementares foi determinada baseada 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. Este é o valor próximo à umidade correspondente ao limite hídrico inferior da cultura do milho, obtido a partir da curva de retenção de água no solo da área experimental. Foi utilizado o sistema de irrigação por aspersão, com vazão de 8,0 mm por hora. Na Figura 4.1, são apresentados os dados de precipitação pluvial registrados na área experimental e das irrigações complementares realizadas.

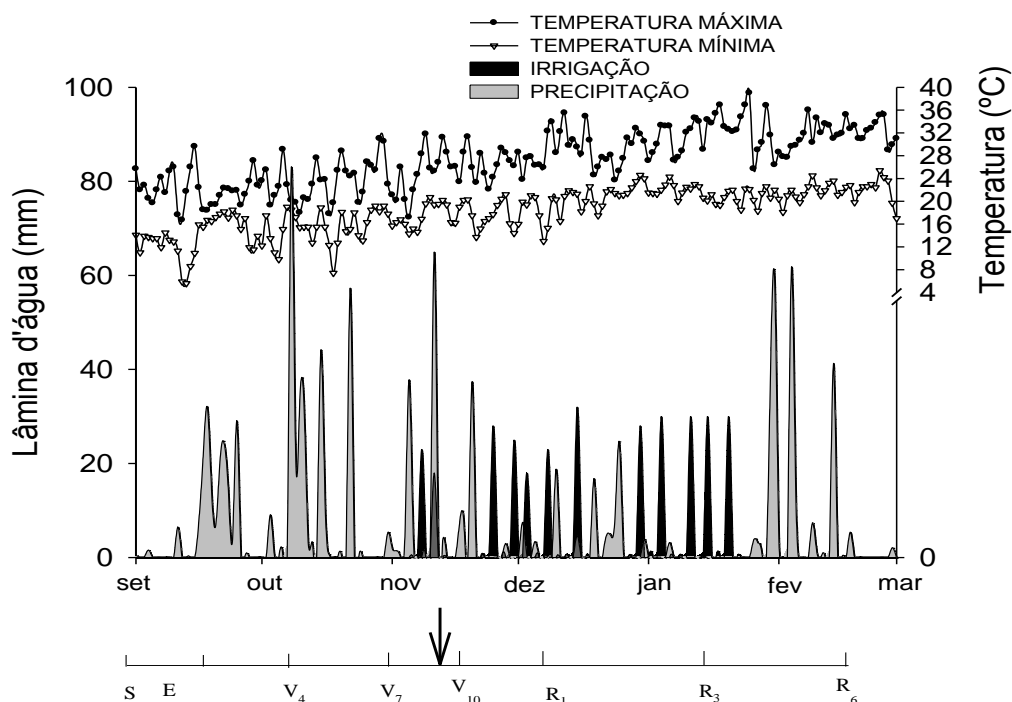


Figura 4.1: Precipitação, irrigação, temperatura máxima e mínima e excesso hídrico (↓) aplicado durante o ciclo de desenvolvimento do milho, no ano agrícola 2015/16, Eldorado do Sul-RS.

Para quantificar as perdas de amônia ($N-NH_3$) por volatilização foi utilizado coletor do tipo semi-aberto estático, descrito por Nömmik (1973), com alterações propostas por Lara Cabezas & Trivelin (1990). As câmaras coletoras consistiram de um cilindro de acrílico transparente com 0,15 m de diâmetro e 0,35 m de altura, sobre o qual foi disposta uma proteção, visando evitar incidência de água oriunda da precipitação pluvial no interior da câmara (Da Ros *et al.*, 2005). Essas câmaras foram instaladas sobre bases de cloro polivinil (PVC), previamente inseridas a 2,5 cm de profundidade no solo.

Foram utilizadas cinco bases por unidade experimental, permitindo a utilização de uma base por coleta. Assim, os coletores foram transferidos para as bases subsequentes, a cada coleta, refletindo as condições ambientais

(precipitação pluvial, vento, temperatura) do período anterior, sem as interferências causadas pela presença das câmaras (Cantarella *et al.*, 1999). As bases foram instaladas previamente à aplicação dos fertilizantes nitrogenados e protegidas, para que não houvesse a contaminação com os mesmos. A aplicação dos adubos nitrogenados foi realizada manualmente a lanço na superfície do solo, posterior à qual as bases foram descobertas e aplicada uma dose equivalente de N na área de cada base. As câmaras coletoras foram instaladas logo após a aplicação dos adubos nitrogenados.

Em cada uma das câmaras, foram colocados dois discos absorvedores de polipropileno, com 2,0 cm de espessura e densidade 28, embebidos em solução de ácido fosfórico (50 ml L^{-1}) e glicerina (40 ml L^{-1}). A primeira esponja, disposta na parte inferior da câmara a uma altura de 15 cm do solo, teve como objetivo captar a amônia que foi volatilizada do solo na parte interna da câmara. A segunda esponja, disposta a 30 cm do solo, teve a função de captar a amônia externa às câmaras, evitando a contaminação da esponja inferior (Da Ros *et al.*, 2005). Os discos absorvedores foram preparados antes de serem instalados nos coletores de amônia, sendo acondicionados em sacos de plástico (2 L), juntamente com 70 mL da solução preparada com ácido fosfórico e glicerina. Os discos de espuma foram trocados a cada coleta, mas apenas o disco inferior foi armazenado em saco plástico e mantido refrigerado (5° C), para posterior extração da amônia retida na solução ácida (Lara Cabezas *et al.*, 1997).

As perdas de amônia foram avaliadas aos 1, 2, 3, 5, 7, 10, 13, 16, 20 e 24 dias após a aplicação das diferentes fontes e doses de adubo nitrogenado. A amônia retida no disco absorvedor foi extraída por sucessivas lavagens, aproximadamente cinco, com solução de KCl 1 mol L^{-1} , coletada em balão volumétrico de 500 mL, cujo volume foi completado. Uma alíquota de 20 mL foi retirada desse volume, à qual foi adicionado 0,2 g de MgO e submetida à destilação com arraste a vapor em semi-microKjeldahl. A amônia foi retida em solução de H_3BO_3 com NH_4^+ , que foi quantificada por titulação com solução de ácido sulfúrico padronizado (Tedesco *et al.*, 1995). A quantidade de amônia volatilizada foi calculada com base no volume total da solução utilizada para lavagem das esponjas (500 mL), sendo os resultados expressos em taxas diárias de volatilização de N- NH_3 (kg ha^{-1}). Descontada a volatilização de N do tratamento sem adubação nitrogenada, foi calculada a volatilização acumulada de

amônia para cada tratamento, em que foi expressa como proporção (%) da dose de N aplicada.

Para avaliar os teores de nitrato (N-NO_3^-) e amônio (N-NH_4^+) no perfil do solo, foi realizada uma coleta de solo aos 41 dias após a adubação nitrogenada em cobertura, no espigamento, em quatro profundidades (0-10; 10-20; 20-30 e 30-40 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, para posterior determinação do teor de N-mineral (N-NH_4^+ e N-NO_3^-) presente nessas camadas de solo.

As coletas de solo foram realizadas com auxílio de trado calador. 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^{-1} , 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_4^+ e, posteriormente, na segunda destilação da mesma amostra, foi adicionada liga devarda para determinação de N-NO_3^- .

A senescência foliar foi avaliada nos estádios R_1 , R_3 e R_4 , sendo obtida pela razão entre o número de folhas senescentes e o número total de folhas de cinco plantas por subparcela, sendo expressa em percentagem. Foram consideradas folhas senescentes aquelas que apresentavam menos de 50 % da área da folha verde.

O rendimento de massa seca e a quantidade de N acumulado na parte aérea da planta foram avaliados no espigamento (R_1). Para tanto, coletou-se quatro plantas da linha número dois de cada unidade experimental, que foram secas em estufa sob temperatura de 60°C até atingir peso constante. Este material foi pesado e os valores obtidos extrapolados para um hectare, por regra de três simples. Segundo a metodologia descrita por Tedesco *et al.* (1995), determinou-se o teor de N no tecido. 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 ($80.000 \text{ pl ha}^{-1}$).

Para avaliação do rendimento de grãos, colheu-se o milho na maturação de colheita, aproximadamente sete a 10 dias após a maturação fisiológica. A subparcela consistiu de oito linhas de 5 m de comprimento, espaçadas entre si de

0,5 m. O rendimento de grãos foi obtido pela extrapolação da produção referente à área útil da subparcela (13 m²) para um hectare, corrigindo-se a umidade para 130 g kg⁻¹.

O número de espigas por metro quadrado foi determinado pela razão entre o número de espigas colhidas na unidade experimental pelo valor da área útil colhida. 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⁻¹ e divisão da massa obtida por 200. Já o número de grãos por espiga foi calculado, indiretamente, da seguinte forma: foi obtido inicialmente o número de grãos das plantas da área útil pela razão entre o peso de grãos da área útil e o peso do grão. Após, dividiu-se este valor pela área útil, obtendo-se o número de grãos por metro quadrado. Por fim, o número de grãos por espiga foi obtido pela razão entre o número de grãos por metro quadrado e o número de espigas por metro quadrado.

A eficiência agronômica de uso do N (EAN) foi calculada pela metodologia proposta por Baligar *et al.* (1990), pela fórmula: $EAN = (RF - RNF)/QNA$ Onde RF é o rendimento de grãos dos tratamentos com adubação nitrogenada (kg ha⁻¹), RNF é o rendimento de grãos do tratamento sem adubação nitrogenada (kg ha⁻¹) e QNA é a quantidade de N aplicada em cobertura (kg ha⁻¹).

4.2.4 Análise estatística

Os dados foram submetidos à análise de variância pelo teste F para os efeitos principais ($p < 0,05$) e para a interação ($p < 0,20$), conforme sugerido por Perecin & Cargnelutti Filho (2008). Os dados de perdas de N por volatilização de amônia, teores de N-mineral nas diferentes camadas de solo, características da planta, rendimento de grãos e componentes do rendimento e eficiência agronômica do uso do N (EAN) foram submetidos à análise de variância, utilizando-se o programa estatístico SAS (SAS Institute, 2003), conforme os seguintes modelos:

a) N-mineral no perfil do solo (N-NH₄⁺ e N-NO₃⁻):

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

onde: μ = média geral do experimento; B = bloco; N = nitrogênio (dose); F = fonte de N; C = camada; $i = 1,2,3$; $j = 1,2,3, 4$; $k = 1,2,3$; $l = 1,2,3,4$ e Erro = erro experimental.

- b) Perdas de N por volatilização de amônia ($N-NH_3$), rendimento de massa seca, quantidade de N acumulado na parte aérea no estágio de espigamento, senescência foliar, rendimento de grãos e componentes do rendimento e eficiência agronômica do uso do N.

$$Y_{ij} = \mu + B_i + N_j + F_k + N_j F_k + \text{erro}_{(ijk)}$$

onde: μ = média geral do experimento; B = bloco; N = nitrogênio (dose); F = Fonte de N; $i = 1,2,3,4$; $j = 1,2,3$; $k = 1,2,3,4$ e Erro = erro experimental.

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

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Para melhor entendimento, a apresentação dos resultados será dividida em seis partes: regimes hídrico e térmico relativos ao período de coleta de amônia, parâmetros relacionados às perdas de N por volatilização, regime hídrico durante o ciclo da cultura e teores de N-mineral no solo, características associadas ao desenvolvimento da planta, rendimento de grãos e componentes do rendimento e eficiência agronômica de uso do N. Os Apêndices 4, 5 e 6 contém o resumo da análise de variância dos dados relativos às variáveis avaliadas.

4.3.1 Regimes hídrico e térmico durante o período de quantificação de perdas de N por volatilização de amônia

O período de avaliação de perdas de N por volatilização de amônia foi de 25 dias. Nesse período ocorreu uma precipitação pluvial de 7,3 mm entre o terceiro e o quarto dias após a adubação nitrogenada (Figura 4.2). A precipitação ocorrida possivelmente foi insuficiente para incorporar o nitrogênio, podendo, assim, ter favorecido perdas por volatilização de amônia. Em experimento anterior realizado no mesmo local, verificou-se que 25 mm de irrigação após a adubação nitrogenada foram suficientes para incorporar o N, minimizando as perdas por

volatilização de amônia (Menezes, 2015). Durante todo o período de avaliação, houve uma precipitação total de 177 mm e 41 mm de irrigação, totalizando 218 mm (Figura 4.2).

