



UFSM

Tese de Doutorado

**DINÂMICA DO CARBONO E DO NITROGÊNIO COM O USO
DE URÉIA, NA SUCESSÃO AVEIA PRETA/MILHO, NO
SISTEMA PLANTIO DIRETO**

Clovis Orlando Da Ros

PPGCS

Santa Maria, RS, Brasil

Março 2004

**DINÂMICA DO CARBONO E DO NITROGÊNIO COM O USO DE
URÉIA, NA SUCESSÃO AVEIA PRETA/MILHO, NO
SISTEMA PLANTIO DIRETO**

Por

Clovis Orlando Da Ros

Tese apresentada ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de

Doutor em Ciência do Solo

PPGCS

Santa Maria, RS, Brasil

2004

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

A Comissão Examinadora, abaixo assinada, aprova a
Tese de Doutorado

**DINÂMICA DO CARBONO E DO NITROGÊNIO, COM O USO DE URÉIA,
NA SUCESSÃO AVEIA PRETA/MILHO, NO SISTEMA PLANTIO
DIRETO**

elaborada por

Clovis Orlando Da Ros

Como requisito parcial para a obtenção do grau de
Doutor em Ciência do Solo

COMISSÃO EXAMINADORA

Dr. Celso Aita - UFSM
(Orientador)

Dr. Carlos Alberto Ceretta - UFSM

Dr. Leandro Souza da Silva - UFSM

Dr. Luciano Kayser Vargas - FEPAGRO

Dr. Roberto Luiz Salet - UNICRUZ

Santa Maria, 12 de março de 2004

AGRADECIMENTOS

A Deus pela presença constante.

À minha família, pela compreensão e carinho.

Ao professor Orientador Dr. Celso Aita, pela dedicação e incentivo em todos os momentos.

À Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo.

À Universidade de Cruz Alta, pelo apoio na realização do Curso de Doutorado.

À EMBRAPA Agrobiologia (RJ), pelas análises laboratoriais.

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

Aos funcionários do Departamento de Solos, pela ajuda e amizade.

Aos bolsistas de iniciação científica e colegas que participaram efetivamente na elaboração desta tese (Adilson, Cadore, Daniel, Elias, Felipe, Elizandro, Kely, Ezequiel, Marcela, Marcelo, Sandro e Titon).

À minha esposa, pelo carinho e incentivo nos momentos mais difíceis, e ao meu futuro filho(a), aos quais dedico esta tese.

SUMÁRIO

	Página
SUMÁRIO	iv
RESUMO GERAL	vii
GENERAL ABSTRACT	ix
LISTA DE TABELAS	xi
LISTA DE FIGURAS	xiii
LISTA DE ANEXOS	xiv
LISTA DE APÊNDICES	xv
INTRODUÇÃO GERAL	1
MATERIAL E MÉTODOS GERAL	4
1. Capítulo I - Dinâmica do carbono e do nitrogênio com o uso de uréia, na sucessão aveia preta/milho, no sistema plantio direto: I. Decomposição dos resíduos culturais da aveia	9
1.1. Resumo.....	9
1.2. Introdução	10
1.3. Material e Métodos.....	12
1.4. Resultados e Discussão.....	19
1.4.1. Fluxos de C-CO ₂ para a atmosfera.....	19
1.4.2. Decomposição dos resíduos culturais.....	26
1.4.3. Fases de decomposição dos resíduos culturais.....	30
1.5. Conclusão.....	34
2. Capítulo II - Dinâmica do carbono e do nitrogênio com o uso de uréia, na sucessão aveia preta/milho, no sistema plantio direto: II. Imobilização de N e evolução dos teores de N mineral no solo	35

2.1. Resumo.....	35
2.2. Introdução	36
2.3. Material e Métodos.....	38
2.4. Resultados e Discussão.....	41
2.4.1. Imobilização de N	41
2.4.2. N mineral no solo.....	49
2.5. Conclusões.....	53
3. Capítulo III - Dinâmica do carbono e do nitrogênio com o uso de uréia, na sucessão aveia preta/milho, no sistema plantio direto: III. Volatilização de amônia e deslocamento de nitrato no perfil do solo.....	54
3.1. Resumo.....	54
3.2. Introdução	56
3.3. Material e Métodos.....	57
3.4. Resultados e Discussão.....	61
3.4.1. Volatilização de amônia.....	61
3.4.2. Deslocamento de nitrato no perfil do solo.....	67
3.4.3. Deslocamento de N no solo derivado da uréia marcada com ¹⁵ N.....	72
3.5. Conclusões	79
4. Capítulo IV - Dinâmica do carbono e do nitrogênio com o uso de uréia, na sucessão aveia preta/milho, no sistema plantio direto: IV. Acúmulo de nitrogênio e produção de milho.....	80
4.1. Resumo	80
4.2. Introdução	81

4.3. Material e Métodos.....	82
4.4. Resultados e Discussão.....	85
4.4.1. Acumulação de matéria seca e de N na parte aérea do milho.....	85
4.4.2. Produção de matéria seca e acumulação de N nas raízes do milho	89
4.4.3. Acumulação de N no milho derivado da uréia marcada com ¹⁵ N	91
4.4.4. Recuperação do N derivado da uréia pelas plantas de milho.....	95
4.4.5. Produção de grãos de milho	100
4.4.6. Balanço de N no sistema solo-planta.....	102
4.5. Conclusões	103
CONCLUSÕES GERAIS.....	104
SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS.....	105
REFERÊNCIAS BIBLIOGRAFICAS	106
ANEXOS.....	120
APÊNDICES	122

RESUMO GERAL

Tese de Doutorado

Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo

Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

DINÂMICA DO CARBONO E DO NITROGÊNIO COM O USO DE URÉIA, NA SUCESSÃO AVEIA PRETA/MILHO, NO SISTEMA PLANTIO DIRETO

Autor: Clovis Orlando Da Ros

Orientador: Celso Aita

Santa Maria, 12 de março de 2004

O nitrogênio (N) aplicado como fertilizante mineral segue diferentes destinos no solo, podendo ser absorvido pelas plantas, lixiviado na forma de nitrato, volatilizado na forma de amônia, desnitrificado e imobilizado pela biomassa microbiana. A dinâmica desses processos no solo é alterada com a adição de resíduos culturais, principalmente quando eles permanecem na superfície do solo, no sistema plantio direto. O objetivo deste trabalho foi avaliar a dinâmica do N e do carbono (C) no solo, com aplicação de adubação nitrogenada no milho, em diferentes épocas, sobre os resíduos culturais de aveia, com ênfase na decomposição dos resíduos culturais, na imobilização de N, na volatilização de amônia, no deslocamento de nitrato e no aproveitamento do N da adubação nitrogenada pelo milho. O experimento foi conduzido em 2002/03, na UFSM (RS), em um Argissolo Vermelho distrófico arênico, com seis anos de cultivo no sistema plantio direto. O delineamento experimental foi em blocos ao acaso, com três repetições. Os tratamentos foram: 1) sem resíduos culturais e sem N (SRSN); 2) sem resíduos culturais e com N na semeadura e em cobertura (SRCN1); 3) com resíduos culturais e sem N (CRSN); 4) com resíduos culturais e com N na semeadura e em cobertura

(CRCN1) e 5) com resíduos culturais e com N na pré-semeadura e na semeadura (CRCN2). O N foi aplicado a lanço, na forma de uréia, sobre os resíduos culturais da aveia, na dose de 50 kg ha^{-1} , em cada época, totalizando 100 kg ha^{-1} . Para melhor traçar o destino do N no solo e nas plantas de milho, foram demarcadas microparcelas no interior das parcelas e aplicada uréia marcada com 2,8 % de átomos de ^{15}N em excesso. A aplicação de N-uréia não aumentou a decomposição dos resíduos culturais dispostos na superfície do solo. Houve efeito dos resíduos culturais na imobilização de N, com maior intensidade nos estágios iniciais de decomposição. A maior imobilização de N, na presença dos resíduos culturais, aumentou a retenção de N nas camadas superficiais do solo. Isso evitou o seu deslocamento em profundidade, porém diminuiu a acumulação de N no milho e a produção de grãos, em relação ao solo descoberto. A quantidade de N derivado da aplicação de 100 kg ha^{-1} de N-uréia, deslocada na camada de 100 a 120 cm, foi pequena, indicando um baixo potencial de lixiviação de nitrato, mesmo em solo arenoso e com alta precipitação pluviométrica. A volatilização de amônia foi influenciada pela presença dos resíduos culturais na superfície do solo. Quando eles proporcionaram maior umidade do solo, no momento da aplicação da uréia, houve diminuição da volatilização de amônia em relação ao solo descoberto. A antecipação da adubação nitrogenada, na pré-semeadura do milho, com o objetivo de aumentar o aproveitamento do N pela cultura, mostrou-se uma prática não recomendada.

GENERAL ABSTRACT

Tese de Doutorado

Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo

Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

DINÂMICA DO CARBONO E DO NITROGÊNIO COM O USO DE URÉIA, NA SUCESSÃO AVEIA PRETA/MILHO, NO SISTEMA PLANTIO DIRETO

**Carbon and nitrogen dynamics after use of urea in a black oat/corn
sucession under no-tillage**

Author: Clovis Orlando Da Ros

Adviser: Celso Aita

Santa Maria, March 12, 2004

The nitrogen (N) applied as mineral fertilizer has several fates in soils, such as plant uptake, leached as nitrate, volatilized as ammonia, denitrified and immobilized by microbial biomass. Crop residues may alter the dynamics of these processes, mainly, when no-tillage is adopted, because they remain at soil surface. The objective of this study was to evaluate soil carbon and N dynamics after N fertilization for corn, seeded on soil covered by crop residues of black oat, measuring the decomposition of the crop residues, N immobilization, ammonia volatilization, nitrate moving and corn N uptake from applied N. The experiment was carried out in 2002/03, at Federal University of Santa Maria, State of Rio Grande do Sul, Brasil, in an typic Hapludalf under six years of no-tillage. A completely randomized block design with three repetitions was used. The treatments were: 1) no crop residue and no N application (SRSN); no crop residue and N application at seeding and topdressing (SRCN1); 3) with crop residue and no N (CRSN); 4) with crop

residue and N application at seeding and topdressing (CRCN1) and; 5) with crop residue and with N application before seeding and seeding (CRCN2). The urea, as N source, was spread on oat residue, for each N application, at a rate of 50 kg ha^{-1} , summing up 100 kg ha^{-1} . Microplots inside of plots were marked and it was applied marked urea with 2,8 % of ^{15}N in excess to have a better control of N fate in soil and corn plant. The urea application did not increase the decomposition of the crop residue at soil surface. It was effect of crop residue on N immobilization, with higher impact at initial stages of decomposition. The higher N immobilization by crop residue increased N retention at surface layer, avoiding its deeper moving, however, caused a decreased in corn N uptake and yield, as compared to bare soil. The amount of N derived from 100 kg ha^{-1} of urea moved inside of 100 to 120 cm layer was low, implying a low potential of nitrate leaching, even though the soil is sandy and area has high rainfall precipitation. The ammonia volatilization was affected by soil surface crop residue. When soil was wetter, due soil cover, at urea application the ammonia volatilization decreased. The N application before seeding with objective to improve N uptake did not had positive answer.