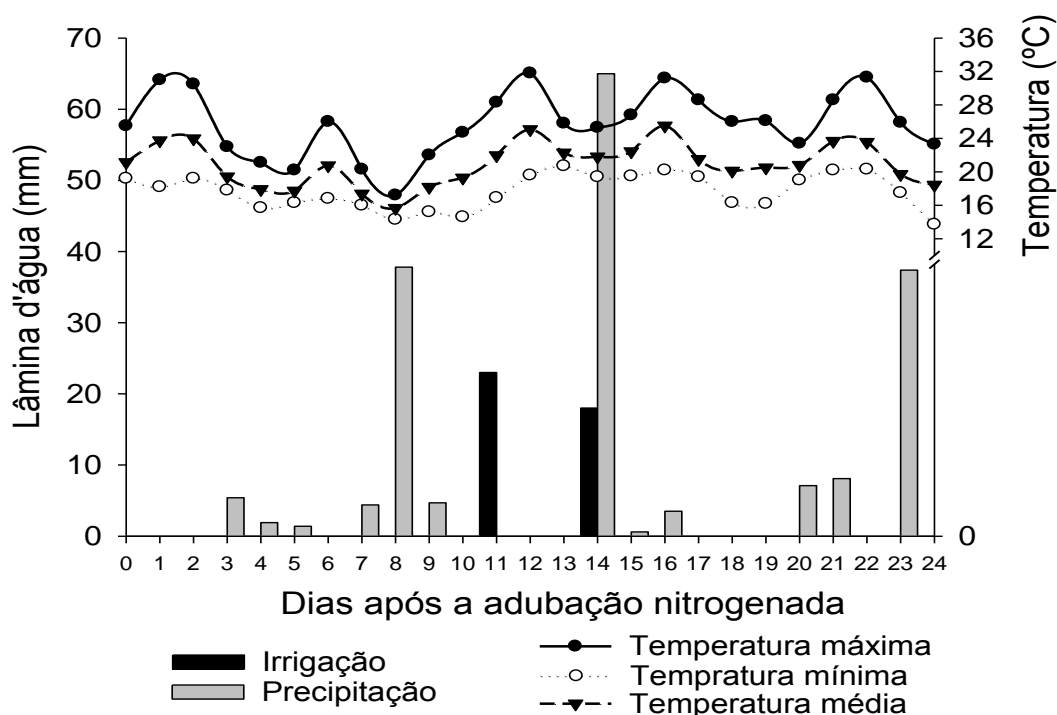


Figura 4.2 Precipitação, irrigação e temperaturas máxima, mínima e média durante o período de coleta de volatilização de amônia, após a aplicação dos adubos nitrogenados em cobertura. Eldorado do Sul-RS, 2015/16.

Durante o período de 25 dias em que houve avaliação de perdas de N por volatilização de amônia, a temperatura média foi de 20,9° C. Já as temperaturas mínima e máxima foram de, respectivamente, 17,6 e 25,7° C (Figura 4.2). A temperatura máxima atingida nesse período foi alta, podendo ter favorecido perdas por volatilização de amônia. O aumento da temperatura média ambiente de 10 para 20° C resultou em elevação da volatilização total de 54 % em média para os dejetos de suínos aplicados na superfície do solo (Huijsmans *et al.*, 2003).

No dia da aplicação dos adubos nitrogenados, a umidade relativa do ar foi alta, superior a 80 %, essa condição de alta umidade estimula perdas por volatilização de amônia (Figura 4.3). As perdas de N por volatilização são potencializadas com a umidade relativa entre 80 e 95 % (Denmead *et al.*, 1978).

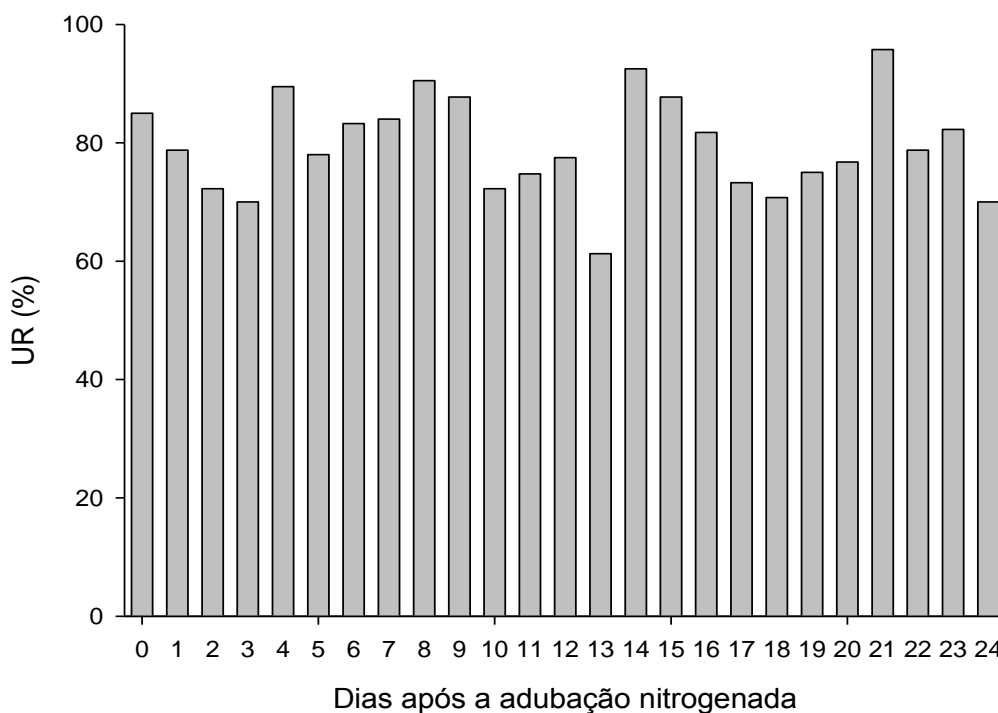


Figura 4.3 Umidade relativa do ar (UR) durante o período de coleta de volatilização de amônia, após a aplicação dos adubos nitrogenados em cobertura. Eldorado do Sul-RS, 2015/16.

4.3.2 Taxa de volatilização diária e perdas acumuladas de amônia

Na menor dose de N ($50 \text{ kg de N ha}^{-1}$), quando foi utilizada a ureia comum ocorreu um pico de volatilização de N-NH_3 ($5 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$), aos dois dias após a aplicação (daa). Por sua vez, nas doses intermediária de N (120 kg ha^{-1}) e alta (270 kg ha^{-1}) todos os fertilizantes apresentaram maiores perdas de N-NH_3 entre o terceiro e o quinto daa. Quanto maior a dose de N aplicada, maior a magnitude das perdas. Após a aplicação da ureia, essa é rapidamente hidrolisada e os picos de emissão ocorrem em dois ou três dias após a aplicação (Duarte *et al.*, 2007). O maior pico foi verificado com a aplicação da ureia comum ($35 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$), seguido pela aplicação do inibidor da nitrificação ($15 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$), pela associação de inibidores da urease e nitrificação ($10 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$) e pelo inibidor da urease ($8 \text{ kg ha}^{-1} \text{ d}^{-1}$) (Figura 4.4).

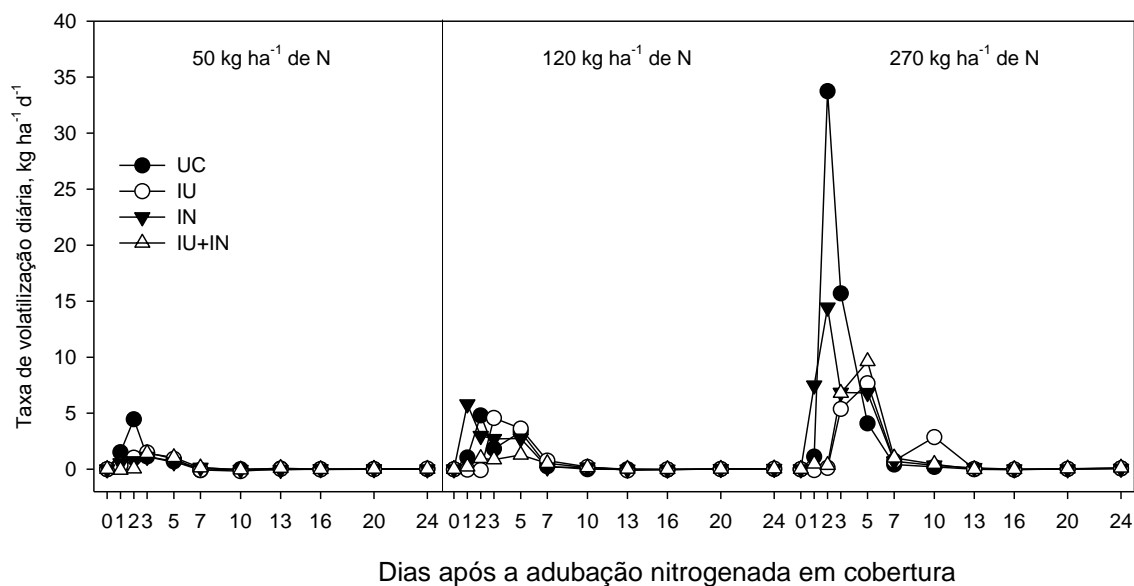


Figura 4.4 Taxa de volatilização diária de N-NH₃ em função de fontes e doses de fertilizantes nitrogenados aplicados em cobertura em milho. UC: ureia comum; IN: ureia com inibidor da nitrificação; IU: ureia com inibidor da urease e IU+IN: ureia com inibidores da urease e da nitrificação. Doses de N aplicadas no estágio V₇, segundo escala de Ritchie *et al.* (1993); Eldorado do Sul-RS 2015/16.

Devido à elevada atividade da enzima urease na camada superficial do solo (Rojas *et al.*, 2012) e à disponibilidade de água, o processo de hidrólise se inicia logo após a aplicação da ureia comum, em sistema de plantio direto. Esse é o caso do presente experimento, em que a área está sendo conduzida há 26 anos sob esse sistema. Isso pode explicar as elevadas perdas por volatilização de amônia ocorrida nos primeiros dias após a adubação nitrogenada (Figura 4.4). Outros estudos também verificaram esse comportamento da ureia comum, com as maiores perdas de N-NH₃ concentradas, principalmente, até o quinto dia após a aplicação (Da Ros *et al.*, 2005; Tasca *et al.*, 2011; Rojas *et al.*, 2012; Viero *et al.*, 2014; Menezes, 2015).

De modo geral, as maiores taxas de volatilização diária de N-NH₃ (35 kg ha⁻¹ d⁻¹) foram verificadas com a aplicação da maior dose de N (270 kg ha⁻¹) nas diferentes fontes, sendo que nas doses de 50 e 120 kg de N ha⁻¹ os picos não ultrapassaram 5 kg ha⁻¹ d⁻¹ (Figura 4.4). Com altas doses de N, as plantas têm menor eficiência de uso do N. Assim, esse nutriente está mais suscetível a perdas para o ambiente. Com o aumento da dose de N, a eficiência reduz-se pelo fato do suprimento de N exceder a demanda da cultura, havendo maiores chances de perdas desse nutriente (Sangoi *et al.*, 2016).

Para perdas acumuladas de N-NH₃ houve interação de fontes e doses de N. Na menor dose de N (50 kg de N ha⁻¹), a perda acumulada de N-NH₃ da ureia comum foi de 17,4 % do N aplicado, 55 % superior à média das perdas com as aplicações da ureia com inibidor da urease, com inibidor da nitrificação e com associação dos inibidores da urease e da nitrificação (Tabela 4.1). Na dose intermediária de N (120 kg ha⁻¹), apenas a ureia com a associação de inibidores da urease e nitrificação apresentou perdas menores que 10 % (5,4 % do N aplicado), enquanto as demais fontes apresentaram perda média de 12,9 % do N aplicado (Tabela 4.1). Nessa dose de N, as maiores perdas foram verificadas quando utilizada a ureia com o inibidor da nitrificação, seguido pela ureia comum. Com a utilização da ureia com inibidor da urease, as perdas foram reduzidas em 24 e 8 % quando comparada à ureia com inibidor de nitrificação e à ureia comum, respectivamente. Quando se utilizou a ureia com a associação dos dois inibidores (urease e nitrificação), as perdas foram reduzidas em 64 e 56 % quando comparadas, respectivamente, à ureia com inibidor de nitrificação e à ureia comum (Tabela 4.1).

Tabela 4.1 Perda acumulada de N-NH₃ em função de fontes e doses de N aplicado em cobertura na cultura do milho. Eldorado do Sul-RS 2015/16.

Fonte de N ¹	Dose de N (kg ha ⁻¹) ²		
	50	120	270
	% do N aplicado		
UC	A 17,4 a*	AB 12,4 a	A 22,4 a
IU	B 8,6 a	B 11,4 a	BC 11,6 a
IN	B 7,6 b	A 15,0 a	B 16,8 a
IU+IN	B 8,0 a	C 5,4 b	C 11,4 a
CV ³ (%)		23,2	

¹UC: ureia comum; IN: ureia com inibidor da nitrificação; IU: ureia com inibidor da urease e IU+ IN: ureia com inibidores da urease e da nitrificação; ²Aplicada no estágio V₇, segundo escala de Ritchie *et al.* (1993); ³Coeficiente de variação. Letras maiúsculas na coluna comparam fontes de N dentro de cada dose e letras minúsculas na linha comparam doses de N dentro de cada fonte, pelo teste de Tukey (p<0,05).

Na maior dose de N (270 kg ha⁻¹), as maiores perdas ocorreram na ordem: UC>IN>IU>IU+IN (Tabela 4.1). Nessa dose, as aplicações da ureia com inibidor da urease e da ureia com a combinação de inibidores da urease e nitrificação reduziram as perdas de N-NH₃ em 48 e 50 %, respectivamente em relação à ureia comum (Tabela 4.1). Quando foi utilizada a ureia com inibidor da nitrificação, as perdas por volatilização de amônia foram 25 % menores quando comparada à

ureia comum (Tabela 4.1). No entanto, esse resultado não era esperado, já que a ureia somente com inibidor da nitrificação não tem proteção contra as perdas por volatilização de amônia, podendo ser suscetível a esse tipo de perda. Tanto em solos argilosos quanto em solos arenosos, a ureia com inibidor da nitrificação não diferiu da ureia comum com relação às perdas por volatilização de amônia (Francisco *et al.*, 2011).

A dose de N não influenciou as perdas de N-NH₃ da ureia comum e da ureia com inibidor da urease (Tabela 4.1). As maiores perdas de N-NH₃ foram verificadas na maior dose de N aplicada (270 kg ha⁻¹), independentemente da fonte de N aplicada (Figura 4.5).

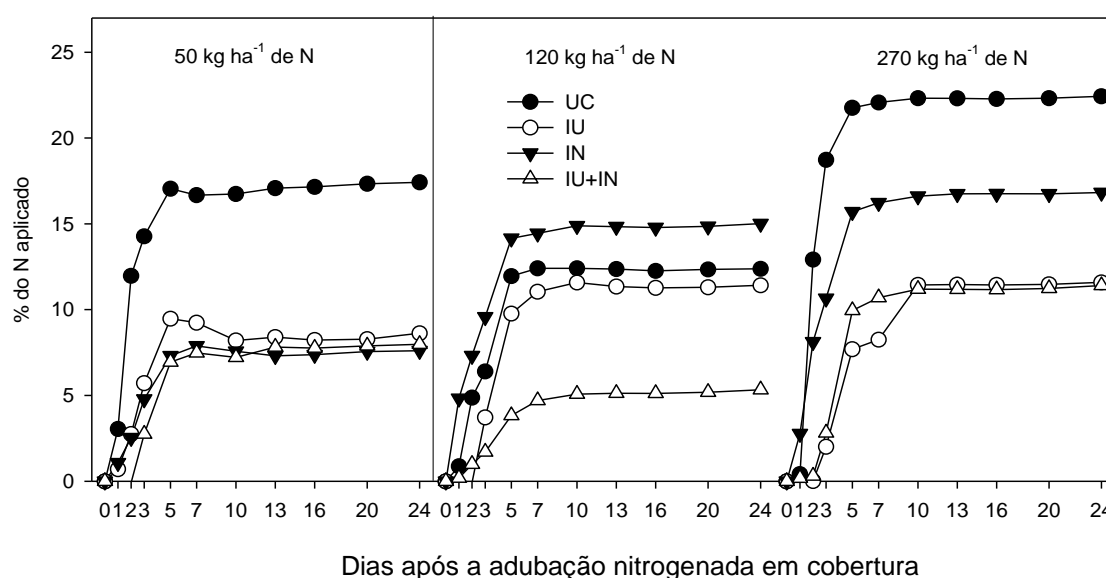


Figura 4.5 Perda acumulada de N-NH₃ em função de fontes e doses de N aplicado em cobertura na cultura do milho. Eldorado do Sul-RS 2015/16. Fontes: UC: ureia comum; IN: ureia com inibidor da nitrificação; IU: ureia com inibidor da urease e IN + IU: ureia com inibidor da nitrificação e urease; Doses de N aplicadas no estágio V₇, segundo escala de Ritchie *et al.* (1993).

No presente experimento, a ureia comum proporcionou as maiores perdas de N-NH₃, pois esse fertilizante não possui nenhum tipo de inibidor. A ureia em contato com a enzima urease, presente no solo, fica suscetível a perdas por volatilização de N-NH₃. Essas perdas ocorrem principalmente em condições de alta umidade e alta temperatura, como no caso desse experimento, em que a umidade durante o período de coleta foi de 80 % (Figura 4.3) e a temperatura máxima de 25,7° C (Figura 4.2), não havendo precipitação nos três primeiros dias após a aplicação dos fertilizantes nitrogenados (Figura 4.2). Determinadas condições, tais como alta umidade do solo, aplicação de calcário sem

incorporação do corretivo, altas temperaturas e aplicação de ureia superficial, sem incorporação por lâmina de água, podem ocasionar perda de parte do N para a atmosfera na forma gasosa (Tasca, 2009).

A redução da atividade enzimática pelo inibidor de urease foi, provavelmente, o principal fator que contribuiu para a redução de perdas de N-NH₃ da ureia com inibidor da urease (Figura 4.5). A eficiência do inibidor de urease em reduzir 50 % das perdas de N-NH₃ em relação à ureia comum, verificada nesse estudo (Tabela 4.1), está de acordo com resultados obtidos por Cantarella *et al.* (2008), Tasca *et al.* (2011), Viero *et al.* (2014) e Menezes (2015). No entanto, a adição do inibidor da nitrificação à ureia não atua sobre a enzima urease, não é esperado que o inibidor da nitrificação possa reduzir as perdas de N-NH₃. Dessa maneira, a redução da volatilização quando utilizada a ureia com a associação dos inibidores da urease e da nitrificação verificada no presente experimento (Tabela 4.1) pode estar relacionada basicamente ao efeito do inibidor de urease, mas não ao inibidor de nitrificação. Portanto, o inibidor da nitrificação não afeta a eficiência do inibidor da urease.

Em condições de laboratório, quando foi utilizada a ureia com a associação dos inibidores da urease (NBPT) e nitrificação (DCD), também houve menores perdas por volatilização de N-NH₃, em relação à ureia comum, indicando que o inibidor da nitrificação (DCD) não afetou a capacidade de inibir do inibidor da urease (NBPT) (Soares, 2011). Em solos arenosos, solo similar ao do presente experimento, a volatilização de N-NH₃ foi favorecida em relação a que ocorre em solos argilosos, provavelmente em função da baixa fixação de amônio na matriz do solo (Francisco *et al.* 2011). Segundo esses autores, na presença de NBPT (inibidor da urease) houve redução das perdas de N-NH₃, no entanto com DCD (inibidor da nitrificação) não ocorreram diferenças na volatilização de N-NH₃ em relação a uma fonte de N amoniacal.

4.3.3 Teores de N-mineral no solo

No ano agrícola 2015/16 foi registrado um acumulado de precipitação de 701 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 12 irrigações complementares, num total de 315 mm. O acumulado de água disponível (precipitação + irrigação) durante o ciclo do milho

foi elevado, sendo de 1.016 mm, o que pode potencializar perdas de nitrato por lixiviação.

Para teores de amônio e nitrato do solo houve interação tripla de fontes, doses de N e camada de solo amostrada. Entretanto, para melhor compreensão, os resultados foram expressos em função de cada dose de N.

Os teores de N-NH_4^+ variaram em função de fonte de N (Figura 4.6 a,b,c). Com aplicação da ureia com inibidor da urease, os teores de N-NH_4^+ disponíveis no solo (0-40 cm) foram maiores em relação às demais fontes, independentemente de dose de N aplicada (Figura 4.6 a,b,c). É provável que esse aumento dos teores de N-NH_4^+ do solo quando aplicada a ureia com inibidor de urease se deva a menores perdas por volatilização de amônia (Tabela 4.1), conforme descrito por Menezes (2015). Devido as menores perdas para a atmosfera, ocorrem maiores teores de N-NH_4^+ no solo. Além disso, foi observado que, na menor dose de N (50 kg ha^{-1}), a utilização da ureia com inibidor da urease e da ureia com os dois inibidores associados resultou em maior disponibilidade de N-NH_4^+ nas camadas superficiais (0-20 cm), quando comparada à ureia comum e à ureia com inibidor da nitrificação (Figura 4.6 a).

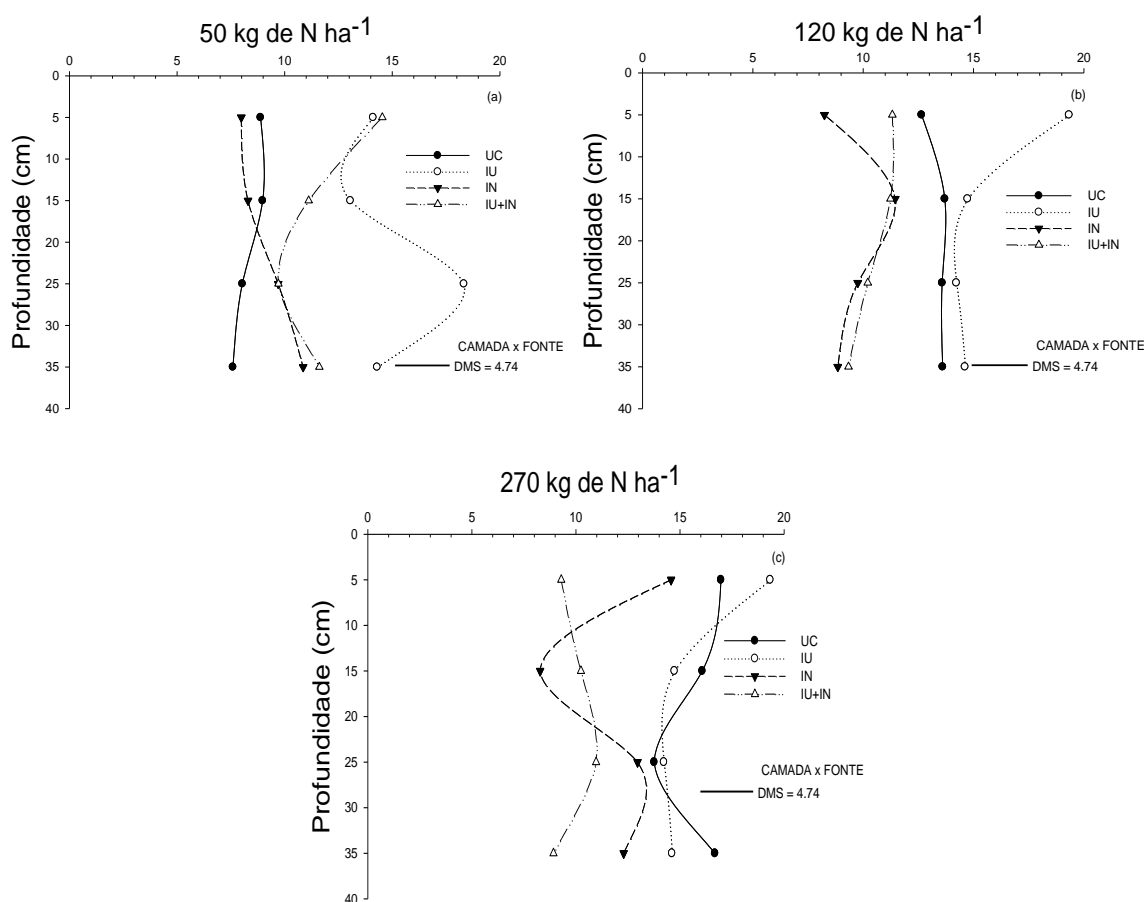


Figura 4.6 Teores de $N-NH_4^+$ (mg kg^{-1}) no solo em função de fontes e doses de nitrogênio em cobertura na amostragem de solo realizada aos 41 dias (espigamento) após a aplicação da adubação nitrogenada em cobertura no milho irrigado e aos 25 dias após o excesso hídrico, Eldorado do Sul-RS, 2015/16. Fontes: UC: ureia comum; IN: ureia com inibidor da nitrificação; IU: ureia com inibidor da urease e IN+ IU: ureia com inibidor da nitrificação e urease; Doses: Aplicado em cobertura no estágio V_7 , segundo escala de Ritchie *et al.*, (1993). A barra horizontal representa o DMS do teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

A variabilidade verificada nos teores de N-mineral no presente experimento pode ser atribuída às adubações em safras anteriores, acumulando nitrogênio principalmente nas linhas de semeadura (Magalhães, 2014). Por outro lado, Marcelino (2009) e Zavaschi (2010) utilizando a ureia comum, a ureia com inibidor da nitrificação e a ureia com a associação dos inibidores da urease e da nitrificação não encontraram diferenças nos teores de $N-NH_4^+$ entre as fontes de N em milho. Esses resultados diferem dos encontrados no presente experimento, pois os teores de amônio no solo são influenciados pelas condições ambientais. Assim, a ocorrência de precipitações no período de coleta pode ser mais um fator de variabilidade de N mineral no solo (Poletto *et al.*, 2008).