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Distribuição do N-uréia marcado (^{15}N) e não marcado (^{14}N), em cada microparcela, nos diferentes tratamentos.....	6
Tabela 2. Produção de matéria seca e principais características químicas da parte aérea e das raízes da aveia.....	13
Tabela 3. Calendário de coletas de solo para determinação do N mineral (N_{MI}), C na biomassa microbiana (C_{BM}) e N imobilizado (N_{IDU}).....	18
Tabela 4. Relação C/N da biomassa microbiana, nos primeiros 85 dias do manejo da aveia, sem (SN) e com aplicação de N-uréia na semeadura e em cobertura (CN1), na pré-semeadura e na semeadura (CN2), na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais.....	25
Tabela 5. Decomposição dos resíduos culturais da aveia na superfície do solo (parte aérea), após 157 dias do manejo, utilizando a quantidade inicial e final de matéria seca (MS) e de C orgânico (CO).....	29
Tabela 6. Quantidade de N derivado da uréia marcada com ^{15}N , no N total do solo (N_{Tdu}), na fração orgânica (N_{odu}) e na fração mineral (N_{mdu}), na maturação fisiológica do milho, nos tratamentos com resíduos culturais (CR) e com N-uréia na semeadura + cobertura (CN1) e na pré-semeadura + semeadura (CN2).....	48
Tabela 7. Umidade gravimétrica do solo (%), imediatamente antes da aplicação do N-uréia na pré-semeadura do milho, na semeadura e em cobertura, na presença e na ausência de resíduos culturais de aveia	64

- Tabela 8. Quantidade de nitrato no solo, na camada de zero a 10 cm de profundidade, antes e após a semeadura do milho, no tratamento que recebeu o N-uréia somente na semeadura (CRCN1) e no tratamento que recebeu N-uréia na pré-semeadura e na semeadura (CRCN2) e as suas respectivas taxas de nitrificação do amônio da uréia 71
- Tabela 9. Balanço do N no sistema solo-planta, na maturação fisiológica do milho, proveniente da aplicação de 50 kg ha⁻¹ de N-uréia em cada época: semeadura e cobertura (CN1), pré-semeadura e semeadura (CN2), na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais 103

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Esquema da distribuição das microparcelas (A e B) nos tratamentos com resíduos culturais (CRCN1 e CRCN2) e da microparcela (A) no tratamento sem resíduos culturais (SRCN1). Área da microparcela = 1,30 x 1,80 m (2,34 m²). Espaçamento entre linhas = 0,9 m..... 7
- Figura 2. Precipitação e irrigação média mensal (outubro/02 a fevereiro/03) e precipitação média dos últimos 30 anos. Os dados de precipitação foram obtidos na Estação Meteorológica do Departamento de Fitotecnia da UFSM... 8
- Figura 3. Vista das câmaras estáticas da medição de emissão de C-CO₂..... 14
- Figura 4. Fluxos de C-CO₂, durante 157 dias após o manejo da aveia, sem (SN) e com aplicação de N-uréia na semeadura e em cobertura (CN1), na pré-semeadura e na semeadura do milho (CN2), na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais..... 20
- Figura 5. Diferença (Δ C-CO₂) nos fluxos de C-CO₂ entre os tratamentos com e sem N-uréia, aplicada na semeadura e em cobertura (CN1), na pré-semeadura e na semeadura (CN2), na presença (CR) (a e b) e na ausência de resíduos culturais (SR) (c)..... 22
- Figura 6. Carbono na biomassa microbiana (C_{BM}), nos primeiros 85 dias do manejo da aveia, sem (SN) e com aplicação de N-uréia na semeadura e em cobertura do milho (CN1), na pré-semeadura e na semeadura (CN2), na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais. As barras indicam a diferença mínima significativa (Tukey 5%)..... 23

- Figura 7. Emissão acumulada de C-CO₂ na ausência (SR) e na presença de resíduos culturais (CR), sem (SN) e com aplicação de N-uréia na semeadura e em cobertura (CN1), na pré-semeadura e na semeadura do milho (CN2). A barra vertical indica a diferença mínima significativa (Tukey 5%) entre as quantidades totais de C-CO₂ acumuladas..... 26
- Figura 8. Mineralização do C orgânico dos resíduos culturais de aveia (parte aérea e raízes), nos primeiros 157 dias após o manejo. Média dos tratamentos com e sem N-uréia..... 27
- Figura 9. Estimativa da taxa de mineralização do C orgânico (k_i), nas diferentes fases de decomposição dos resíduos culturais, por meio do logaritmo natural do C orgânico remanescente. Média dos tratamentos com e sem N-uréia..... 32
- Figura 10. Quantidade de N imobilizado na fração orgânica do solo, derivado do N-uréia marcado com ¹⁵N (Nidu), na dose de 50 kg ha⁻¹ aplicada em uma única época, na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais (a) e na dose de 100 kg ha⁻¹, dividida em duas épocas: na semeadura e em cobertura (CN1), na pré-semeadura e na semeadura (CN2) (b). As barras indicam a diferença mínima significativa (Tukey 5%)..... 42
- Figura 11. Relação entre o C orgânico mineralizado proveniente dos resíduos culturais e a quantidade de N imobilizado derivado do N-uréia marcado com ¹⁵N (Nidu)..... 45
- Figura 12. Nitrogênio na biomassa microbiana, nos primeiros 85 dias do manejo da aveia, sem N (SN) e com aplicação de N-uréia na semeadura e em cobertura (CN1), na pré-semeadura e na semeadura (CN2), na presença (CR) e

- na ausência (SR) de resíduos culturais..... 47
- Figura 13. Quantidade de N mineral no solo, nos primeiros 85 dias do manejo da aveia, na camada de zero a 10 cm (a) e de zero a 90 cm (b), com aplicação de N-uréia na semeadura e em cobertura do milho (CN1), na pré-semeadura e na semeadura (CN2), na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais. As barras verticais indicam a diferença mínima significativa (Tukey 5%)..... 50
- Figura 14. Estimativa da quantidade de N mineral no solo, nos primeiros 85 dias do manejo da aveia, na camada de zero a 10cm (a) e de zero a 90 cm (b), proveniente da aplicação de N-uréia na semeadura e em cobertura do milho (CN1), na pré-semeadura e na semeadura (CN2), na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais. As barras verticais indicam a diferença mínima significativa (Tukey 5%)..... 52
- Figura 15. Esquema (a) e foto (b) do dispositivo utilizado para medir a volatilização de amônia. Adaptado de NÔMMIK (1973).. 58
- Figura 16. Fluxos de volatilização de N-NH₃ sem aplicação de N-uréia (SN) e com aplicação de 50 kg ha⁻¹ N-uréia (CN) na pré-semeadura, semeadura e em cobertura, na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais. As barras verticais indicam a diferença mínima significativa (Tukey 5%)..... 61
- Figura 17. Perda acumulada de N-NH₃ sem aplicação de N-uréia (SN) e com aplicação de 50 kg ha⁻¹ N-uréia (CN) na pré-semeadura, semeadura e em cobertura, na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais. As barras verticais indicam a diferença mínima significativa (Tukey 5%)..... 63

- Figura 18. Temperaturas do ar e precipitações pluviométricas no período de avaliação da volatilização de amônia após a aplicação de N-uréia na pré-semeadura, semeadura e em cobertura..... 64
- Figura 19. Quantidade total de N-NH₃ volatilizado proveniente da aplicação de N-uréia em duas épocas: na semeadura e em cobertura (CR1), na pré-semeadura e na semeadura (CR2), na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais. Dose de N-uréia aplicado em cada época = 50 kg ha⁻¹..... 66
- Figura 20. Distribuição de nitrato (N-NO₃⁻) no perfil do solo (0 a 90 cm), nos tratamentos sem (SN) e com aplicação de N-uréia na semeadura e em cobertura do milho (CN1), na pré-semeadura e na semeadura (CN2), na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais. As barras horizontais indicam a diferença mínima significativa (Tukey 5%)..... 68
- Figura 21. Distribuição do N no solo derivado da uréia marcada com ¹⁵N (Nsdu), na camada de zero a 120 cm, na maturação fisiológica do milho, com aplicação individual de 50 kg ha⁻¹ de N-uréia marcado na pré-semeadura, semeadura e em cobertura, na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais. As barras horizontais indicam a diferença mínima significativa (Tukey 5%)..... 73
- Figura 22. Distribuição do N no solo derivado da uréia marcada com ¹⁵N (Nsdu), na camada de zero a 120 cm, na maturação fisiológica do milho, com aplicação de 100 kg ha⁻¹ de N-uréia sobre os resíduos culturais de aveia (CR), dividido em duas épocas: semeadura e em cobertura (CN1), pré-semeadura e na semeadura (CN2). As barras horizontais indicam a diferença mínima significativa (Tukey 5%)..... 74

- Figura 23. N não recuperado por meio do balanço de N no sistema solo-planta-atmosfera, na maturação fisiológica do milho, com aplicação de N-uréia na semeadura e em cobertura (CN1), na pré-semeadura e na semeadura (CN2), na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais. DMS: diferença mínima não significativa (Tukey 5%)..... 78
- Figura 24. Curva de produção de matéria seca (a) e de N acumulado (b) pela parte aérea das plantas de milho, sem aplicação de N (SN) e com aplicação de N-uréia na semeadura e em cobertura (CN1), na pré-semeadura e na semeadura (CN2), na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais. As barras verticais indicam a diferença mínima significativa (Tukey 5%)..... 86
- Figura 25. Produção de matéria seca (a) e N acumulado (b) nas raízes de milho (0–120 cm) com aplicação de N-uréia na semeadura e em cobertura do milho (CN1), na pré-semeadura e na semeadura (CN2), na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais de aveia na superfície do solo. As barras horizontais indicam a diferença mínima significativa (Tukey 5%)..... 90
- Figura 26. Quantidade de N acumulado na plantas de milho derivado do N-uréia marcado (Npdu), na maturação fisiológica, com aplicação de N-uréia na semeadura e em cobertura do milho (CN1), na pré-semeadura e na semeadura (CN2), na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais. * Tukey ($p < 0,05$)..... 92
- Figura 27. Distribuição do N nas raízes do milho derivado da uréia marcada com ^{15}N (Nrdu) na camada de zero a 120 cm, na maturação fisiológica do milho, com aplicação individual de 50 kg ha^{-1} de N-uréia na pré-semeadura, semeadura e em cobertura, na presença (CR) e na

- ausência (SR) de resíduos culturais. A barra indica a diferença mínima significativa (Tukey 5%)..... 93
- Figura 28. Quantidade de N acumulado nas plantas de milho, na maturação fisiológica, derivado da aplicação de 100 kg ha⁻¹ de N-uréia marcado com ¹⁵N (Npdu) sobre os resíduos culturais da aveia, dividido em duas épocas: semeadura e cobertura (CRCN1) e pré-semeadura e semeadura (CRCN2). * Tukey (p<0,05)..... 94
- Figura 29. Recuperação percentual do N aplicado como uréia nas plantas de milho com aplicação de N-uréia na semeadura e em cobertura do milho (CN1), na pré-semeadura e na semeadura (CN2), na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais de aveia na superfície do solo. *Tukey (p<0,05)..... 96
- Figura 30. Diferença de N acumulado nas plantas de milho (palhada e grãos) na presença de resíduos culturais (CR) derivado do solo (Npds) nos tratamentos sem N (SN) e com N-uréia aplicado na semeadura e em cobertura (CN1), na pré-semeadura e na semeadura (CN2). Npds = N total acumulado no milho – N acumulado no milho derivado da uréia marcada com ¹⁵N (Npdu)..... 98
- Figura 31. Rendimento de grãos de milho sem aplicação de N (SN) e com aplicação de N-uréia na semeadura e em cobertura do milho (CN1), na pré-semeadura e na semeadura (CN2), na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais.* Tukey (p<0,05)..... 100

LISTA DE ANEXOS

Anexo 1.	Valores de densidade aparente do solo (Ds), em diferentes camadas, utilizados para os cálculos do N no solo derivado do ¹⁵ N-uréia, C e N na biomassa microbiana, N imobilizado na fração orgânica do solo derivado do ¹⁵ N-uréia e N total e mineral no solo.....	121
Anexo 2.	Quantidade de C orgânico e N total nos resíduos culturais remanescente (RC) e no solo após 157 dias do manejo da aveia e a quantidade média de C e N na biomassa microbiana avaliada durante o ciclo da cultura do milho (BM).....	122