O maior teor de amônio verificado quando se utilizou a ureia com inibidor de urease ou a ureia com a associação de inibidores da urease e nitrificação, pode estar vinculado ao fato do N ser absorvido pelas raízes nas formas de N-NO_3^- e N-NH_4^+ , predominantemente na forma de N-NO_3^- (Marschner, 1995; Kerbuay, 2008). Assim, a planta absorve mais N-NO_3^- , deixando mais N-NH_4^+ no solo. O N-mineral predominante em solos aerados encontra-se mais na forma de amônio do que na de nitrato. (Magalhães, 2014). Além disso, os maiores teores de N-NH_4^+ no solo verificado no presente experimento, especialmente quando utilizada a ureia com o inibidor de urease podem ser atribuídos ao fato do N-NH_4^+ ser o primeiro produto da mineralização do nitrogênio, justificando os resultados mais elevados para esse componente (Cantarella, 2007). Os teores de N-NH_4^+ e N-NO_3^- em profundidade, sobretudo em solos aerados, caso do presente experimento, sofrem influência direta das atividades microbianas do solo, como as precipitações e as oscilações de temperatura (Kelley *et al.*, 2013). Além das condições edafoclimáticas, a adubação nitrogenada também aumenta a variabilidade do N-mineral no solo (Magalhães, 2014).

Os teores de N-NH_4^+ no solo, avaliados no espigamento, foram muito similares em relação às doses de N aplicadas em cobertura (Figuras 4.6 a,b,c). Isso provavelmente deve ter sido em função de que até o espigamento, possivelmente as plantas tenham absorvido o N disponível. Há, também, a possibilidade do N ter sido perdido por lixiviação ou desnitrificação. Quanto maior a dose de N aplicada, maior é o potencial de perdas de N no sistema solo-planta (Pagliarini, 2016).

Os teores de N-NO_3^- no solo variaram em função de fonte de N (Figura 4.7 a, b, c). Na menor dose de N aplicada (50 kg ha^{-1}), a utilização da ureia com os dois inibidores (urease e nitrificação) (Figura 4.7 a) resultou em maiores teores de N-NO_3^- , quando comparada às demais fontes de N. No entanto, esses teores foram maiores na camada mais superficial (0-10 cm), decrescendo nas camadas inferiores (10-30 cm) e voltando a se elevarem na camada mais profunda (30-40 cm). Além disso, menores teores de N-NO_3^- foram observados com a aplicação da ureia com inibidor da urease em todo o perfil do solo avaliado (0-40 cm) em relação às outras fontes de N. Por inibir a hidrólise da ureia, o inibidor da urease minimiza as perdas por volatilização de N-NH_3 . Devido à diminuição dessas perdas para o ambiente, ocorreu a predominância de N-mineral na forma de N-NH_4^+ (Figura 4.6 a,b,c).

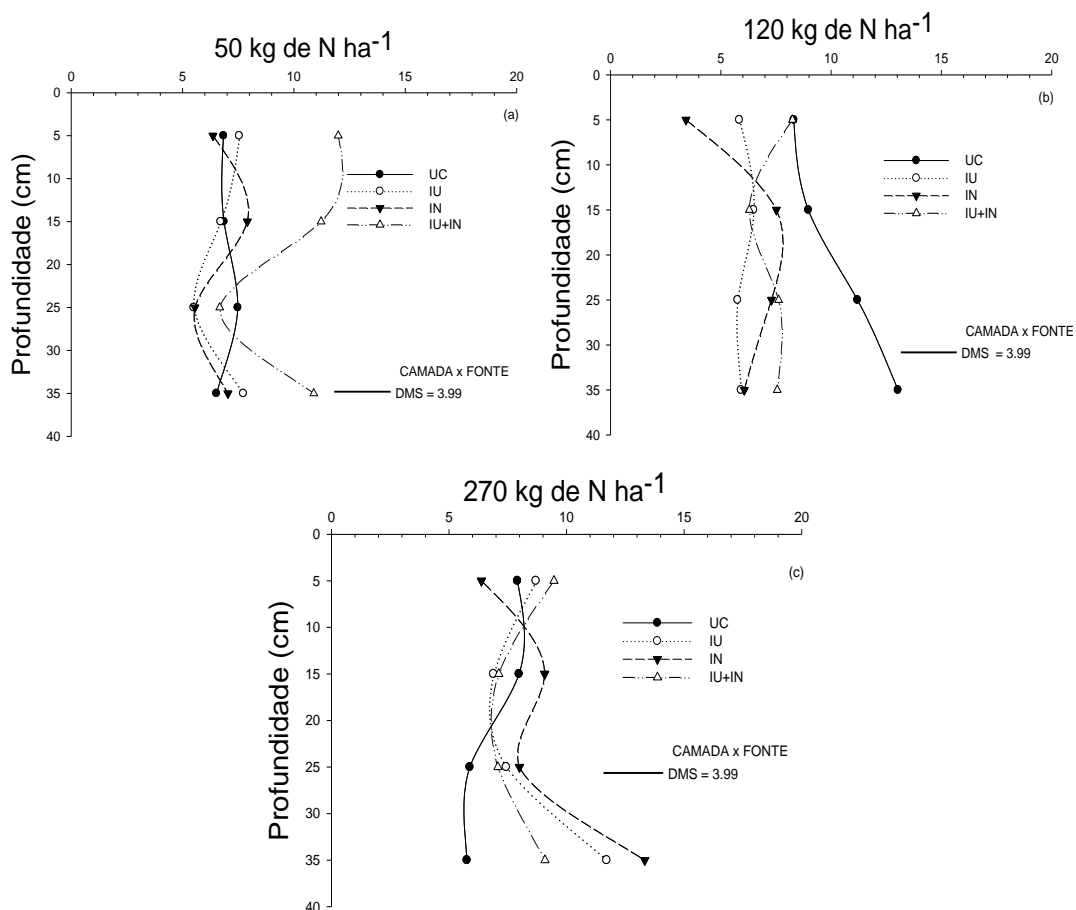


Figura 4.7 Teores de N-NO_3^- (mg kg^{-1}) no solo em função de fontes e doses de nitrogênio em cobertura na amostragem de solo realizada aos 41 dias (espigamento) após a aplicação da adubação nitrogenada em cobertura no milho irrigado e aos 25 dias após a aplicação do excesso hídrico, Eldorado do Sul-RS, 2015/16. Fontes: UC: ureia comum; IN: ureia com inibidor da nitrificação; IU: ureia com inibidor da urease e IN+ IU: ureia com inibidores da nitrificação e da urease; Doses: aplicação em cobertura no estágio V_7 , segundo escala de Ritchie *et al.*, (1993). A barra horizontal representa o DMS do teste de Tukey, ao nível de 5% de significância.

Na dose intermediária ($120 \text{ kg de N ha}^{-1}$), foi observado, em todas as camadas, maior teor de N-NO_3^- quando foi aplicada a ureia comum (Figura 4.7 b). Além disso, foi observado que os teores de N-NO_3^- aumentaram com a aplicação da ureia comum até à camada mais profunda do solo (30-40 cm). Já na maior dose de N (270 kg ha^{-1}), foi observado que os teores de N-NO_3^- disponíveis no solo foram muito semelhantes em relação às fontes de N aplicadas até à camada de 30 cm (Figura 4.7 c). No entanto, a aplicação da ureia com inibidor da nitrificação resultou em maiores teores de N-NO_3^- na camada mais profunda (30-40 cm), quando comparada às demais fontes de N. É provável que a utilização da ureia com inibidor da nitrificação tenha sido eficiente no solo, diminuindo o processo de nitrificação até o espigamento, quando comparada às demais fontes

de N. Possivelmente, as demais fontes de N tenham perdido N-NO_3^- por lixiviação, devido à alta precipitação e irrigação ocorridas, 1.016 mm (Figura 4.1). Os teores de N-NO_3^- foram muito semelhantes em relação às doses de N aplicadas nas diferentes camadas do solo.

No que se refere às perdas de N por lixiviação de N-NO_3^- , a nitrificação do N é relativamente rápida, sendo influenciada por condições de umidade, pH e temperatura adequadas para a prática da agricultura. A maior parte do nitrogênio amoniacal vindo de fertilizantes amoniacais se converte em nitrato em um intervalo de até 15 ou 30 dias (Cantarella & Montezano, 2010). As perdas por lixiviação de nitrato são mais propícias em solos arenosos, caso do presente experimento. Outro fator de suma importância é o regime pluvial a que as plantas são submetidas após a aplicação da adubação nitrogenada em cobertura, sendo que há uma relação direta entre o aumento de perdas por lixiviação e volume de precipitação (Sangoi *et al.*, 2016).

Perdas por lixiviação do íon N-NO_3^- foram relatadas anteriormente no mesmo local de realização do presente experimento (Pagliarini, 2016). Com a aplicação de um excesso hídrico de 160 mm, aos 20 dias após a aplicação das diferentes fontes de adubo nitrogenado (estádio V_{10}), foram registrados menores teores de N-NO_3^- nas diferentes camadas de solo, quando comparado ao manejo sem excesso hídrico. Quando utilizada a ureia com inibidor de nitrificação foram observados maiores teores de N-NH_4^+ que de N-NO_3^- , em relação aos verificados com a utilização da ureia comum (Moro *et al.*, 2013). Esse fato é um indicativo de que houve diminuição da nitrificação no solo, concordando com os dados obtidos no presente experimento, na dose alta de N (270 kg ha^{-1}) relacionados à ureia com inibidor da nitrificação.

4.3.4 Características associadas ao desenvolvimento da planta

Na avaliação realizada no estágio de espigamento (R_1), a percentagem de senescência foliar não variou em função de fontes de N (Tabela 4.2). Houve apenas efeito de dose de N aplicada. Com o incremento da dose, a senescência foliar diminuiu. A senescência foliar não diferiu entre fontes até o espigamento, em todas as doses de N, pois é possível que até esse estágio as plantas tiveram N suficiente para absorção. A remobilização do N na planta começa quando ocorre o processo de formação de flores e leva inicialmente à senescência das

folhas basais, caracterizada visualmente pelo seu amarelecimento, seguido de morte (Craftsbrander *et al.*, 1998).

Tabela 4.2 Percentagem de senescência foliar no espigamento (estádio R₁) em função de doses de nitrogênio aplicado em cobertura no milho, na média de quatro fontes de N. Eldorado do Sul-RS 2015/16.

Dose de N (kg ha ⁻¹) ¹	Senescência (%)
50	38 A*
120	32 B
270	29 C
CV ² (%)	15.68

¹Aplicada no estágio V₇, segundo escala de Ritchie *et al.* (1993); ² Coeficiente de Variação; Médias seguidas por letras iguais não diferem significativamente pelo teste de Tukey (p<0,05).

Nas outras duas avaliações de senescência foliar realizadas mais tarde, nos estádios R₃ e R₄, não foram observados efeitos de fontes com a aplicação da menor dose de N (50 kg ha⁻¹) (Tabela 4.3). No entanto, nas doses intermediária (120 kg ha⁻¹) e alta (270 kg ha⁻¹) houve efeitos de fontes de N. Na dose intermediária (120 kg ha⁻¹), a aplicação da ureia com o inibidor de urease resultou em menor senescência foliar em relação à ureia comum. Na maior dose de N (270 kg ha⁻¹), os tratamentos com inibidor de urease e com os inibidores da urease e da nitrificação associados apresentaram menor percentagem de senescência foliar em relação à aplicação da ureia comum e da ureia com inibidor da nitrificação.

Tabela 4.3 Percentagem de senescência foliar nos estádios R₃ e R₄ em função de fontes e doses de nitrogênio (N) em cobertura no milho. Eldorado do Sul-RS, 2015/16.

Fonte de N ¹	Dose de N (kg ha ⁻¹) ²			CV ³ (%)
	50	120	270	
Senescência R ₃ (%)				
UC	A 52 a*	A 49 a	A 40 b	6,92
IU	A 54 a	B 41 b	B 32 c	
IN	A 55 a	AB 46 b	A 46 b	
IU+IN	A 53 a	AB 45 b	B 30 c	
Senescência R ₄ (%)				
UC	A 58 a	A 57 a	A 50 b	5,14
IU	A 57 a	B 50 b	B 42 c	
IN	A 59 a	AB 55 a	A 50 b	
IU+IN	A 57 a	AB 53 a	B 42 b	

¹UC: ureia comum; IN: ureia com inibidor da nitrificação; IU: ureia com inibidor da urease e IU+ IN: ureia com inibidores da urease e da nitrificação; ²Aplicada no estágio V₇, segundo escala de Ritchie *et al.* (1993); ³Coeficiente de variação. Letras maiúsculas na coluna comparam fontes de N dentro de cada dose e letras minúsculas na linha comparam doses de N dentro de cada fonte, pelo teste de Tukey (p<0,05).

A maior eficiência da utilização da ureia com inibidor da urease em diminuir a senescência foliar, nas doses intermediária e alta, pode ser associada às menores perdas por volatilização de amônia (Tabela 4.1). Com isso, há maior disponibilidade de N para a planta absorver, havendo menor necessidade de remobilização desse nutriente das folhas mais velhas para as mais novas. É provável que a diminuição da senescência com a aplicação da ureia com a associação dos inibidores da urease e nitrificação esteja associada, principalmente, ao inibidor da urease. Isto porque com a aplicação da ureia com adição somente do inibidor da nitrificação a senescência foliar foi similar à obtida com a aplicação da ureia comum.

Independentemente de fonte de N, a senescência foliar diminuiu à medida que aumentou a dose de N aplicada em cobertura no milho (Tabelas 4.1 e 4.3). Isso se deve ao fato de que com a aplicação de baixas doses de N há falta desse nutriente. Com isso, a planta necessita translocar N das folhas mais velhas para as mais novas, aumentando assim a senescência foliar. A redução da atividade fisiológica das principais fontes produtoras de carboidratos causadas pela diminuição da área foliar interfere na redistribuição de fotoassimilados dentro da planta, influenciando a velocidade e a intensidade da senescência foliar (Uhart & Andrade, 1995).

Para rendimento e quantidade de N acumulada na massa seca da parte aérea no espigamento houve interação de fontes e doses de N (Tabela 4.4). Essas duas variáveis não foram influenciadas pela fonte de N utilizada, independentemente de dose de N aplicada (Tabela 4.4). Em experimentos anteriores realizados no mesmo local de realização do presente experimento, também não se observou efeitos de fontes de N no rendimento de massa seca de milho (Menezes, 2015). O rendimento de massa seca foi afetado pela dose de N apenas quando se utilizou a ureia com os dois inibidores (urease e nitrificação), aumentando com o incremento da dose. Normalmente, o rendimento de massa seca aumenta com o incremento da adubação nitrogenada (Fernandes & Libardi, 2012; Rimski-korsakov *et al.*, 2012).

Tabela 4.4 Rendimento de massa seca e quantidade de N acumulado na parte aérea no espigamento em função da aplicação de fontes e doses de nitrogênio em cobertura no milho. Eldorado do Sul-RS, 2015/16.

Fonte de N ¹	Dose de N (kg ha ⁻¹) ²			CV ³ (%)
	50	120	270	
Massa seca (Mg ha ⁻¹)				
UC	A 11,36 a*	A 10,3 a	A 12,6 a	15,68
IU	A 10,83 a	A 11,5 a	A 12,6 a	
IN	A 11,54 a	A 9,7 a	A 12,6 a	
IU+IN	A 9,2 b	A 10,8 b	A 15,1 a	
N acumulado (kg ha ⁻¹)				
UC	A 147 ab	A 113 b	A 200 a	23,21
IU	A 126 b	A 158 b	A 202 a	
IN	A 129 b	A 122 ab	A 196 a	
IU+IN	A 97 b	A 145 b	A 235 a	

¹UC: ureia comum; IN: ureia com inibidor da nitrificação; IU: ureia com inibidor da urease e IU+ IN: ureia com inibidores da urease e da nitrificação; ²Aplicada no estágio V₇, segundo escala de Ritchie *et al.* (1993); ³Coeficiente de variação. Letras maiúsculas na coluna comparam fontes de N dentro de cada dose e letras minúsculas na linha comparam doses de N dentro de cada fonte, pelo teste de Tukey (p<0,05).

A quantidade de N acumulado na parte aérea no espigamento (R₁) não variou em função de fontes de N, independentemente de dose (Tabela 4.4). De uma maneira geral, a quantidade de N acumulada aumentou com o incremento da dose de N. Isso ocorre, pois com maiores doses de N a planta possui mais N disponível para absorção, incrementando a quantidade de N acumulado na parte aérea. Com o incremento da dose de N, houve aumento na quantidade de N acumulado de 50 e 62 %, respectivamente, com a dose intermediária (120 kg ha⁻¹

¹) e com a dose alta (270 kg ha⁻¹) em relação a menor dose de N (50 kg ha⁻¹). Outros autores também relataram incremento do N acumulado com o aumento da dose (Melo *et al.*, 2011; Mota *et al.*, 2015). Com relação a fonte de N, no mesmo local de realização do presente experimento, a utilização da ureia com inibidor de urease resultou em maior quantidade de N acumulada na parte aérea quando comparada à ureia comum (Menezes, 2015), diferindo dos resultados encontrados. Por outro lado, em distintas condições do presente experimento, em solo argiloso e temperaturas amenas (médias do mês mais quente inferiores a 22° C), no espigamento, também não foram encontradas diferenças entre fontes de N na quantidade de N acumulado (Mota *et al.*, 2015).

4.3.5 Componentes do rendimento e rendimento de grãos

Para os três componentes do rendimento de grãos houve interação de fontes e doses de N (Tabela 4.5). O número de espigas por metro quadrado não diferiu em função de fonte de N, exceto na dose mais alta (270 kg ha⁻¹), em que foi observado menor número de espigas por metro quadrado com a aplicação da ureia com inibidor da urease em relação à ureia com a associação do inibidor da urease e nitrificação. No entanto, as diferenças observadas foram de pequena magnitude.

Tabela 4.5 Componentes do rendimento de grãos em função da aplicação de fontes e doses de nitrogênio (N) em cobertura no milho irrigado, Eldorado do Sul-RS, 2015/16.

Fonte de N ¹	Dose de N (kg ha ⁻¹) ²			CV ³ (%)
	50	120	270	
	Espigas m ⁻² (n°)			
UC	A 7,3 a*	A 7,4 a	AB 7,3 a	5,15
IU	A 7,1 a	A 7,5 a	B 7,1 a	
IN	A 7,5 ab	A 7,0 b	AB 7,8 a	
IU+IN	A 7,6 ab	A 7,1 b	A 8,0 a	
	Grãos espiga ⁻¹ (n°)			
UC	A 418 a	AB 371 a	A 419 a	10,59
IU	A 395 a	AB 404 a	A 381 a	
IN	A 406 a	B 327 b	A 460 a	
IU+IN	A 397 a	A 415 a	A 394 a	
	Peso do grão (mg)			
UC	A 387 b	AB 416 ab	B 434 a	4,08
IU	A 414 b	A 423 b	A 470 a	
IN	A 410 ab	B 388 b	B 423 a	
IU+IN	A 413 b	AB 414 b	A 477 a	

¹UC: ureia comum; IN: ureia com inibidor da nitrificação; IU: ureia com inibidor da urease e IU+ IN: ureia com inibidores da urease e da nitrificação; ² Aplicada no estágio V₇, segundo escala de Ritchie *et al.* (1993); ³Coeficiente de variação. Letras maiúsculas na coluna comparam fontes de N dentro de cada dose e letras minúsculas na linha comparam doses de N dentro de cada fonte, pelo teste de Tukey (p<0,05).

Quando foram utilizadas a ureia comum e a ureia com inibidor da urease, o número de espigas por metro quadrado não variou em função de doses de N (Tabela 4.5). Já com a utilização da ureia com inibidor da nitrificação e da ureia com os dois inibidores foram observados maiores número de espigas por metro quadrado com a aplicação da maior dose de N (270 kg ha⁻¹) em relação à dose intermediária (120 kg ha⁻¹). No entanto, as diferenças observadas nesse componente em função dos tratamentos foram de pequena magnitude.

O número de grãos por espiga não variou em função de fontes de N, exceto na dose intermediária de N (120 kg ha⁻¹) (Tabela 4.5). Nessa dose, a utilização da ureia com os dois inibidores resultou em maior número de grãos por espiga em relação à ureia com inibidor da nitrificação. Esse componente não foi afetado pela dose de N aplicada, exceto quando se utilizou a ureia com inibidor da nitrificação, em que se obteve menor número de grãos por espiga com a aplicação da dose intermediária de N em relação às demais doses. Resultado contrastante foi relatado numa condição distinta, em solo argiloso e temperaturas

amenas (médias do mês mais quente inferiores a 22° C), em que o número de grãos por espiga aumenta com o incremento da dose (Mota *et al.*, 2015). A aplicação de N aumenta o número de grãos por espiga devido ao aumento do número de óvulos formados por fileira e à maior produção de fotoassimilados, que resulta em menor abortamento de grãos (Magalhães *et al.*, 2002).

O peso do grão foi o componente mais associado ao rendimento de grãos. Na dose mais baixa de N (50 kg ha⁻¹), o peso do grão não variou em função de fontes de N (Tabela 4.5). Já na dose intermediária (120 kg ha⁻¹), com a aplicação do inibidor da urease obteve-se maior peso do grão em relação à ureia com inibidor da nitrificação. Na dose alta (270 kg ha⁻¹), obteve-se maior peso do grão com a aplicação da ureia com inibidor da urease e da ureia com os dois inibidores em relação à aplicação da ureia comum e da ureia com inibidor da nitrificação. Nas doses de N intermediária (120 kg ha⁻¹) e alta (270 kg ha⁻¹) quando foi utilizada a ureia com inibidor da urease e a ureia com os dois inibidores, respectivamente, o peso do grão foi maior, provavelmente em função das menores perdas por volatilização de amônia (Tabela 4.1).

De forma geral, o peso do grão aumentou com o incremento da dose de N, independentemente de fonte de N (Tabela 4.5). A partir de um mesmo número de óvulos fecundados, há maior rendimento de grãos apenas com o aumento das reservas acumuladas nos grãos (Silva *et al.*, 2006). O aumento do peso do grão em função do incremento da dose de N pode ser explicado pelo fato de que as maiores doses de nitrogênio mantêm a atividade fotossintética por um período maior de tempo, resultando em maior acúmulo de reservas nos grãos (Dourado Neto *et al.*, 2004). No presente experimento, a manutenção da atividade fotossintética pode ser observada nas avaliações de senescências foliares nos estádios R₁, R₃ e R₄, as quais diminuíram com o incremento das doses de N, folhas menos senescente apresentaram maior atividade fotossintética. O N é um dos nutrientes que mais afeta os componentes de rendimento e o rendimento de grãos de do milho (Vargas, 2010).

No tratamento testemunha, sem aplicação de N em cobertura, o rendimento de grãos obtido foi de apenas 3,1 Mg ha⁻¹. Com a aplicação das diferentes fontes e doses de N o rendimento variou de 8,4 a 13,7 Mg ha⁻¹ (Tabela 4.6). Os máximos rendimentos de grãos obtidos no presente experimento, na dose alta de N (270 kg ha⁻¹), não atingiram a expectativa de rendimento, provavelmente, em função da baixa densidade de plantas utilizada, para essa

época de semeadura (setembro). Para o rendimento de grãos, houve interação de fontes e doses de N. Na dose mais baixa de N (50 kg ha^{-1}), o rendimento de grãos não variou em função de fontes de N (Tabela 4.5). A ausência do efeito de fontes de N na menor dose pode ser explicada pelo fato de que em baixa dose ocorrem menos perdas e a planta aumenta a eficiência de uso do N. Já nas doses intermediária (120 kg ha^{-1}) e alta (270 kg ha^{-1}), o rendimento de grãos variou em função de fontes de N.

Tabela 4.6 Rendimento de grãos em função de fontes e doses de nitrogênio (N) aplicado em cobertura no milho. Eldorado do Sul-RS, 2015/16.

Fonte de N ¹	Dose de N (kg ha^{-1}) ²		
	50	120	270
	Rendimento de grãos (Mg ha^{-1})		
UC	A 9,20 b*	B 9,01 b	B 11,06 a
IU	A 10,05 b	A 10,86 ab	AB 12,27 ^a
IN	A 9,54 b	B 8,36 b	B 11,53 a
IU+IN	A 9,90 b	AB 9,96 b	A 13,74 a
CV ³ (%)	8,56		

¹UC: ureia comum; IN: ureia com inibidor da nitrificação; IU: ureia com inibidor da urease e IU+ IN: ureia com inibidores da urease e da nitrificação; ²Aplicada no estágio V₇, segundo escala de Ritchie *et al.* (1993); ³Coeficiente de variação. Letras maiúsculas na coluna comparam fontes de N dentro de cada dose e letras minúsculas na linha comparam doses de N dentro de cada fonte, pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). (Rendimento de grãos da testemunha, sem aplicação de N em cobertura: $3,11 \text{ Mg ha}^{-1}$).