LISTA DE APÊNDICES

- Apêndice 1. Umidade gravimétrica (%) na presença e na ausência de resíduos culturais na superfície do solo. Medias dos tratamentos com e sem aplicação de N-uréia..... 123
- Apêndice 2. Carbono orgânico na biomassa microbiana nos primeiros 85 dias do manejo da aveia, sem aplicação de N (SN), com aplicação de N-uréia na semeadura e em cobertura do milho (CN1), na pré-semeadura e na semeadura (CN2), na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais..... 124
- Apêndice 3. Nitrogênio na biomassa microbiana nos primeiros 85 dias do manejo da aveia, sem aplicação de N (SN), com aplicação de N-uréia na semeadura e em cobertura do milho (CN1), na pré-semeadura e na semeadura (CN2), na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais..... 125
- Apêndice 4. Quantidade de N imobilizado na fração orgânica do solo derivado do fertilizante (Nidf), durante o ciclo do milho, com aplicação de N-uréia marcada com ^{15}N nas microparcelas A e B, na semeadura e em cobertura (CN1), na pré-semeadura e na semeadura (CN2), na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais..... 126
- Apêndice 5. Nitrogênio total no solo, delta ^{15}N e N solo derivado da uréia marcada com ^{15}N (Nsdu), por camada de solo, na maturação fisiológica do milho, com aplicação de N-

	uréia na semeadura e em cobertura do milho (CN1), na pré-semeadura e na semeadura (CN2), na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais.....	127
Apêndice 6.	Produção de matéria seca e N acumulado nas raízes de milho, por camada de solo, na maturação fisiológica do milho, com aplicação de N-uréia na semeadura e em cobertura (CN1), na pré-semeadura e na semeadura (CN2), na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais.....	128
Apêndice 7.	Átomos ^{15}N em excesso e N acumulado nas raízes derivada da uréia marcada com ^{15}N (Nrdu), por camada de solo, na maturação fisiológica do milho com aplicação de N-uréia na semeadura e em cobertura (CN1), na pré-semeadura e na semeadura (CN2), na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais.....	129
Apêndice 8.	Produção de matéria seca e N acumulado na maturação fisiológica do milho e N derivado da uréia marcada com ^{15}N (Npdu) na palhada, grãos e raízes, com aplicação de N-uréia na semeadura e em cobertura (CN1), na pré-semeadura e na semeadura (CN2), na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais.....	130

INTRODUÇÃO GERAL

A aveia preta, utilizada para cobertura do solo ou pastagem, ocupa a maior parte das áreas cultivadas no outono/inverno, no sul do Brasil. O cultivo de milho, sobre essas áreas, necessita de uma maior quantidade de adubação nitrogenada, em relação às áreas utilizadas no inverno com leguminosas ou nabo forrageiro. A COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO-RS/SC (1995) recomenda, na semeadura, no sistema plantio direto, de 20 a 30 kg ha⁻¹ de nitrogênio (N), quando o milho suceder a gramíneas, e de 10 a 15 kg ha⁻¹, quando o cultivo for feito sobre resíduos culturais de leguminosas. O restante do N é complementado com aplicação em cobertura.

A maior quantidade de N recomendada na semeadura, nas áreas de cultivo sobre a aveia preta, é atribuída a menor disponibilidade de N mineral, justificada pela maior imobilização deste nutriente pelos microrganismos do solo, atuantes na decomposição dos resíduos culturais, tanto da parte aérea como do sistema radicular da gramínea.

A possibilidade de antecipar a adubação nitrogenada de cobertura do milho para a pré-semeadura tem sido avaliada pela pesquisa (SÁ, 1996; DIEKOW, 2000; BASSO & CERETTA, 2000; PÖTKER & WIETHÖLTER, 2000; CANTARELLA et al., 2003; DA ROS et al., 2003). Essa tentativa de antecipar a adubação nitrogenada é fundamentada na hipótese de que a aplicação de N na fase inicial de decomposição da fração carbonada dos resíduos culturais da aveia estimula a imobilização microbiana de N e que parte desse N será liberada posteriormente, via remineralização, aumentando a sincronia com a demanda nitrogenada do milho em sucessão (SÁ, 1996).

Os resultados dessas pesquisas indicam que as produtividades de grãos, com a antecipação da adubação nitrogenada de cobertura para a pré-semeadura, em anos com precipitação pluviométrica normal ou abaixo da média, foram equivalentes às aquelas obtidas com o parcelamento da

dose em duas épocas, sendo 1/3 na semeadura e 2/3 em cobertura, conforme recomendada atualmente pela pesquisa. Em anos chuvosos, o crescimento do milho é prejudicado quando a aplicação do N é em pré-semeadura, em relação à aplicação parcelada, indicando que as perdas de N, via lixiviação de nitrato, são favorecidas e podem contribuir com a poluição ambiental (DIEKOW, 2000; BASSO & CERETTA, 2000; PÖTKER & WIETHÖLTER, 2000; CANTARELLA et al., 2003).

Um ponto comum, nos trabalhos conduzidos, para avaliar a eficiência da aplicação de N, após o manejo da aveia, em pré-semeadura do milho, é a ênfase dada à análise de aspectos relativos à cultura do milho como o acúmulo de N e a produção de matéria seca e de grãos, em detrimento aos aspectos ligados ao solo, como as biotransformações do carbono (C) e do N. Considerando a complexidade do ciclo do N e a conexão estreita entre N e C no solo, é necessário avaliar simultaneamente a dinâmica desses dois elementos, procurando responder às questões: Qual o efeito dos resíduos na imobilização de N, no deslocamento de nitrato e na volatilização de amônia? Qual o efeito da aplicação de N sobre os resíduos culturais de aveia, em diferentes épocas, na taxa de emissão de C-CO₂ para a atmosfera? É possível quantificar a magnitude da imobilização e da remineralização de N, bem como a dinâmica desses dois processos com a aplicação de N em pré-semeadura do milho? Qual o impacto da aplicação de N, na pré-semeadura, nas perdas de nitrato por lixiviação?

A resposta a essas questões é fundamental, a fim de compatibilizar a eficiência da adubação nitrogenada no milho, no sistema plantio direto, com a manutenção da qualidade ambiental. Para isso, foi conduzido um experimento a campo, para avaliar o efeito dos resíduos culturais e da época de aplicação da adubação nitrogenada, na quantidade de N imobilizado, no deslocamento de N no perfil do solo e no aproveitamento de N pelo milho. Também foram avaliados os efeitos dos resíduos culturais na volatilização de amônia e da aplicação da adubação nitrogenada sobre a decomposição dos resíduos culturais da aveia.

HIPÓTESES

No sistema plantio direto, o contato entre o C orgânico dos resíduos culturais da aveia e os microrganismos do solo é limitado e, por isso, a aplicação da adubação nitrogenada sobre os resíduos culturais não afeta a imobilização microbiana de N nem o deslocamento de nitrato.

A aplicação da adubação nitrogenada sobre os resíduos culturais da aveia, no sistema plantio direto, não aumenta a sua decomposição, em função da baixa quantidade de C orgânico mineralizável.

A cobertura do solo proporcionada pelos resíduos culturais, no sistema plantio direto, mantém maior umidade no solo, a qual reduz a volatilização de amônia.

OBJETIVOS

Geral

- Avaliar os fluxos de C e de N, na sucessão aveia/milho, enfatizando a emissão de C-CO₂ para a atmosfera, a imobilização microbiana de N, a volatilização de amônia, o deslocamento de nitrato e a absorção de N pelo milho.

Específicos

- Avaliar o efeito da adubação nitrogenada aplicada em diferentes épocas no milho sobre a decomposição dos resíduos culturais da aveia.
- Quantificar o efeito dos resíduos culturais na imobilização microbiana de N, com aplicação de adubação nitrogenada, em diferentes épocas.

- Avaliar a distribuição do nitrato e do N derivado da adubação nitrogenada no perfil do solo, durante a decomposição dos resíduos culturais da aveia.
- Avaliar o efeito dos resíduos culturais na volatilização de amônia, com aplicação de N-uréia na superfície e sem incorporação ao solo.
- Avaliar a eficiência de aproveitamento do N da adubação nitrogenada, aplicada na forma de uréia, pelo milho cultivado em sucessão à aveia.
- Quantificar o balanço de N, derivado da adubação nitrogenada, no sistema solo-planta.

MATERIAL E MÉTODOS GERAL

Localização e caracterização da área experimental

O experimento foi conduzido a campo, durante o ano agrícola 2002/2003, na área experimental do Departamento de Solos, da Universidade Federal de Santa Maria (RS), localizada a 29° 45' Latitude Sul , Longitude 53° 42' W GrW e altitude de 95 m. O clima dessa região, segundo a classificação de Koeppen, é subtropical úmido, tipo Cfa2.

O solo é classificado como um Argissolo Vermelho distrófico arênico (EMBRAPA, 1999), Hapludalf (USA, 1994), com textura superficial franco arenosa, pertencente à Unidade de Mapeamento São Pedro (BRASIL, 1973). Anteriormente à instalação do experimento, a área foi cultivada no sistema plantio direto, com a sucessão aveia/soja, nos anos de 1996 e 1997 e com a sucessão aveia + ervilhaca/milho nos anos de 1998 a 2001. Na instalação do experimento, em 2002, na camada de zero a 10 cm, o solo apresentou as seguintes características: 200 g kg⁻¹ de argila; pH em água de 5,0; 16 mg L⁻¹ de P; 60 mg L⁻¹ de K; 0,1 cmol_c L⁻¹ de Al; 2,4 cmol_c L⁻¹ de Ca; 0,9 cmol_c L⁻¹ de Mg e 16 g kg⁻¹ de MO.

Delineamento experimental e tratamentos

O experimento foi conduzido no delineamento blocos ao acaso, com três repetições. Na avaliação da volatilização de amônia, os tratamentos foram distribuídos somente nas parcelas do bloco I, e os dados foram analisados conforme o delineamento inteiramente casualizado, com três repetições. Na avaliação da decomposição dos resíduos culturais da aveia, os tratamentos foram distribuídos em unidades experimentais, em anexo ao experimento, e os resultados foram analisados conforme o delineamento inteiramente casualizado, com três repetições.

O experimento foi conduzido na presença de resíduos culturais de aveia (CR) e na ausência deles (SR), com aplicação (CN) ou não de N (SN), em duas diferentes épocas na cultura do milho, compondo os seguintes tratamentos: 1) sem resíduos culturais e sem N (SRSN); 2) sem resíduos culturais e com N na semeadura e em cobertura (SRCN1); 3) com resíduos culturais e sem N (CRSN); 4) com resíduos culturais e com N na semeadura e em cobertura (CRCN1) e 5) com resíduos culturais e com N na pré-semeadura e na semeadura (CRCN2).

A dose de N utilizada, em cada época, foi de 50 kg ha^{-1} de N, na forma de uréia, totalizando 100 kg ha^{-1} de N, nos tratamentos com aplicação de N. O N-uréia, na pré-semeadura, foi aplicado imediatamente após o manejo da aveia. Na semeadura, o N-uréia foi aplicado imediatamente após a semeadura do milho, que ocorreu aos 24 dias do manejo da aveia (14/11/02). A aplicação do N-uréia em cobertura foi feita aos 58 dias do manejo da aveia ou 34 dias da semeadura do milho (estádio de 4 a 5 folhas). Em todas as épocas, o N-uréia foi aplicado a lanço, sobre os resíduos culturais da aveia e sem incorporação ao solo. Nos tratamentos sem resíduos culturais, as plantas invasoras foram eliminadas das parcelas com o uso de glifosato.

No interior de cada parcela dos tratamentos com resíduos culturais (CRCN1 e CRCN2), foram demarcadas duas microparcelsas (A e B), de 1,30 m x 1,80 m (2,34 m²). Em cada microparcelsa, foi aplicado N-uréia marcado com ¹⁵N e N-uréia não marcado, de forma alternada nas duas épocas de aplicação (Tabela 1). Esse procedimento foi realizado para avaliar o efeito individual de cada época de aplicação de N-uréia marcado com ¹⁵N, e o efeito combinado, para cada tratamento, das duas épocas de aplicação. No tratamento sem resíduos culturais, foi demarcada apenas uma microparcelsa, onde o ¹⁵N-uréia foi aplicado na sementeira e o ¹⁴N-uréia foi aplicado em cobertura. Em todas as microparcelsas, o N foi aplicado na forma de uréia (46,65% de N), enriquecida com 2,80 % de átomos de ¹⁵N em excesso. A distribuição das microparcelsas dentro de cada tratamento é mostrada na figura 1.