Na dose intermediária, o rendimento de grãos aumentou em 20,5 % ($1,8 \text{ Mg ha}^{-1}$) e 10,5 % ($0,9 \text{ Mg ha}^{-1}$) com a aplicação da ureia com inibidor da urease e da ureia com os dois inibidores em relação à ureia comum. Nessa dose, a utilização da ureia com inibidor da nitrificação resultou em rendimento de grãos similar ao obtido com a aplicação da ureia comum. O maior rendimento de grãos na dose intermediária (120 kg ha^{-1}) com a aplicação da ureia com o inibidor da urease pode ser explicado pelas menores perdas por volatilização de amônia (Tabela 4.2). Outras características relacionadas à planta também influenciaram o rendimento de grãos, principalmente as senescências foliares nos estádios R₃ e R₄, em que se registrou menor senescência foliar com a utilização do inibidor da urease em relação às demais fontes de N (Tabela 4.3).

Com a aplicação da dose mais alta de N (270 kg ha^{-1}), o maior rendimento de grãos foi obtido com a aplicação da ureia com os dois inibidores (urease e nitrificação), seguido pelo obtido com a aplicação da ureia com inibidor da urease.

Em relação à ureia comum, o rendimento de grãos foi 24,2 % (2,7 Mg ha⁻¹) e 11 % (1,2 Mg ha⁻¹) maior quando se utilizou a ureia com os dois inibidores e a ureia com inibidor da urease. Nessa dose mais alta, também não se verificou vantagem da aplicação da ureia com inibidor da nitrificação em relação à ureia comum, uma vez que os rendimentos de grãos foram similares com essas duas fontes de N.

Na dose mais alta de N (270 kg ha⁻¹), o maior rendimento de grãos foi obtido com a aplicação da ureia com os dois inibidores, o da urease e o da nitrificação. Isso pode estar associado às menores perdas de amônia ocorridas (Tabela 4.1), ao maior rendimento de massa seca da parte aérea (Tabela 4.4) e às menores senescências foliares nos estádios R₃ e R₄ (Tabela 4.3) verificadas com a aplicação dessa fonte de N. Além disso, observa-se que, tanto na dose intermediária (120 kg ha⁻¹), quanto na alta (270 kg ha⁻¹), o N acumulado, no espigamento, não diferiu entre as fontes de N, no entanto houve diferenças no rendimento de grãos. Assim é provável que, após o espigamento, quando foi utilizada a ureia com inibidor da urease e a ureia com os dois inibidores associados, a planta continuou absorvendo N, incrementando o rendimento de grãos. Os híbridos de milho modernos, com tecnologia transgênica, possuem maior potencial de eficiência de uso do nitrogênio, com absorção do nutriente até estádios mais tardios, como no período de pós-florescimento (Bender *et al.*, 2013).

Além dessas características relacionadas a planta, os teores de N-NO₃⁻ na camada mais profunda do solo (30-40 cm) quando utilizada a ureia com inibidor da nitrificação podem ter influenciado o rendimento de grãos na dose alta (270 kg ha⁻¹). Esse fato indica que, quando se utilizou ureia com inibidor da nitrificação é provável que tenha ocorrido diminuição no processo de nitrificação, minimizando as perdas por lixiviação de N-NO₃⁻, quando comparada às demais fontes de N. No entanto, quando utilizada somente a ureia com inibidor de nitrificação, não houve aumento no rendimento de grãos em relação à ureia comum. Assim, é provável que na dose mais alta, o inibidor da urease foi eficiente em diminuir as perdas por volatilização de N-NH₃ e o inibidor da nitrificação as perdas por lixiviação de nitrato.

Como pode ser observado nesse experimento, o padrão de perdas por volatilização de N-NH₃ pode ser associada ao rendimento de grãos (Tabela 4.1 e figura 4.7c), ou seja, à medida que aumenta as perdas de N NH₃ diminui o rendimento de grãos. No entanto, os resultados relativos aos teores de N-NH₄⁺ e

N-NO₃ no presente experimento (Figura 4.7 e 4.8 a, b e c) foram pouco consistentes em relação às perdas por volatilização de N-NH₃. De acordo com a literatura, os teores de N-NH₄⁺ e N-NO₃⁻ podem variar de um dia para o outro, principalmente em função do regime hídrico (Poletto *et al.*, 2008).

O aumento do rendimento de grãos com a aplicação da ureia com inibidor da urease em relação à ureia comum na dose de 200 kg de N ha⁻¹ também foi observado em experimento realizado anteriormente no mesmo local (Menezes, 2015). Os inibidores de urease caracterizam-se por reduzir a taxa ou a velocidade de hidrólise da ureia que, por sua vez, reduz as perdas por volatilização de N-NH₃. O produto mais usado é o NBPT (tiofosfato de N-n-butiltriamida ou N-n-butiltriamida do ácido tiofosfórico) (Cantarella, 2007). No entanto, em alguns experimentos não se tem verificado resposta do rendimento de grãos à aplicação da ureia com inibidor da urease em relação à ureia comum (Soratto *et al.*, 2011; Dias, 2016; Motta *et al.*, 2015; Fontoura *et al.*, 2015). Em cana-de-açúcar, Barth (2009) relatou que o uso do inibidor da urease diminuiu as perdas por volatilização de amônia em relação à ureia comum, no entanto não houve aumento no rendimento de colmos. Por outro lado, estudos de volatilização de N conduzidos na região centro sul do Paraná apresentaram resultados em que houve redução das perdas de N por volatilização de, aproximadamente, 20 % quando do uso da ureia para menos de 5 % quando do uso de fontes em que à ureia é adicionado um inibidor de urease (Fontoura & Bayer, 2010). Em arroz irrigado, o uso de NBPT na ureia proporcionou maior rendimento de grãos e acumulação de nitrogênio pelo arroz quando a aplicação de N em cobertura antecedeu em 10 dias o início da irrigação em relação à ureia comum (Scivittaro *et al.*, 2010).

No presente experimento, o inibidor da nitrificação minimizou as perdas por lixiviação (Figura 4.7 c), mas não incrementou o rendimento de grãos de milho. Assim, não se observou vantagem da aplicação da ureia com inibidor da nitrificação (DCD) em relação à ureia comum, uma vez que os rendimentos de grãos foram similares com essas duas fontes de N (Tabela 4.6). Resultados similares ao presente experimento também foram obtidos anteriormente. Na cultura do milho, o uso do inibidor de nitrificação (DCD) aumentou a quantidade de N nas folhas, sem, no entanto, afetar o rendimento de grãos (Soratto *et al.*, 2011). Quando utilizada a ureia com inibidor da nitrificação não houve efeito no rendimento de colmos de cana-de-açúcar (Barth, 2009). Em condições

controladas de laboratório, o inibidor de nitrificação (DCD) inibiu a nitrificação, mantendo mais da metade do N-inorgânico na forma de amônio até 30 dias após sua aplicação (Marcelino, 2009).

4.3.6 Eficiência agronômica do uso do N

Para eficiência agronômica de uso do N (EAN) foram significativos os efeitos principais de fontes e de doses de N aplicado em cobertura. A aplicação da ureia com inibidor da urease, de forma isolada ou combinada com o inibidor da nitrificação, resultou em incrementos de 21 e 17 % da EAN em relação à ureia comum. No entanto, a aplicação da ureia com inibidor da nitrificação não aumentou a EAN em relação à ureia comum (Tabela 4.7).

Tabela 4.7 Eficiência agronômica de uso do N (EAN) em função de fontes de nitrogênio (N), na média de doses de N, e em função de doses de N, na média de fontes de N aplicado em cobertura no milho. Eldorado do Sul-RS, 2015/16.

Fonte de N ¹	EAN (kg kg ⁻¹)
UC	47 B*
IU	57 A
IN	48 B
IU+IN	55 A
Dose de N ²	
50	82 A
120	43 B
270	30 C
CV ³ (%)	15,68

¹UC: ureia comum; IN: ureia com inibidor da nitrificação; IU: ureia com inibidor da urease e IU+ IN: ureia com inibidores da urease e da nitrificação; ²Dose de N aplicada no estágio V₇, segundo escala de Ritchie *et al.* (1993); ³Coeficiente de variação *Médias seguidas por letras iguais, não diferem significativamente, pelo teste de Tukey (p<0,05).

O aumento da EAN com a aplicação da ureia com inibidor da urease em relação à ureia comum também foi verificado em um experimento conduzido anteriormente no mesmo local com milho (Menezes, 2015) e em outro experimento conduzido com trigo (Jaracesk, 2013). No entanto, em um experimento conduzido sob condições edafoclimáticas distintas, em um solo argiloso e sob temperaturas amenas (médias do mês mais quente inferiores a 22° C) não foram observados efeitos de fontes de N na EAN (Mota *et al.*, 2015). A ausência de resposta a diferentes fontes de N em solos argilosos pode estar

relacionada à maior fixação de amônio nesses solos em comparação a solos arenosos. (Francisco *et al.*, 2011).

A EAN diminuiu à medida que se aumentou a dose de N aplicada em cobertura, na média de fontes de N (Tabela 4.7). Houve decréscimos de 47 e 63 % da EAN com a aplicação, respectivamente, das doses intermediária (120 kg de N ha⁻¹) e alta (270 kg de N ha⁻¹) em relação à menor dose. Isso ocorre devido ao fato de que com menores quantidades de nitrogênio aplicado, há maior absorção desse nutriente pela planta, diminuindo, assim, as perdas para o ambiente. Como resultado, a eficiência de uso de um nutriente diminui à medida que aumenta a dose aplicada do mesmo (Fageria, 1998). Esses resultados estão de acordo com a lei dos rendimentos decrescentes. Vários autores têm evidenciado diminuição da EAN à medida que aumenta a dose de N aplicada (Júnior, 2011; Silva, 2013; Mota *et al.*, 2015; Menezes, 2015).

4.4 CONCLUSÕES

Em Argissolo, a utilização da ureia com inibidor da urease, de forma isolada ou associada ao inibidor da nitrificação, é eficiente para reduzir perdas de N por volatilização de amônia em relação à aplicação da ureia comum, sob doses de N média (120 kg ha⁻¹) e alta (270 kg ha⁻¹).

O uso da ureia com inibidor da enzima urease, para se atingir a expectativa de rendimento média (10 Mg ha⁻¹), e o da ureia com inibidor da urease associada ao inibidor da nitrificação, para se atingir a expectativa de rendimento alta (15 Mg ha⁻¹), são estratégias eficientes para obtenção de maiores rendimentos de grãos e maior eficiência de uso do N em relação à ureia comum.

A adição do inibidor da nitrificação à ureia de forma isolada não se mostra vantajosa em relação à aplicação da ureia comum.

4.5 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

BALIGAR, V. C.; DUNCAN, R. R.; FAGERIA, N. K. Soil-plant interaction on nutrient efficiency in plants: an overview. In BALIGAR, R. V.; DUNCAN, R. R. (Ed.). **Crops as enhancers of nutrient use**. San Diego: Academic, 1990. p. 351-373.

BARTH, G. **Inibidores da urease e da nitrificação na eficiência de uso de adubos nitrogenados**. 78 f. Tese (Doutorado) - Curso de Agronomia, Escola de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2009.

BENDER, R.R. et al. Transgenic corn rootworm protection enhances uptake and post-flowering mineral nutrient accumulation. **Agronomy Journal**, Madison, v. 105, p. 1626-1634, 2013.

BERGAMASCHI, H. *et al.* **Boletins agrometeorológicos da estação experimental agrônômica da ufrgs**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2013. 8 p.

BISSANI C. A., GIANELLO C., CAMARGO F.A.O., TEDESCO M.J. **Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas**. 2ª ed. Porto Alegre: Metrópole; 2008.

CAMPBELL, C. A. *et al.* Nitrate leaching as influenced by fertilization in the Brown soil zone. **Canadian Journal of Soil Science**, Ottawa, v. 73, n. 4, p. 387-397, 1993.

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. Nitrogênio. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ V., V.H.; BARROS, N.F.; FONTES, R.L.F.; CANTARUTTI, R.B. & NEVES, J.C.L., eds. **Fertilidade do solo**. Viçosa, MG, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p.375-470.

CANTARELLA, H.; MONTEZANO, Z. F. Nitrogênio e enxofre. In: PROCHNOW, L. I.; CASARIN, V.; STIPP, S. R. (Eds.). **Boas práticas para uso eficiente de fertilizantes: nutrientes**. Piracicaba: IPNI – Brasil, 2010. v. 2, p. 1-65.

CANTARELLA, H. et al. Perdas de N por volatilização da amônia e resposta da cana-de-açúcar à adubação nitrogenada em sistema de colheita de cana sem queima prévia. In: CONGRESSO NACIONAL DA STAB. 7. 1999. **Anais**. Londrina. 1999.

CIVARDI, E.A. et al. Ureia de liberação lenta aplicada superficialmente e ureia comum incorporada ao solo no rendimento do milho. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v.41, n.1, p.52-59, 2011.