Tabela 1. Distribuição do N-uréia marcado (¹⁵N) e não marcado (¹⁴N), em cada microparcelsa, nos diferentes tratamentos

Tratamento	Microparcelsa	Épocas de aplicação do N-uréia		
		Pré-semeadura	Sementeira	Cobertura
SRCN1	A	---	¹⁵ N	¹⁴ N
CRCN1	A	---	¹⁵ N	¹⁴ N
	B	---	¹⁴ N	¹⁵ N
CRCN2	A	¹⁵ N	¹⁴ N	---
	B	¹⁴ N	¹⁵ N	---

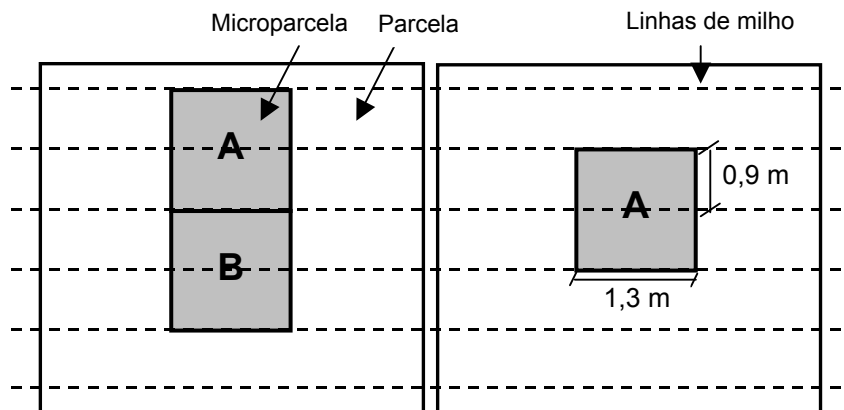


Figura 1. Esquema da distribuição das microparcelas (A e B) nos tratamentos com resíduos culturais (CRCN1 e CRCN2) e da microparcela (A) no tratamento sem resíduos culturais (SRCN1). Área da microparcela = 1,30 x 1,80 m (2,34 m²). Espaçamento entre linhas = 0,9 m.

Implantação e manejo das culturas de aveia preta e milho

A aveia foi semeada em linha, em 25/05/02, e adubada com 200 kg ha⁻¹ da fórmula 5-20-20. O manejo da aveia foi realizado com rolo faca em 15/10/02.

A semeadura do milho (híbrido Pioneer 30F33) foi realizada 24 dias após o manejo da aveia, com uma semeadora adubadora para plantio direto, equipada com mecanismo tipo facão para a distribuição do adubo e duplo disco defasado para as sementes. O espaçamento entre linhas foi de 0,90 m, perfazendo uma população final de aproximadamente 58.000 plantas ha⁻¹. A quantidade de fósforo e potássio, utilizada na semeadura, foi estabelecida com base na análise química do solo (COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC, 1995).

Durante o ciclo da cultura do milho, foram realizadas irrigações suplementares, através de pivô central. Na figura 2, estão indicadas a

distribuição e a quantidade d'água adicionada ao experimento, através das chuvas e das irrigações.

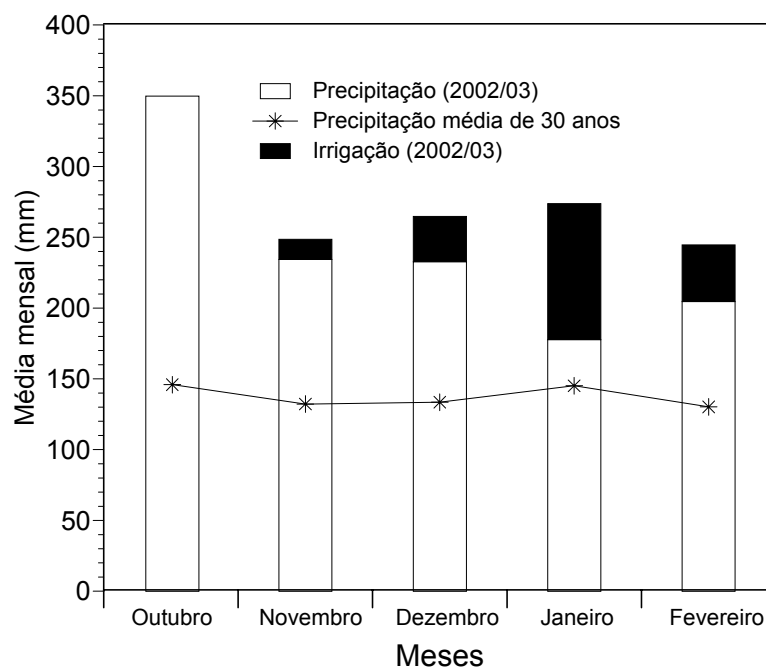


Figura 2. Precipitação e irrigação média mensal (outubro/02 a fevereiro/03) e precipitação média dos últimos 30 anos. Os dados de precipitação foram obtidos na Estação Meteorológica do Departamento de Fitotecnia da UFSM.

Análise estatística dos resultados

Os dados foram submetidos à análise da variância e as médias de tratamentos, comparadas pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade de erro.

1. Capítulo I - DINÂMICA DO CARBONO E DO NITROGÊNIO COM O USO DE URÉIA, NA SUCESSÃO AVEIA PRETA/MILHO, NO SISTEMA PLANTIO DIRETO: I. Decomposição dos resíduos culturais da aveia

1.1. RESUMO

A decomposição dos resíduos culturais é afetada pela sua composição bioquímica e pela relação C/N. Quando ocorre deficiência de N nos resíduos culturais, em relação à quantidade de C orgânico mineralizável, a adição de N, via fertilizante, pode aumentar a sua decomposição, se o N for incorporado ao solo junto com os resíduos culturais. No sistema plantio direto, em que o contato do C dos resíduos culturais, dispostos na superfície do solo, com os microrganismos decompositores, é limitado, é provável que adubação nitrogenada não tenha efeito na decomposição dos resíduos culturais. Com o objetivo de avaliar a decomposição dos resíduos culturais da aveia, com ênfase aos fluxos de C-CO₂ e o C na biomassa microbiana, com aplicação de N no milho, em diferentes épocas, conduziu-se um experimento em 2002/03, na UFSM (RS), em um Argissolo Vermelho Distrófico arênico. Os tratamentos foram: 1) sem resíduos culturais e sem N (SRSN); 2) sem resíduos culturais e com N na semeadura e em cobertura (SRCN1); 3) com resíduos culturais e sem N (CRSN); 4) com resíduos culturais e com N na semeadura e em cobertura (CRCN1) e 5) com resíduos culturais e com N na pré-semeadura e na semeadura (CRCN2). O N foi aplicado na forma de uréia, nas doses de 50 kg ha⁻¹, em cada época, totalizando 100 kg ha⁻¹, a lançar sobre os resíduos culturais da aveia. A emissão de C-CO₂ para a atmosfera foi determinada continuamente, durante 157 dias após o manejo da aveia, em câmaras de medição de CO₂, construídas a partir de cilindros de cloro polivinil (PVC). O C da biomassa microbiana foi

determinado pelo método da irradiação/extração, em sete épocas, após o manejo da aveia, na camada de solo de zero a 10 cm. A decomposição dos resíduos culturais foi avaliada no final do experimento, somando-se a quantidade acumulada de C-CO₂ e o C na biomassa microbiana. O N-uréia, aplicado sobre os resíduos culturais da aveia, na pré-semeadura do milho, aumentou os fluxos de C-CO₂ na primeira semana após a sua aplicação, em relação à ausência da adubação nitrogenada. Nas aplicações de N-uréia, na semeadura e em cobertura, houve diminuição dos fluxos de C-CO₂ nas primeiras três semanas da sua aplicação. O efeito da aplicação de N-uréia nos fluxos de C-CO₂ não teve relação com quantidade de C incorporada à biomassa microbiana. A aplicação de N-uréia sobre os resíduos culturais de aveia, dispostos na superfície do solo, no sistema plantio direto, não aumentou a sua decomposição.

1.2. INTRODUÇÃO

Os resíduos culturais, adicionados ao solo, são decompostos por microrganismos. No processo de decomposição, os microrganismos atuam como transformadores, realizando a quebra dos polímeros orgânicos, através de enzimas extracelulares, em compostos orgânicos solúveis, os quais são absorvidos pelas células microbianas. O C orgânico presente nos compostos é transformado em biomassa microbiana e energia e também mineralizado, em condições aeróbicas, na forma de CO₂ (MOREIRA & SIQUEIRA, 2002).

A taxa de decomposição dos resíduos culturais está relacionada com as suas características bioquímicas e com a relação C/N. Muitos trabalhos têm mostrado que os resíduos culturais de baixa relação C/N decompõem-se mais rápido que os de relação C/N alta (REINERTSEN et al., 1984; DA ROS, 1993; TRINSOUTROT et al., 2000a; GIACOMINI, 2001). A menor decomposição dos resíduos de alta relação C/N tem sido

atribuída à deficiência de N e à presença de constituintes recalcitrantes. Os microrganismos decompositores possuem menor relação C/N do que os resíduos culturais. Dessa forma, o N é reconhecido como um fator limitante para o crescimento e para atividade microbiana durante o processo de decomposição.

Estudos mostram, principalmente em condições de laboratório e com a incorporação dos resíduos culturais ao solo, que a adição de N aumenta a emissão de C-CO₂ quando o N é limitante para a demanda dos microrganismos, em relação à quantidade de C orgânico mineralizável (RECOUS et al., 1999). Isso normalmente ocorre na fase inicial de decomposição dos resíduos culturais, com alta relação C/N e com alto conteúdo de compostos orgânicos facilmente mineralizáveis (RECOUS et al., 1995; MARQUES et al., 2000).

Por outro lado, em condições de campo, quando os resíduos culturais, com alta relação C/N, permanecem na superfície do solo, a decomposição não é alterada com a aplicação de N (CERETTA et al., 2002a e 2002b). Isso se deve ao contido limitado do C orgânico dos resíduos culturais com os microrganismos do solo. Nessas condições, informações sobre fluxos de C-CO₂ para a atmosfera e C na biomassa microbiana devem ser acrescidas para o melhor entendimento da dinâmica do C e do N no sistema plantio direto. A biomassa microbiana representa o compartimento central do ciclo do C e do N no solo e, de acordo com as condições edafoclimáticas e da composição dos resíduos culturais, pode funcionar como reserva ou como dreno desses elementos (PAUL & CLARK, 1996).

Este trabalho teve por objetivo avaliar a decomposição dos resíduos culturais da aveia, dando ênfase à emissão de C-CO₂ para a atmosfera e ao C na biomassa microbiana.

1.3. MATERIAL E MÉTODOS

1.3.1. Avaliação da produção de matéria seca e caracterização química dos resíduos culturais

A produção de matéria seca e a caracterização química dos resíduos culturais da parte aérea e das raízes da aveia foram realizadas no estádio de grão leitoso. Foram coletados, aleatoriamente, cinco pontos de 0,5 m² na área experimental e determinada a produção de matéria seca da parte aérea, após a secagem em estufa a 65°C, até massa constante. Na mesma área de coleta de plantas da parte aérea da aveia, foi coletada uma camada de solo de zero a 30 cm de profundidade e determinada a produção de matéria seca das raízes, que foram separadas do solo com auxílio de uma peneira de 2 mm e jatos de água. Após, foram secas em estufa a 65°C, até massa constante.

No material, seco e moído, da parte aérea e das raízes, determinou-se a concentração de C orgânico e N total (TEDESCO et al., 1995). Determinou-se também a fração solúvel em água fria (21°C) e a sua concentração em C orgânico, N total e N mineral. Para a extração da fração solúvel, uma amostra de 0,5 g de material foi adicionada em 50 ml de água destilada, agitando-se a mistura mecanicamente durante 30 minutos (AITA, 1996). Após a agitação, o material foi filtrado em filtro Whatman n° 42. Em uma alíquota de 5 ml de filtrado, foram adicionados 5 ml de dicromato de potássio ($K_2Cr_2O_7$ 0,208 mol L⁻¹) e 10 ml de ácido sulfúrico (H_2SO_4 18 mol L⁻¹). Utilizou-se calor externo, e o excesso de dicromato foi titulado com sulfato ferroso ($FeSO_4 \cdot 7H_2O$ 0,5 mol L⁻¹) (TEDESCO et al., 1995).

A quantificação da concentração do N total solúvel em água foi realizada pela digestão de 5 ml de filtrado e posterior destilação em destilador de arraste de vapor semi-micro-Kjeldahl (TEDESCO et al., 1995). A concentração do N mineral solúvel em água foi determinada a partir da destilação de uma alíquota de 10 ml de filtrado, após a adição

simultânea de 0,2 g de MgO e 0,2 g de Liga Devarda (BRENNER & MULVANEY, 1982). As principais características dos resíduos culturais de aveia são mostradas na tabela 2.

Tabela 2. Produção de matéria seca e principais características químicas da parte aérea e das raízes da aveia

Características	Parte aérea	Raízes	Total
Materia seca (kg ha ⁻¹)	4.711	1.480	6.191
C orgânico (%)	41,6	33,1	---
N total (%)	1,2	0,9	---
C orgânico (kg ha ⁻¹)	1.960	490	2.450
N total (kg ha ⁻¹)	55	13	67
Relação C/N	36	38	---
C orgânico solúvel (kg ha ⁻¹)	344	nd ⁽¹⁾	---
N total solúvel (kg ha ⁻¹)	30,5	nd	---
Relação C/N (fração solúvel)	11,3	nd	---
N mineral solúvel (kg ha ⁻¹)	4,6	nd	---
% do C total que é solúvel	17,5	nd	---
% do N total que é solúvel	55,5	nd	---

⁽¹⁾ nd: não determinado.

1.3.2. Medição da emissão de C-CO₂ para a atmosfera

A quantidade de C emitido para a atmosfera, na forma de C-CO₂, foi determinada em câmaras de medição de CO₂, similares àquela descrita por AITA (1996) (Figura 3). Elas foram construídas a partir de cilindros de cloro polivinil (PVC), com 27 cm de altura e 30 cm de diâmetro. Na parte interna (a 15cm da parte superior), foi fixado um suporte em ferro, na forma de “X”, para apoiar o recipiente contendo a solução receptora (NaOH) do CO₂. A parte superior do cilindro foi revestida com uma

borracha, para acomodar a tampa e permitir a vedação completa do sistema, evitando trocas gasosas com a atmosfera externa. A tampa foi construída com chapa de zinco galvanizado e fixada ao cilindro de PVC por meio de quatro parafusos externos, distribuídos simetricamente em sua circunferência. A tampa foi recoberta por uma camada de isopor de 1,5 cm de espessura, para evitar o aquecimento excessivo da tampa pelo sol, o que poderia provocar variações bruscas na temperatura no interior da câmara.



Figura 3. Vista das câmaras estáticas da medição de emissão de C-CO₂.

Após a retirada da parte aérea da aveia da superfície do solo nos tratamentos com resíduos culturais, as câmaras foram inseridas no solo a uma profundidade de 5 cm. No interior das câmaras dos tratamentos com resíduos culturais, foi adicionada a mesma quantidade de matéria seca da parte aérea da aveia, equivalente à produção média de matéria seca da aveia da área experimental (4.711 kg ha⁻¹). Nos tratamentos sem resíduos

culturais, as câmaras foram instaladas em locais onde não foi cultivada aveia no outono/inverno.

A emissão de CO₂ foi determinada continuamente, durante 157 dias após o manejo da aveia. Nos primeiros 22 dias, a determinação da emissão de CO₂ foi feita diariamente e, a partir daí, a intervalos de aproximadamente dois dias.

O CO₂ emitido foi capturado por uma solução de NaOH (1 mol L⁻¹) e o excesso de NaOH titulado com uma solução HCl (1 mol L⁻¹) (STOTZKY, 1956). Em cada repetição, a emissão de CO₂ foi avaliada alternadamente em dois cilindros a fim de permitir a renovação da atmosfera interna das câmaras. Os valores de CO₂ emitidos no interior dos cilindros em cada tratamento foram transformados em C emitido na forma de CO₂ (C-CO₂) e calculada a mineralização do C dos resíduos culturais pela equação:

$$M (\%) = 100 (A - B)/C_{ad} \quad [1]$$

onde: M = mineralização do C orgânico dos resíduos culturais, em percentual (%); A = quantidade de C-CO₂ emitido no tratamento com resíduos culturais, em kg ha⁻¹; B = quantidade de C-CO₂ emitido no tratamento sem resíduos culturais, em kg ha⁻¹ e C_{ad} = quantidade de C orgânico adicionado pela parte aérea e raízes da aveia, em kg ha⁻¹.

1.3.3. Estimativa da decomposição dos resíduos culturais

A decomposição dos resíduos culturais foi estimada somando-se a quantidade acumulada de C-CO₂ emitida para a atmosfera, no período de 157 dias, e a quantidade de C da biomassa microbiana. A decomposição dos resíduos culturais também foi estimada pela variação das quantidades de C orgânico e de matéria seca presentes nos resíduos culturais de aveia, entre o início e o final do experimento.

Os resíduos culturais remanescentes na superfície do solo, ao final do experimento, foram retirados do interior de cada cilindro, onde foi medida a emissão de C-CO₂. Os resíduos culturais foram separados do solo com auxílio de peneiras e de jatos de água. A matéria seca dos resíduos culturais foi determinada após secagem em estufa a 65°C, até massa constante. Nos resíduos culturais remanescentes, secos e moídos, foi determinada a concentração em C orgânico (TEDESCO et al., 1995).

A decomposição dos resíduos culturais foi calculada mediante a equação:

$$D (\%) = 100 * (Q_{ad} - Q_{re})/Q_{ad} \quad [2]$$

onde: D = decomposição dos resíduos culturais, em percentual (%); Q_{ad} = quantidade de matéria seca ou de C orgânico adicionados pela parte aérea da aveia, em kg ha⁻¹ e Q_{re} = quantidade de matéria seca ou de C orgânico remanescentes na superfície do solo, em kg ha⁻¹.

Nos resíduos culturais remanescentes, foram determinados os teores de C orgânico e N total e, na sua fração solúvel em água fria (21°C), foram determinados os teores de C orgânico, N total e N mineral. Os procedimentos e metodologias foram os mesmos para os resíduos culturais da parte aérea e raízes da aveia.

1.3.4. Identificação das fases da decomposição dos resíduos culturais

Para identificar as diferentes fases da decomposição dos resíduos culturais e suas respectivas taxas de mineralização do C orgânico (k_i), foi construído um gráfico, plotando o tempo (dias) de cada avaliação com o logaritmo natural (Ln) do C orgânico remanescente, conforme descrito por AJWA & TABATABAI (1994). As fases de decomposição foram identificadas ajustando-se o declive dos segmentos da curva a uma equação linear, com maior coeficiente de correlação. Considerou-se como

a taxa de mineralização o valor do coeficiente angular da equação, que foi ajustada em cada fase de decomposição.

O segmento da curva com declive mais acentuado foi considerado como a fração do C orgânico mais facilmente mineralizável. O segmento da curva com menor declive foi considerado como a fração de C orgânico recalcitrante, e foi utilizado o valor do k_i desse segmento para calcular o tempo de meia vida ($t_{1/2}$) da fração de C orgânico mais resistente à decomposição.

1.3.5. Avaliação do C da biomassa microbiana

O C da biomassa microbiana (C_{BM}) foi avaliado em sete épocas, nos primeiros 85 dias após o manejo da aveia, na camada de zero a 10 cm. O calendário de coletas de solo é mostrado na tabela 3. Para a avaliação do C_{BM} , foi utilizado o método da irradiação/extração, adaptado de ISLAM & WEIL (1998a e 1988b), FERREIRA et al. (1999) e WANG et al. (2001).

As amostras de solo, compostas de seis subamostras, foram coletadas com o uso de uma espátula e acondicionadas em sacos plásticos, tendo sido colocadas em caixas de isopor com gelo e transportadas até o laboratório. No laboratório, foram homogeneizadas com o uso de peneira, com malha de 4 mm, retiradas as raízes e demais resíduos culturais, e imediatamente colocadas para irradiar no forno de microondas.

Amostras de 20 g de solo úmido, em triplicatas, foram pesadas em becker de vidro de 50 ml, vedadas com parafilme plástico e distribuídas na borda do prato giratório do microondas para irradiar. Foi utilizado o forno de microondas da marca Eletrolux, modelo ME27, 2450 MHz e potência de saída de 900W. Foram irradiadas, simultaneamente, 10 amostras durante 90 segundos, em potência máxima. A temperatura das amostras ficou entre 80° e 90°C. Depois de resfriadas em temperatura ambiente, as amostras foram recolocadas para irradiação durante mais 90

segundos. Nas amostras em que o parafilme plástico foi rompido durante a primeira irradiação, foram feitas novas vedações para evitar a perda de umidade.

Tabela 3. Calendário de coletas de solo para determinação do N mineral (N_{MI}), C na biomassa microbiana (C_{BM}) e N imobilizado (Nidu)

Data	Número de dias ⁽¹⁾			Coletas de solo		
	P	S	C	N_{MI}	C_{BM}	Nidu
15/10/02	0			nd	nd	nd
23/10/02	8			x	x	x
01/11/02	17			nd	x	x
08/11/02	24	0		x	x	x
14/11/02	30	6		x	x	x
26/11/02	42	18		nd	x	x
12/12/02	58	34	0	x	nd	x
18/12/02	64	40	6	x	x	x
08/01/03	85	61	27	x	x	x
21/03/03	157	133	99	nd	nd	x

⁽¹⁾ P: dias após o manejo da aveia; S: dias após a semeadura do milho; C: dias após a aplicação do N em cobertura. nd: não determinado

As amostras irradiadas e não irradiadas foram transferidas para frascos de 200 ml, contendo 80 ml de K_2SO_4 $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ e submetidas à agitação mecânica durante 30 minutos. Após 30 minutos de repouso para decantar o solo, procedeu-se a filtração do sobrenadante, com filtro Whatman nº 42.

Alíquotas de 20 ml do filtrado foram transferidas para tubos de digestão, em que foram adicionados 2 ml de $K_2Cr_2O_7$ $0,06667 \text{ mol L}^{-1}$ (0,40 N) e 10 ml de H_2SO_4 18 mol L^{-1} (36 N) antes de digerir as amostras por 30 minutos a 150°C (adaptado de VANCE et al., 1987). Após resfriamento, as amostras foram transferidas para erlenmeyer, adicionando-se gotas de indicador ferroin para titular o excesso de

$K_2Cr_2O_7$ com $FeSO_4 \cdot 7H_2O$ $0,033 \text{ mol L}^{-1}$ ($0,033 \text{ N}$) até a cor mudar de verde para vermelho, com luz transmitida (TEDESCO et al., 1995).

O C da biomassa microbiana foi calculado pela equação:

$$C_{BM} = (C_i - C_n)/K_c \quad [3]$$

onde: C_{BM} = C na biomassa microbiana, expresso em kg ha^{-1} de solo seco; C_i = quantidade de C da amostra irradiada, em kg ha^{-1} ; C_n = quantidade de C da amostra não irradiada, em kg ha^{-1} e K_c = fração do C da biomassa microbiana extraída pelo método irradiação-extração. O valor de K_c foi de 0,33, o mesmo utilizado para a determinação do C da biomassa microbiana extraída pelo método fumigação-extração (SPARLING & WEST, 1988).

1.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

1.4.1. Fluxos de C-CO₂ para a atmosfera

Os fluxos de C-CO₂ para a atmosfera diferiram entre os tratamentos com e sem resíduos culturais (Figura 4). Nos tratamentos com resíduos culturais, os fluxos de C-CO₂ foram maiores do que nos tratamentos sem resíduos culturais, principalmente no início da decomposição, e diminuíram gradativamente com o passar do tempo.