CRAFTS-BRANDER, S.J. et al. Influence of nitrogen deficiency on senescence and the amounts of RNA and proteins in wheat leaves. **Physiologia Plantarum**, Oxford, v.102, p.192-200, 1998.

CUI, M. *et al.* Effective mitigation of nitrate leaching and nitrous oxide emissions in intensive vegetable production systems using a nitrification inhibitor, dicyandiamide. **Journal of Soils Sediments**, Christchurch, v.11, p.722-730, 2011.

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

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

DI, H.J.; CAMERON, K.C. Effects of temperature and application rate of a nitrification inhibitor, dicyandiamide (DCD), on nitrification rate and microbial biomass in grazed pasture soil. **Australian Journal of Soil Research**, Sydney, v. 42, p. 927-932, 2004.

DIAS, M. A. R. **Desempenho agrônômico do milho com diferentes fontes e doses de nitrogênio**. 88 f. Tese (Doutorado) - Curso de Agronomia, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia 2016.

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

DOURADO NETO, D. et al. Efeito de boro e nitrogênio na cultura do milho. **Insula**, Florianópolis, v. 1, p.51-67, 2004.

DUARTE, F. M.; et al. Perdas de nitrogênio por volatilização de amônia com aplicação de ureia em solo de várzea com diferentes níveis de umidade. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.37, n.3, p.705-711, 2007.

EMBRAPA. **Recomendações técnicas para o cultivo do milho**. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. EMBRAPA-SPI, Brasília 2ª ed.: 204 p. 1996.

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

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

FAGERIA, N. K. Otimização da eficiência nutricional na produção das culturas. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.2, p.6-16, 1998.

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

FERNANDES, F. C. da S.; LIBARDI, P. L. Distribuição do Nitrogênio do Sulfato de $N-NH_4^+$ (15N) no sistema solo-planta, em uma sucessão de culturas, sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 36, n. 3, p. 885-894, 2012.

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.

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.

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

FRANCISCO, S. S. et al. Efficiency of urease and nitrification inhibitors in reducing ammonia volatilization from diverse nitrogen fertilizers applied to different soil types and wheat strawmulching. **Journal Of The Science Of Food And Agriculture**, Navarra, v. 91, p.1569-1575, 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.

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

INSTITUTO NACIONAL DE METEOROLOGIA. **Banco de dados meteorológicos para ensino e pesquisa**. Disponível em: <<http://www.inmet.gov.br/projetos/rede/pesquisa/>>. Acesso em: 30 ago. 2016

JADOSKI, S. O. et al. Características da lixiviação de nitrato em áreas de agricultura intensiva. **Pesquisa Aplicada & Agrotecnologia**, Guarapuava, v. 3, n. 1, p. 193-200, 2010.

JARACESKI, R. Doses com Inibidor de Urease (NBPT) aplicado em cobertura na cultura do trigo. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 34., 2013,. **Anais**. Florianópolis. 2013.

JENKINSON, D. S.; FOX, R. A.; RAYNER, J. H. et al. Interactions between fertilizer nitrogen and soil nitrogen – the so-called priming effect. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.36, n.3, p.425-444, 1985.

JÚNIOR, L. A. Z. Eficiência agrônômica do revestimento da uréia com polímero aplicada em cobertura na cultura do milho. Resume expandido. **XXXII Congresso Brasileiro de Ciência do Solo**. Uberlândia – MG. 2011.

Kelley, C.J., et al. Nitratennitrogen and oxygen isotope ratios for identification of nitrate sources and dominant nitrogen cycle processes in a tile-drained dryland agricultural field. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 57, p. 731-738, 2013.

KERBAUY, G. B. Fisiologia Vegetal. 2ª ed. Rio de Janeiro: Guanabara Koogan. 2008.

LARA CABEZAS, W. A. R.; KORNDÖRFER, G. H.; MOTTA, S. A. Volatilização de N-NH₃ na cultura de milho: II. Avaliação de fontes sólidas e fluídas em sistema de

plântio direto e convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, n.3, p.489-496, 1997.

LARA CABEZAS, W. A. R.; TRIVELIN, P. C. O. Eficiência de um coletor semiaberto estático na quantificação de N-NH₃ volatilizado da uréia aplicada ao solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.14, n.3, p.345-352, 1990.

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

MAGALHÃES, E. J. R. **Variabilidade de amônio e nitrato em solos sob sistemas de manejo no cerrado**. 42 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agronomia, Universidade de Brasília, Brasília, 2014.

MAGALHÃES, P. C. *et al.* Fisiologia do milho. Sete Lagoas: Embrapa CNPMS, 2002. 23p. Circular Técnica, 22.

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

MEISINGER, J.J. *et al.* 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).

MELO, F. B. *et al.* Fertilização nitrogenada, densidade de plantas e rendimento de milho cultivado no sistema plântio direto. **Revista Ciência Agrônômica**, Fortaleza, v. 42, n. 1, p. 27-31, 2011.

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

MIYAZAWA, M.; TISKI, I. Teores de N-NH₄⁺ no solo em função de fontes nitrogenadas: Uréia e Uréia revestida por policotê. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 32, 2011,. **Anais...** Uberlândia 2011.

MOIR, J. L. *et al.* The effect of dicyandiamide on pasture nitrate concentration, yield and N offtake under high N loading in winter and spring, **Grass Forage Science**, Canterbury, v.67 p.39-402, 2012.

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.

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

O'CALLAGHAN, M. et al. Effect of nitrification inhibitor dicyandiamide on microbial communities in a pasture soil amended of bovine urine. **Soil Biology & Biochemistry**, Oxford, v. 42, p. 1425-1436, 2010.

PERECIN, D. & CARGNELUTTI FILHO, A. Efeitos por comparações e por experimento em interações de experimentos fatoriais. **Ciencia e Agrotecnologia**, Lavras, v. 32, n. 1, p. 68-72, 2008.

PAGLIARINI, N. H. F. **Teores de amônio e nitrato no solo e desempenho agrônomo do milho em função de regimes hídricos, doses e épocas de aplicação de nitrogênio em cobertura**. 117 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2016.

POLETTO, N.; GROHS, D.S.; MUNDSTOCK, C.M. Flutuação diária e estacional de nitrato e amônio em um argissolo vermelho distrófico típico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p1619-1626, 2008.

RIMSKI-KORSAKOV, H.; RUBIO, G.; LAVADO, R. S. Fate of the nitrogen from fertilizers in field-grown maize. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v. 93, n. 3, p. 253–263, 2012.

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

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. **Estratégias de manejo da adubação nitrogenada em milho na região sul do Brasil**. Lages, Sc: Graphel, 2016. 119p.

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

SCIVITTARO, W. B.; et al. Nitrogen losses by ammonia volatilization and lowland rice response to NBPT urease inhibitor-treated urea. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.40, n.6, p.1283-1289, 2010.

SILVA, A. D. et al. Culturas antecessoras e adubação nitrogenada na cultura do milho, em sistema de plantio direto. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, Sete Lagoas, v.5, p.75-88, 2006.

SILVA, L. M. M. **Desempenho agrônomo de milho em função do tratamento de sementes com *azospirillum brasiliense* sob diferentes doses de nitrogênio mineral**. 70 f. Dissertação. (Mestrado) Programa de Pós-Graduação em Produção Vegetal) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages. 2013.

SOARES, J. R. **Efeito de inibidores de urease e de nitrificação na volatilização de nh_3 pela aplicação superficial de ureia no solo**. 79 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agricultura Tropical e Subtropical, Instituto Agrônomo, Campinas, 2011.

SORATTO, R. P. et al. Doses e Fontes alternativas de nitrogênio no milho sob plantio direto em solo arenoso. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 35, n. 1, p. 62 -70, 2011.

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

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.

TASCA, F. A. **Volatilização de amônia a partir da aplicação de duas fontes de Nitrogênio, em laboratório**. 50 f. Dissertação. (Mestrado) Programa de Pós Graduação em Manejo de Solo) – Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2009.

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)

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.

UHART S.A., ANDRADE F.H. Nitrogen and carbon accumulation and remobilization during grain filling in maize under different source and sink ratios. **Crop Science**, Madison, v. 35: p. 183-190, 1995.

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

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

VIERO, F. et al. Ammonia volatilization from nitrogen fertilizers in no-till wheat and maize in southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 38, p.1515-1525, 2014.

ZAVASCHI, E. **Volatilização de amônia e produtividade do milho em função da aplicação de uréia revestida com polímeros**. 92 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Agronomia, Escola de Agricultura Luiz de Queiroz, Piracicaba, 2010.

5 CONSIDERAÇÕES FINAIS

O manejo da adubação nitrogenada é importante para obtenção de altos rendimentos de grãos de milho. O nitrogênio (N) é o nutriente que é exigido em maior quantidade pelas plantas, sendo constituinte dos vários componentes da célula vegetal, incluindo clorofilas, aminoácidos, proteínas e ácidos nucleicos. A disponibilidade de N afeta o crescimento e o desenvolvimento da planta, pois está envolvido diretamente nos processos de divisão e expansão celular. No Brasil, a principal fonte nitrogenada utilizada na agricultura é a ureia, em função de sua alta concentração de N (~44), no entanto, é suscetível a diversas perdas. A adubação nitrogenada é uma das práticas mais caras da lavoura. Assim, estratégias que visem minimizar perdas de N devem ser consideradas. Dentre as estratégias estão à adequação da adubação nitrogenada a época de semeadura, escolha da fonte e dose de N a ser aplicada.

No capítulo 1 foi avaliada se a época de semeadura influencia a resposta do milho à adubação nitrogenada em cobertura. A hipótese do trabalho foi de que, nas semeaduras realizadas no início do período recomendado (agosto) há maior resposta à adubação nitrogenada quando comparada as semeaduras realizadas mais tardiamente (outubro). Essa hipótese foi confirmada. A resposta do rendimento de grãos de milho e a eficiência agrônômica do uso do N (EAN) à adubação nitrogenada em cobertura foram maiores na época de semeadura de agosto em relação à de outubro. Essa maior resposta a adubação nitrogenada na época de semeadura de agosto pode estar associada a características de desenvolvimento das plantas, como: estatura e diâmetro, também a senescência foliar e N acumulado na parte aérea.

Devido às baixas temperaturas ocorridas na época de semeadura de agosto, as plantas apresentaram menor crescimento e desenvolvimento, resultando em menor estatura e diâmetro de colmo quando comparada a época de semeadura de outubro. Em função da menor demanda da planta para crescimento vegetativo, na época de semeadura de agosto, as plantas possuem

menor necessidade de deslocar nutrientes das folhas mais velhas para as folhas mais novas, diminuindo a senescência foliar. Além disso, nessa época de semeadura as plantas apresentaram menor quantidade de N acumulado na parte aérea quando comparada a semeadura de outubro. Assim, provavelmente as plantas gastaram menos fotoassimilados para o crescimento vegetativo e mais para o enchimento de grãos, aumentando o rendimento de grãos de milho.

Os resultados obtidos no Capítulo 1 podem servir como subsídio para aperfeiçoar as recomendações atuais de adubação nitrogenada que levam em conta apenas o teor de matéria orgânica do solo, expectativa de rendimento e cultura antecessora. Até o presente momento, a época de semeadura não é um fator levado em consideração para recomendação da dose de N a ser aplicada. Assim, essas informações podem ser utilizadas para ajustar a adubação nitrogenada de acordo com a época de semeadura.

No capítulo 2 foi avaliada a eficiência de fertilizantes nitrogenados estabilizados em milho. As hipóteses do trabalho foram: a) a utilização de ureia com inibidor de urease diminui as perdas de N por volatilização de $N-NH_3$. b) a utilização do inibidor da nitrificação é eficiente para mitigar o processo de nitrificação, minimizando a lixiviação de $N-NO_3^-$, no perfil de um Argissolo; c) maiores perdas de N por lixiviação e volatilização resultam em menor disponibilidade de N para absorção pelas plantas e, em consequência, em menores rendimento de grãos e eficiência agrônômica de uso do N e maior senescência foliar.

A primeira hipótese do experimento II foi confirmada. De maneira geral, nas doses de N intermediária (120 kg ha^{-1}) e alta (270 kg ha^{-1}), as menores perdas por volatilização de $N-NH_3$ foram verificadas quando utilizada a ureia com o inibidor de urease de forma, isolada ou associada ao inibidor da nitrificação. Esse fato pode estar associado ao tipo de solo (argissolo), a alta temperatura ($25,7 \text{ °C}$) e a elevada umidade relativa do ar (80%) durante o período de coleta para estimar as perdas por volatilização de $N-NH_3$.