As diferenças nos fluxos de C-CO₂ entre os tratamentos com e sem resíduos culturais estão relacionadas com a disponibilidade de C orgânico (CHANTIGNY et al., 2001; CHIAPINOTO, 2003), já que foram adicionados 2.450 kg ha^{-1} de C orgânico pelos resíduos culturais (parte aérea e raízes), enquanto que, nos tratamentos sem adição de resíduos culturais, a população microbiana teve apenas a matéria orgânica do solo como fonte de C e de energia.

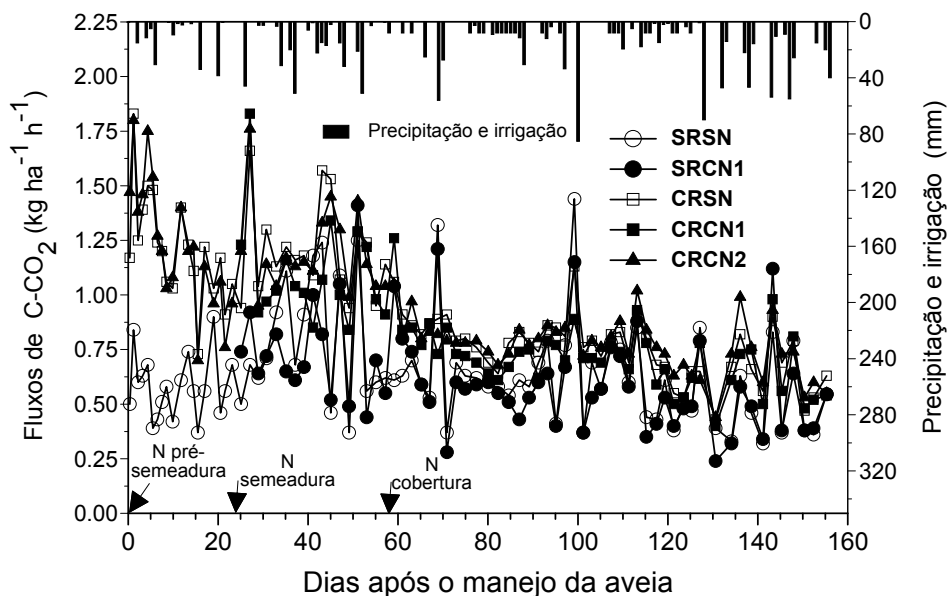


Figura 4. Fluxos de C-CO₂, durante 157 dias após o manejo da aveia, sem (SN) e com aplicação de N-uréia na semeadura e em cobertura (CN1), na pré-semeadura e na semeadura do milho (CN2), na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais.

As variações temporais nos fluxos de C-CO₂, dentro do mesmo tratamento podem estar relacionadas às variações na temperatura e, principalmente, na umidade do solo proveniente da precipitação pluviométrica (KOWALENKO et al., 1978; JENSEN et al., 1996; FRANK, 2002 e CHIMNER & COOPER, 2003). Em períodos sucessivos de chuvas e/ou com chuvas de intensidade elevada, é provável que a diminuição nos fluxos de C-CO₂ tenha sido resultante da diminuição da disponibilidade de O₂ comoceptor final de elétrons daqueles microrganismos aeróbicos, os quais são os mais ativos na oxidação dos compostos orgânicos (PAUL & CLARK, 1996). Em algumas datas, mesmo após um período sem chuvas, não houve relação direta entre precipitação e/ou irrigação com a emissão de C-CO₂. Isso se deve ao fato de que as câmaras estavam fechadas para medição do C-CO₂ no momento das chuvas. Para que o efeito das chuvas sobre a emissão de C-CO₂ seja detectado, é necessário iniciar a medição

do CO₂ imediatamente após a ocorrência da chuva, nas câmaras que estavam descobertas.

Para melhor visualizar o efeito do N-uréia nos fluxos de C-CO₂, foi calculada a diferença (Δ C-CO₂) entre as quantidades emitidas de C-CO₂ nos tratamentos com e sem N-uréia (Figura 5). Observa-se que o N-uréia proporcionou aumento nos fluxos de C-CO₂, quando a aplicação foi feita na pré-semeadura (Figura 5a) e diminuição, quando foi aplicado na semeadura e em cobertura (Figuras 5b e 5c).

Na pré-semeadura, os maiores fluxos de C-CO₂ com aplicação de N-uréia ocorreram durante a primeira semana após o manejo da aveia. A aplicação de N-uréia aumenta os fluxos de C-CO₂ quando o fornecimento de N pelos resíduos culturais ou pelo solo não é suficiente para atender à demanda do nutriente pelos microrganismos decompositores (RECOUS et al., 1999) e, normalmente, ocorre na fase inicial de decomposição dos resíduos culturais, principalmente nos cereais com alta relação C/N e com alto conteúdo de compostos facilmente degradáveis (RECOUS et al., 1995).

Em condições de laboratório, utilizando resíduos culturais de trigo, incorporados ao solo, por um período de 36 dias com diferentes concentrações de N, com e sem C orgânico solúvel, REINERTSEN et al. (1984) verificaram que a aplicação da adubação nitrogenada aumentou os fluxos de C-CO₂, somente nos resíduos culturais com menos de 1,13 % de N e com maior resposta na presença de C orgânico solúvel. Utilizando resíduos culturais de girassol e trigo com 1,16 e 0,64 % de N, respectivamente, também incorporados ao solo, por um período de 224 dias, CORBEELS et al. (2000) observaram resposta à aplicação de N somente nas duas primeiras semanas de incubação e apenas nos resíduos do trigo. A concentração de 1,2 % de N nos resíduos culturais da

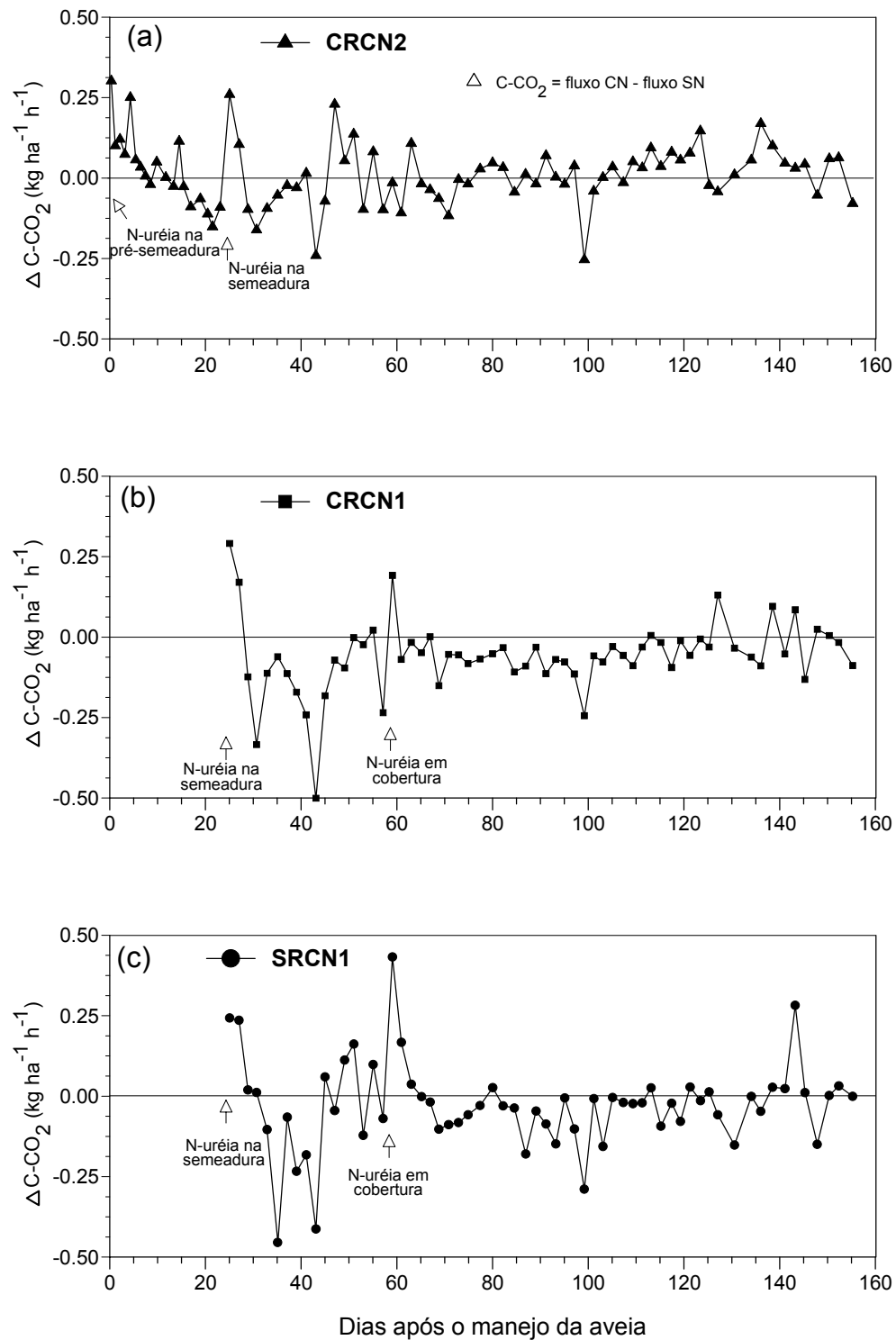


Figura 5. Diferença ($\Delta C-CO_2$) nos fluxos de $C-CO_2$ entre os tratamentos com e sem N-uréia, aplicada na semeadura e em cobertura (CN1), na pré-semeadura e na semeadura (CN2), na presença (CR) (a e b) e na ausência de resíduos culturais (SR) (c).

aveia (Tabela 2), indica que ela não foi capaz de suprir a necessidade de N dos microrganismos do solo na fase inicial de decomposição dos resíduos culturais, em relação à quantidade de C orgânico que foi mineralizado.

O aumento dos fluxos de C-CO₂ com a aplicação do N-uréia na pré-semeadura não alterou a quantidade de C na biomassa microbiana (Figura 6). Somente em condições de alta disponibilidade de C orgânico mineralizável, há uma correlação positiva entre a biomassa microbiana e a emissão de C-CO₂ com a aplicação de N, principalmente em condições controladas de laboratório e com incorporação dos resíduos culturais ao solo (ZAGAL & PERSSON, 1994).

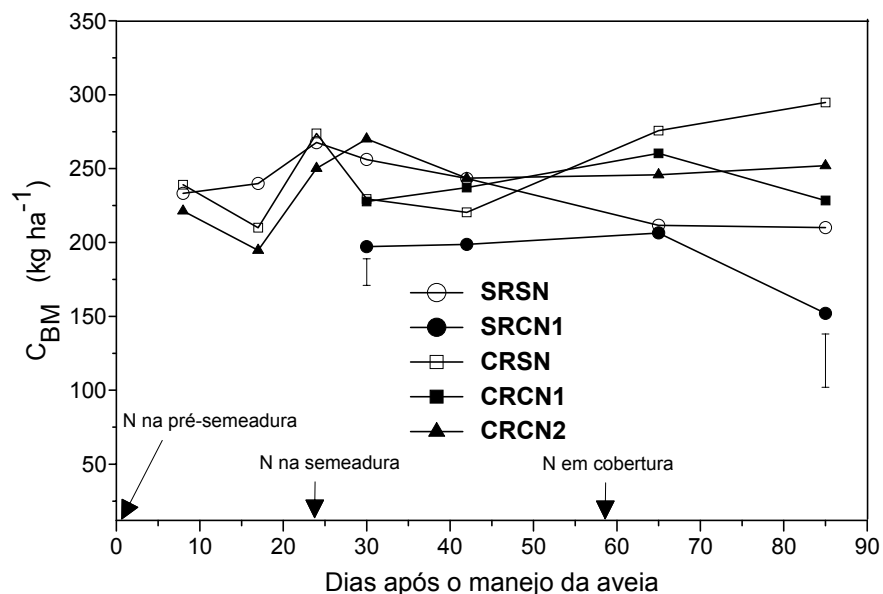


Figura 6. Carbono na biomassa microbiana (C_{BM}), nos primeiros 85 dias do manejo da aveia, sem (SN) e com aplicação de N-uréia na semeadura e em cobertura do milho (CN1), na pré-semeadura e na semeadura (CN2), na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais. As barras indicam a diferença mínima significativa (Tukey 5%).

No sistema plantio direto, a quantidade de C orgânico disponibilizado talvez não tenha sido suficiente para aumentar a emissão de C-CO₂ e o C na biomassa microbiana com a aplicação do N-uréia, mesmo logo após o manejo da aveia, quando a quantidade de C orgânico solúvel em água foi maior. É provável que a aplicação do N-uréia tenha alterado a proporção entre fungos e bactérias (CAMPBELL et al., 1991 & MARY et al., 1996; MOREIRA & SIQUEIRA, 2002), com aumento na população bacteriana (GARCIA & RICE, 1994; VARGAS, 2002). A diminuição da relação C/N da biomassa microbiana, aos 8 e 17 dias após a aplicação do N-uréia na pré-semeadura (Tabela 4), é um indicativo da mudança na comunidade microbiana do solo, pois, nos fungos, a relação C/N é próxima de 10 e, nas bactérias, é próxima de 4 (MOREIRA & SIQUEIRA, 2002).

Com o provável aumento da população bacteriana, provocado pela aplicação do N-uréia na pré-semeadura, o aumento na emissão de C-CO₂ para a atmosfera tenha ocorrido, já que, normalmente, as bactérias são menos eficientes do que os fungos em converter o C dos resíduos orgânicos em C na biomassa microbiana. Isso significa que, para a mesma quantidade de biomassa microbiana formada, as bactérias, em relação aos fungos, mineralizaram maior quantidade de C-CO₂. Esse menor rendimento de assimilação do C nas bactérias é mais evidente no início da decomposição, quando a disponibilidade de C solúvel em água é maior. Outro fator que pode justificar o maior fluxo de C-CO₂, logo após a aplicação de N-uréia na pré-semeadura, é a maior rapidez no consumo e mineralização do C orgânico solúvel, pelos microrganismos, na presença do N-uréia (BLAGODATSKIY et al., 1993).

Na semeadura e em cobertura, houve redução nos fluxos de C-CO₂ logo após a aplicação de N-uréia, principalmente durante as primeiras três semanas da aplicação do N-uréia, tanto na presença (Figura 5b) como na ausência de resíduos culturais (Figura 5c), exceção das primeiras duas avaliações subsequentes à aplicação de N-uréia. Nessas duas primeiras avaliações, a maior emissão de C-CO₂ deve-se à contribuição do C-CO₂

da uréia e não somente ao efeito da uréia sobre a mineralização do C orgânico do solo e/ou dos resíduos culturais. A uréia é rapidamente hidrolisada no solo pela enzima urease, ocorrendo a liberação de C-CO₂.

Tabela 4. Relação C/N da biomassa microbiana, nos primeiros 85 dias do manejo da aveia, sem (SN) e com aplicação de N-uréia na semeadura e em cobertura (CN1), na pré-semeadura e na semeadura (CN2), na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais

Tratamentos	Dias após o manejo da aveia						
	8	17	24	30	42	64	85
	Dias após a semeadura do milho						
	0	6	18	40	61	Dias após N em cobertura	
	0	6	27				
SRSN	10,6 a ⁽¹⁾	9,6 a	10,8	10,2 a	9,8	14,1	11,5
SRCN1				9,8 a	8,3	10,6	7,3
CRSN	10,1 a	9,1 a	10,9	9,7 a	6,1	9,2	9,4
CRCN1				8,7 ab	8,3	8,0	9,2
CRCN2	7,4 b	6,5 b	9,0	7,6 b	7,6	8,4	10,8
C.V. (%)	32,6	20,8	16,8	11,0	19,3	19,1	17,9

⁽¹⁾ Médias não seguidas pela mesma letra diferem pelo teste de Tukey, a 5% de probabilidade de erro.

Observa-se que as diminuições das emissões de C-CO₂ com a aplicação de N-uréia, na semeadura e em cobertura (Figuras 5b e 5c), não estão relacionadas com o aumento do C na biomassa microbiana (Figura 6). Isso contradiz os resultados obtidos por MUNEVAR & WOLLUN (1977) e SAMPAIO & SALCEDO (1982), nos quais a diminuição da emissão de C-CO₂ aumenta o C na biomassa microbiana. Provavelmente, em condições de baixa disponibilidade de C orgânico mineralizável, que ocorreu após a exaustão do C orgânico solúvel, nas aplicações de N-uréia na semeadura e em cobertura, o C-CO₂ que foi liberado para a atmosfera

resultou da decomposição e da reutilização do C da biomassa microbiana no processo de reciclagem. Nessa situação, o rendimento de assimilação do C pela biomassa microbiana do substrato reutilizado foi alto. Como resultado, a emissão de C-CO₂ foi menor em relação ao tratamento sem N-uréia (BLAGODATSKIY et al., 1993).

1.4.2. Decomposição dos resíduos culturais

A quantidade acumulada de C-CO₂ emitida para a atmosfera, tanto na presença como na ausência de resíduos culturais, não diferiu entre os tratamentos com e sem aplicação de N-uréia, independente da época de aplicação (Figura 7), apesar de terem ocorrido diferentes fluxos de C-CO₂ entre estes tratamentos logo após a aplicação do N-uréia (Figura 5).

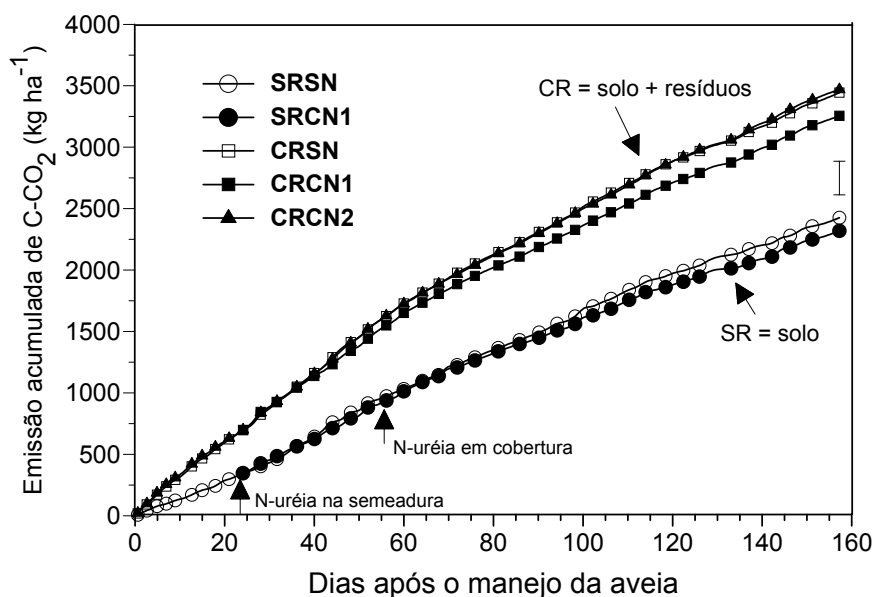


Figura 7. Emissão acumulada de C-CO₂ na ausência (SR) e na presença de resíduos culturais (CR), sem (SN) e com aplicação de N-uréia na semeadura e em cobertura (CN1), na pré-semeadura e na semeadura do milho (CN2). A barra vertical indica a diferença mínima significativa (Tukey 5%) entre as quantidades totais de C-CO₂ acumuladas.

Calculando-se a quantidade de C orgânico mineralizado proveniente dos resíduos culturais de aveia, por meio da diferença na quantidade de C-CO₂ emitida para a atmosfera entre os tratamentos com e sem resíduos culturais da figura 7, também não foi encontrando efeito do N-uréia (Figura 8). No final do período avaliado, a quantidade média de C orgânico mineralizado proveniente dos resíduos culturais foi de 970 kg ha⁻¹, equivalente a uma mineralização de 40 % dos 2.450 kg ha⁻¹ de C orgânico adicionados.

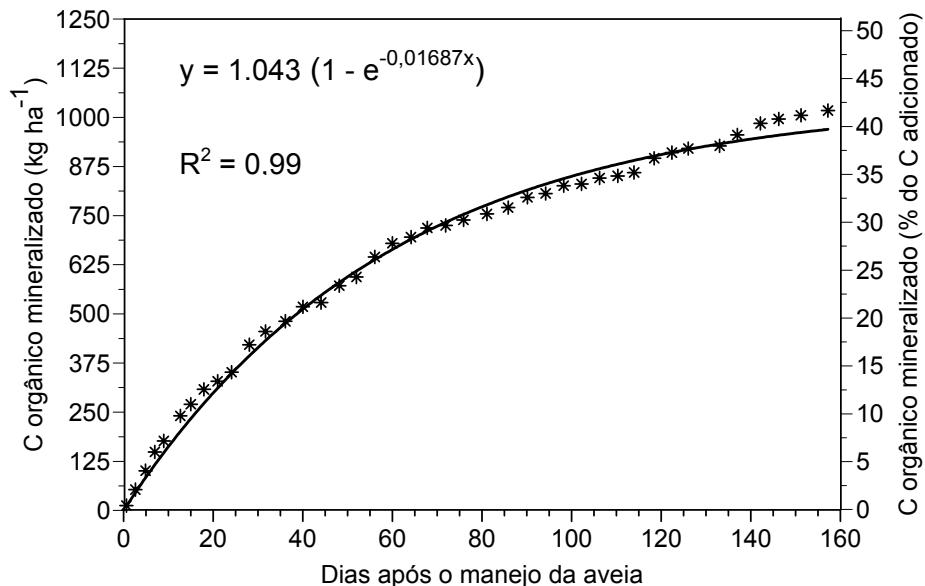


Figura 8. Mineralização do C orgânico dos resíduos culturais de aveia (parte aérea e raízes), nos primeiros 157 dias após o manejo. Média dos tratamentos com e sem N-uréia.

O percentual de mineralização do C orgânico dos resíduos culturais da aveia foi semelhante ao obtido por CHIAPINOTO (2003), utilizando quantidades próximas de matéria seca (parte aérea e raízes), porém com relação C/N maior de 44 na parte aérea e de 49 nas raízes. A menor relação C/N do presente trabalho, 36 na parte aérea e 38 nas raízes,

parece não ter favorecido a mineralização do C orgânico dos resíduos culturais. A relação C/N, como fator isolado, não permite caracterizar adequadamente a decomposição dos resíduos culturais (TRINSOUTROT et al., 2000a; GIACOMINI, 2001).

A decomposição dos resíduos culturais foi estimada somando-se a quantidade de C orgânico mineralizado na forma de C-CO₂ (Figura 8) e o C incorporado à biomassa microbiana (Figura 6). A quantidade média de C da biomassa microbiana, proveniente dos resíduos culturais foi 77 kg ha⁻¹, obtida por meio da diferença entre os tratamentos com e sem resíduos culturais na última avaliação do C da biomassa microbiana da figura 6. Somando-se este valor (77 kg ha⁻¹) à quantidade média de C orgânico mineralizado proveniente dos resíduos culturais (970 kg ha⁻¹) chega-se a 1.047 kg ha⁻¹, o que permite estimar em 43% a decomposição da fração carbonada dos resíduos culturais da aveia.