A segunda hipótese do experimento II não foi confirmada. Os dados relativos aos teores de amônio e nitrato foram pouco consistentes. De acordo com a literatura, os teores de $N-NH_4^+$ e $N-NO_3^-$ podem variar de um dia para o outro, principalmente em função do regime hídrico.

A terceira hipótese do experimento II foi confirmada, na dose de N intermediária (120 kg ha^{-1}) o maior rendimento de grãos foi obtido quando

utilizada a ureia com o inibidor da urease em relação às demais fontes. No entanto, com a dose de N alta (270 kg ha^{-1}) o maior rendimento de grãos foi obtido com a ureia com inibidor da urease associada ao inibidor da nitrificação. Isso pode estar associado às menores, perdas por volatilização de N-NH_3 e senescências foliares nos estádios R_3 e R_4 , quando aplicada a ureia com inibidor da urease e a ureia com os dois inibidores, da urease e da nitrificação. Outro aspecto associado ao rendimento de grãos é a eficiência agrônômica de uso do N (EAN), a qual é superior quando utilizada a ureia com inibidor de urease, de forma isolada ou associada ao inibidor de nitrificação, em relação à ureia comum e à ureia com inibidor da nitrificação. Assim, é provável que, na dose mais alta, o inibidor da urease foi eficiente em diminuir as perdas por volatilização de N-NH_3 e o inibidor da nitrificação as perdas por lixiviação de nitrato.

As informações obtidas na dissertação são muito importantes para adequar a dose e fonte de N em função da época de semeadura na cultura do milho. A caracterização da época de semeadura adequada, assim como a quantificação de perdas por volatilização de N-NH_3 , comportamento do N-mineral no solo e características associadas a planta em relação a diferentes fontes de N são estratégias que possibilitam aumentar a eficiência de uso do N. Assim, minimizando perdas no sistema solo-planta-atmosfera e maximizando o rendimento de grãos de milho. Com isso, adequar essas práticas de manejo com o objetivo de proporcionar as melhores condições de desenvolvimento para a planta e suprir as exigências da planta em relação ao fornecimento de N pela adubação nitrogenada, utilizando a fonte de N adequada, são importantes para tornar o sistema mais sustentável e com maior retorno econômico.

6 APÊNDICES

Apêndice 1. Quadrados médios obtidos na análise de variância do Capítulo 1 relativos às características avaliadas na cultura do milho irrigado. Eldorado do Sul-RS, 2014/15.

Fontes de variação	Graus de liberdade	Rendimento de grãos	Espigas m ²	Grãos por espiga	Peso do grão	N acumulado em R1	Estatura de planta	Diâmetro de colmo
Parcela principal								
Blocos	3	0,935 ns	0,57 ns	4179,117 ns	516,147 ns	395,342 ns	0,0123 ns	0,0283 ns
² Época (E)	1	11,620 ns	0,07 ns	2,542 **	2,108 ns	19680,181 ns	2,483 ***	0,628 ***
Resíduo (a)	3	1,685	0,274	2174,817	424,940	3917,469	0,014	0,015
Subparcela								
³ Nitrogênio (N)	4	165,877 ***	5,192 ***	108210,731 ***	3974,837 ***	61409,126 ***	0,248 ***	0,405 ***
E x N	4	3,382*	0,259 ns	3006,122	2607,573 ***	8924,669 **	0,002 ns	0,012 ns
Resíduo (b)	24	1,982	0,269	3463,654	455,212	2863,5057	0,007	0,014
CV ¹ Época (%)	4,84	10,67	6,24	11,22	5,97	28,71	4,84	6,22
CV Nitrogênio (%)	3,59	11,57	6,18	14,16	6,18	24,55	3,59	6,00

¹CV: 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. ²Semeada em 13/08/2014, época antecipada e 15//10/2014, época intermediária; ³ A aplicação do adubo nitrogenado foi parcelada, sendo a primeira dose de 50 kg ha⁻¹ de N igual para todos os tratamentos, exceto nas testemunha sem N, no estádio V₃, conforme escala de Ritchie *et al.* (1993). Nos tratamentos com 100 e 200 kg N ha⁻¹, o restante das doses foi aplicada em V₇. Nas duas doses mais altas (300 e 400 kg ha⁻¹ de N), o restante da dose foi dividida pela metade e aplicada em dois estádios, V₇ e V₁₀.

Apêndice 2. Quadrados médios obtidos na análise de variância do Capítulo 1 relativos às características avaliadas na cultura do milho irrigado. Eldorado do Sul-RS, 2014/15.

Fontes de variação	Graus de liberdade	Senescência R ₁	Senescência R ₃	Senescência R ₄	EAN	
					GL	
Parcela principal						
Blocos	3	4,465 ns	10,100 ns	41,288 ns	3	57,528 ns
² Época (E)	1	198,490 ***	1,087 ns	2,995 ns	1	875,570 **
Resíduo (a)	3	1,561	12,626	13,705	3	50,330
Subparcela						
³ Nitrogênio (N)	4	283,452 ***	387,509 ***	306,385 ***	3	2913,184 ***
E x N	4	8,790 ns	47,547 ***	90,134 ***	3	97,342 *
Resíduo (b)	24	6,509	8,901	17,266	18	42,269
CV ¹ Época (%)		3,76	9,36	8,67		15,60
CV Nitrogênio (%)		7,68	7,86	9,72		14,30

¹CV: 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. ²Semeada em 13/08/2014, época antecipada e 15/10/2014, época intermediária; ³ A aplicação do adubo nitrogenado foi parcelada, sendo a primeira dose de 50 kg ha⁻¹ de N igual para todos os tratamentos, exceto nas testemunha sem N, no estágio V₃, conforme escala de Ritchie *et al.* (1993). Nos tratamentos com 100 e 200 kg N ha⁻¹, o restante das doses foi aplicada em V₇. Nas duas doses mais altas (300 e 400 kg ha⁻¹ de N), o restante da dose foi dividida pela metade e aplicada em dois estádios, V₇ e V₁₀.

Apêndice 3. Quadrados médios obtidos na análise de variância do Capítulo 1 relativos ao rendimento de grãos demilho irrigado no tratamento testemunha, sem aplicação de N, e à taxa de mineralização aparente da matéria orgânica do solo (MOS). Eldorado do Sul-RS, 2014/15.

Fontes de variação	Graus de liberdade	Rendimento de grãos em sucessão ao pousio	Rendimento de grãos em sucessão à aveia branca	Taxa de mineralização aparente (MOS) colocar após a coluna seguinte
Parcela principal				
¹ Época (E)	1	12,625 **	0,6794 ns	14,106 **
Resíduo (a)	6	1,562	0,9489	1,372
CV ² Época (%)		27,11	21,65	24,91

²CV: 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. ¹ Antecipada: 13/08/2014; intermediária: 15/10/2014.

Apêndice 4. Quadrados médios obtidos na análise de variância do Capítulo 2 para teor de nitrato (N-NO₃⁻) e amônio (N-NH₄⁺) em função da coleta de solo no espigamento. Eldorado do Sul-RS, 2015/16.

Fontes de variação	Graus de liberdade	Coleta 41 dias após aplicação dos adubos nitrogenados		Coleta 41 dias após aplicação dos adubos nitrogenados	
		N-NO ₃ ⁻		N-NH ₄ ⁺	
Parcela principal		QM	Pr>Fc	QM	Pr>Fc
Blocos	2	36.430	0,0805ns	58.024	0,0371*
³ Fonte de N (F)	3	15.759	0,2640ns	203.318	0,0014**
Resíduo (a)	6	9.229		9.671	
Subparcela					
² Nitrogênio (N)	2	7.556	0,2427ns	45.880	0,0269*
F x N	6	40.038	0,0004**	38.949	0,0140*
Resíduo (b)	16	4.877		10.042	
Subsubparcela					
Camada (C)	3	16.246	0,1773ns	14.797	0,2618ns
Resíduo (c)	6	7.066		8.606	
F x C	9	8.855	0,0135*	6.229	0,2625ns
N x C	6	9.538	0,0186*	6.028	0,2964ns
F x N x C	18	6.424	0,0356*	14.861	0,0005**
Resíduo (d)	66	3.451		4.852	
CV ¹ Fonte de N (%)		38,97		25,65	
CV Nitrogênio (%)		28,33		26,14	
CV Camada (%)		34,10		24,20	
CV Resíduo d (%)		23,84		18,17	

¹CV: 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. ² A aplicação do adubo nitrogenado foi parcelada, sendo a primeira dose de 30 kg ha⁻¹ de N igual para todos os tratamentos, exceto na testemunha sem N, no estágio V₄, conforme escala de Ritchie *et al.* (1993). O restante das doses foi aplicada em V₇. ³ Fontes de nitrogênio: UC: ureia comum; IN: ureia com inibidor da nitrificação; IU: ureia com inibidor da urease e IU+ IN: ureia com inibidor da urease e da nitrificação.

Apêndice 5. Quadrados médios obtidos na análise de variância do capítulo 2 sobre as características avaliadas na cultura do milho irrigado. Eldorado do Sul-RS, 2015/16.

Fontes de variação	Graus de liberdade	Rendimento de grãos	Nº de espigas m ⁻²	Nº de grãos por espiga	Peso do grão	N acumulado em R1	EAN
Blocos	3	0,734974 ns	0,520241 **	2680,207358 ns	67,656385 ns	1429,470174 ns	34,279435 ns
² Nitrogênio (N)	2	34,481390 ***	0,471731 ns	4895,118258 *	9803,083252 ***	33441,769506 ***	11703,277619 ***
³ Fontes de N (F)	3	7,267024 ***	0,130274 ns	231,751819 ns	2643,792608 ***	396,825419 ns	274,167119 **
F x N	6	1,771312 *	0,441462 **	5653,614650 **	860,288299 **	2170,035973 *	44,496910 ns
Resíduo	33	0,802135	0,147299	1785846,9410	297484,2910	1309616,4410	65720,9040
CV ¹ (%)		8,57	5,15	10,59	4,08	23,21	15,68

¹CV: 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. ² A aplicação do adubo nitrogenado foi parcelada, sendo a primeira dose de 30 kg ha⁻¹ de N igual para todos os tratamentos, exceto nas testemunha sem N, no estágio V₄, conforme escala de Ritchie *et al.* (1993). O restante das doses foi aplicada em V₇. ³ Fontes de nitrogênio: UC: ureia comum; IN: ureia com inibidor da nitrificação; IU: ureia com inibidor da urease e IU+ IN: ureia com inibidor da urease e da nitrificação.

Apêndice 6. Quadrados médios obtidos na análise de variância do capítulo 2 sobre as características avaliadas na cultura do milho irrigado. Eldorado do Sul-RS, 2015/16

Fontes de variação	Graus de liberdade	Perdas por volatilização	Senescência R1	Senescência R3	Senescência R4	Massa seca
Blocos	3	15,830563ns	40,885269 **	65,799158 ***	63,485428 ***	7,895283ns
² Nitrogênio (N)	2	185,747941***	331,527715 ***	1114,627169 ***	569,752444 ***	0,391350 ns
³ Fontes de N (F)	3	126,633577***	4,623758 ns	118,541335 ***	82,028022 ***	31,558315***
F x N	6	39,314066*	13,427045 ns	70,084652 ***	21,240991 **	6,468606*
Resíduo	33	17,579981	11,007451	9,844886	7,258552	4,169561
CV ¹ (%)		33,98	10,06	6,92	5,14	17,66

¹CV: 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. ² A aplicação do adubo nitrogenado foi parcelada, sendo a primeira dose de 30 kg ha⁻¹ de N igual para todos os tratamentos, exceto na testemunha sem N, no estágio V₄, conforme escala de Ritchie *et al.* (1993). O restante das doses foi aplicada em V₇. ³ Fontes de nitrogênio: UC: ureia comum; IN: ureia com inibidor da nitrificação; IU: ureia com inibidor da urease e IU+ IN: ureia com inibidor da urease e inibidor da nitrificação.

7 VITA

Laís Corrêa Miozzo, filha de Rosângela Dilamar Corrêa Miozzo e Vitacir Luiz Miozzo, nasceu em 22 de novembro de 1988, em Erechim, Rio Grande do Sul, Brasil.

Em 2009 ingressou na Faculdade de Agronomia da Universidade Federal do Rio Grande do Sul, onde desenvolveu atividades como bolsista de iniciação científica no Departamento de Plantas de Lavoura, durante o período de julho de 2011 a agosto de 2014, sob a Orientação dos professores Paulo Regis Ferreira da Silva e Aldo Merotto Junior. Em 2013, realizou estágio curricular na Cooperativa dos Agricultores de Plantio Direto (Cooplantio), no município de Erechim, RS. Em 2014, realizou estágio curricular na Fundação Pró Sementes de Apoio à Pesquisa, no município de Passo Fundo, RS.

Graduou-se Engenheira Agrônoma em setembro 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 Dr. Paulo Regis Ferreira da Silva.