A decomposição dos resíduos culturais, após 157 dias do manejo da aveia, também foi estimada por meio da diferença entre a quantidade inicial e final de matéria seca e entre a quantidade inicial e final de C orgânico (Tabela 5). Não foi observada diferença na decomposição entre os tratamentos com e sem N-uréia, independente da época de aplicação do N-uréia, com valores médios de 41 %, quando estimada por meio da diferença entre a quantidade inicial e final de matéria seca, e de 64%, quando foi utilizada a diferença entre a quantidade inicial e final de C orgânico. CERETTA et al. (2002a e 2002b), medindo a matéria seca dos resíduos culturais da aveia, na superfície do solo, também não encontraram diferença na decomposição dos resíduos culturais, com e sem a aplicação de N-uréia, em diferentes épocas, sobre resíduos culturais de aveia, mesmo com a relação C/N variando de 37 a 48. Isto comprova a hipótese de que, no sistema plantio direto, a ausência de resposta à aplicação do N-uréia na decomposição dos resíduos culturais é devido ao limitado contato do C dos resíduos culturais com os microrganismos do solo, independente da relação C/N dos resíduos culturais.

Tabela 5. Decomposição dos resíduos culturais da aveia na superfície do solo (parte aérea), após 157 dias do manejo, utilizando a quantidade inicial e final de matéria seca (MS) e de C orgânico (CO)

Tratamentos	Adicionado (manejo da aveia)	Remanescente (após 157 dias)	Decomposição ⁽¹⁾ (%)
----- kg ha ⁻¹ -----			
Matéria seca da parte aérea (MS)			
CRSN	4.711	2.642 ^{ns}	44 ^{ns}
CRCN1	4.711	2.803	40
CRCN2	4.711	2.883	39
Média	---	2.776	41
C orgânico da parte aérea (CO)			
CRSN	1.960	672 ^{ns}	66 ^{ns}
CRCN1	1.960	713	64
CRCN2	1.960	733	63
Média	---	706	64

⁽¹⁾ Decomposição (%) = 100(MS ou CO adicionado – MS ou CO remanescente)/MS ou CO adicionado. ^{ns} Teste F não significativo a 5% de probabilidade de erro.

Na estimativa da decomposição, por meio da diferença entre a quantidade inicial e final de C orgânico, o valor pode ter sido superestimado, devido à dificuldade de recuperar todos as frações dos resíduos culturais remanescentes durante a coleta, principalmente as frações finas. A contaminação com solo nos resíduos culturais remanescentes, mesmo com auxílio de peneiras e de jatos de água para separá-los, também é um indicativo de que houve superestimação no valor da decomposição, pois a concentração de C orgânico nos resíduos culturais diminuiu de 41,6%, no manejo da aveia, para 25,4 %, no final do período.

Quando a decomposição foi estimada pela diferença de matéria seca, o valor pode ter sido subestimado em relação à quantificação utilizando o C orgânico, devido a maior massa de solo que permaneceu junto com os resíduos culturais, em relação à massa dos resíduos culturais que não foram recuperados durante a coleta. Uma das alternativas para corrigir o valor de decomposição seria a combustão do C orgânico da amostra. A diferença entre as amostras com e sem combustão eliminaria a massa de solo na amostra. No entanto, o valor da decomposição continuaria não sendo preciso, pois, durante a coleta não é possível recuperar todos os resíduos culturais, principalmente as frações finas, e também não é computado no cálculo da decomposição o C orgânico que foi incorporado à biomassa microbiana durante o processo de decomposição dos resíduos culturais da aveia.

A decomposição dos resíduos culturais de aveia, dispostos na superfície do solo, estimada pela variação nas quantidades iniciais e finais de matéria seca, foi próxima àquelas encontradas por GIACOMINI (2001) de 42 %, após 180 dias do manejo e AMADO et al. (2003) de 38 e 44 %, aos 110 e 125 dias após o manejo, respectivamente. Valores mais altos, próximos a 65 %, foram encontrados por DA ROS (1993) e CERETTA et al. (2002a e 2002b), após 120 dias do manejo da aveia.

1.4.3. Fases de decomposição dos resíduos culturais

Como não foi possível ajustar a quantidade de C orgânico mineralizado dos resíduos culturais da aveia a um modelo exponencial duplo (Figura 8), que possibilitasse quantificar a fração mais lábil e a fração mais recalcitrante do C orgânico e as suas respectivas taxas de mineralização do C orgânico, utilizou-se a metodologia de AJWA & TABATABAI (1994) para identificar as diferentes fases de decomposição dos resíduos culturais e as suas respectivas taxas de mineralização do C orgânico.

Foi construído um gráfico plotando o tempo (dias) de cada coleta com o logaritmo natural (Ln) do C orgânico remanescente. O C orgânico remanescente em cada coleta foi obtido por meio da diferença entre a quantidade de C orgânico adicionado no solo, no momento do manejo da aveia (parte aérea e raízes), e o C orgânico mineralizado da figura 8. As fases de decomposição e a estimativa das taxas de mineralização do C orgânico foram obtidas ajustando-se os segmentos da curva a uma equação linear (Figura 9).

Foram identificadas três fases na decomposição dos resíduos culturais (Figura 9). A primeira fase ocorreu nos primeiros 18 dias do manejo da aveia, com taxa de mineralização do C orgânico (k_1) de $0,0075 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$. A segunda fase ocorreu no período de 19 a 64 dias, com uma menor taxa de mineralização do C orgânico ($k_2 = 0,0044 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$). Na terceira fase, a taxa de mineralização do C orgânico (k_3) diminuiu para $0,0022 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ e ocorreu após 65 dias do manejo da aveia.

A decomposição dos resíduos culturais, normalmente, apresenta uma fase inicial rápida, correspondente à decomposição dos compostos mais lábeis, seguida de uma fase mais lenta em que são decompostos os constituintes mais recalcitrantes (COLLINS et al., 1990; DA ROS, 1993; TRINSOUTROT et al., 2000a e 2000b; GIACOMINI, 2001; CERETTA et al., 2002a). A maior quantidade de C orgânico presente na fração solúvel em água, da matéria seca, da parte aérea da aveia, no momento do manejo (344 kg ha^{-1}), em relação à quantidade de C orgânico solúvel, após 157 dias do manejo (46 kg ha^{-1}), deve ter contribuído para a maior taxa de mineralização do C orgânico na fase inicial de decomposição dos resíduos culturais da aveia. Nesta fase inicial, foi mineralizado 308 kg ha^{-1} de C orgânico, correspondendo a 32% do total de C orgânico mineralizado no período de 157 dias (970 kg ha^{-1}) e de 13% em relação à quantidade total de C orgânico adicionado no sistema pelos resíduos culturais da aveia (2.450 kg ha^{-1}).

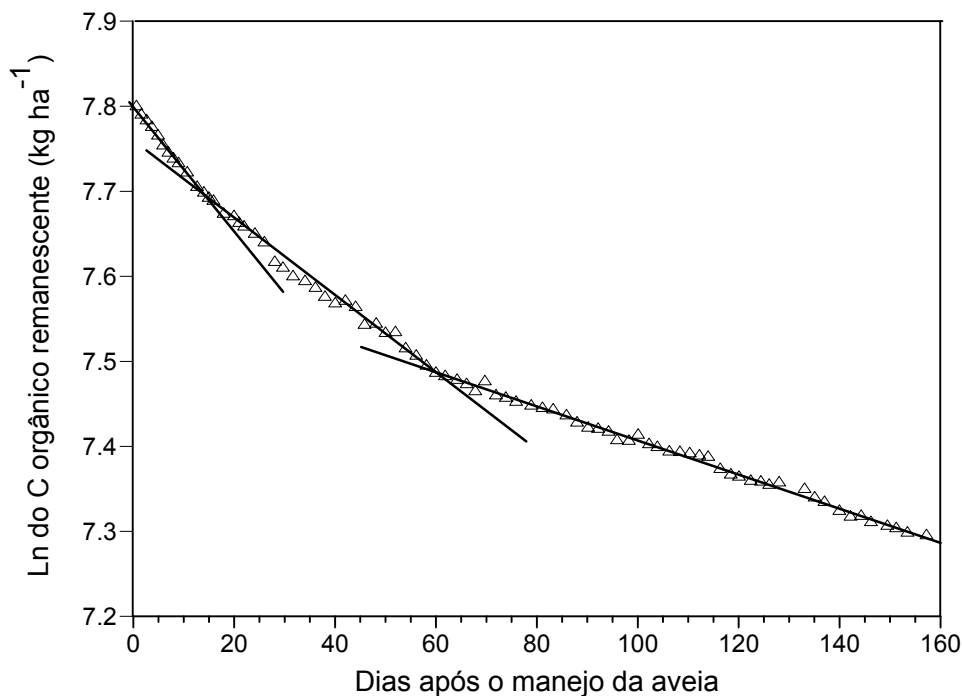


Figura 9. Estimativa da taxa de mineralização do C orgânico (k_i), nas diferentes fases de decomposição dos resíduos culturais, por meio do logaritmo natural do C orgânico remanescente. Média dos tratamentos com e sem N-uréia.

Considerando que, logo após o manejo da aveia, o contato entre o C orgânico dos resíduos culturais na superfície do solo e os microrganismos é limitado, é possível inferir que, na primeira fase de decomposição, os microrganismos utilizaram o C orgânico solúvel da parte aérea da aveia (344 kg ha^{-1}) e também outros compostos orgânicos facilmente degradáveis presentes na parte aérea e nas raízes da aveia. Isso porque foram mineralizados 308 kg ha^{-1} de C orgânico na forma de C-CO_2 na primeira fase de decomposição. Assumindo uma eficiência de assimilação do C de 50% (MOREIRA & SIQUEIRA, 2002), uma quantidade de C equivalente àquela mineralizada deveria ter sido incorporada à biomassa microbiana, totalizando uma quantidade de C maior do que aquela de C orgânico solúvel.

Na segunda fase, a taxa de mineralização do C orgânico foi menor do que a primeira, indicando que os organismos decompositores atacaram compostos carbonados de menor biodegradabilidade. A terceira fase representa o C mineralizável da fração recalcitrante dos resíduos culturais. O tempo de meia vida ($t_{1/2}$) para decompor esta fração foi de 315 dias. Valores próximos de tempo de meia vida foram obtidos por GIACOMINI (2001) em um consórcio de aveia e ervilhaca comum.

As fases de decomposição dos compostos orgânicos dos resíduos culturais refletiram a dinâmica das comunidades dos organismos heterotróficos no solo, os quais oxidaram, inicialmente, os compostos mais simples, havendo, com isso, rápido desprendimento de C-CO₂ dos resíduos culturais. A seguir, restaram compostos mais complexos, de difícil decomposição e, portanto, estabeleceu-se um metabolismo microbiano mais lento, evidenciado por menores taxas de emissão de C-CO₂ (ALEXANDER, 1977; CERRI & JENKINSON, 1981; MINHONI & CERRI, 1987; MINHONI et al., 1990).

A taxa de mineralização do C dos resíduos culturais da aveia, no sistema plantio direto, está relacionada com a quantidade de C orgânico mineralizável, principalmente do C orgânico solúvel em água. Assim, o contato do C orgânico dos resíduos culturais com o solo deve ter sido o fator que impediu o aumento da decomposição dos resíduos culturais pelos microrganismos heterotróficos do solo, quando a adubação nitrogenada foi aplicada. A ausência de resposta à aplicação da adubação nitrogenada, na decomposição dos resíduos culturais, também deve ter sido influenciada pela concentração de N na matéria seca da aveia, pois a sua concentração deve ter atendido à demanda de N dos microrganismos, em relação à quantidade de C orgânico mineralizável.

1.5. CONCLUSÃO

- A aplicação de N-uréia no milho, independente da época, não aumentou a decomposição dos resíduos culturais da aveia, apesar de proporcionar maiores fluxos de C-CO₂ na primeira semana da aplicação da adubação nitrogenada na pré-semeadura.

2. Capítulo II - DINÂMICA DO CARBONO E DO NITROGÊNIO COM O USO DE URÉIA, NA SUCESSÃO AVEIA PRETA/MILHO, NO SISTEMA PLANTIO DIRETO: II. Imobilização de N e evolução dos teores de N mineral no solo

2.1. RESUMO

A relação C/N dos resíduos culturais e sua quantidade de C mineralizável são os principais atributos que irão condicionar a intensidade do processo de imobilização/mineralização do N no solo. Os resíduos culturais de aveia caracterizam-se por apresentarem uma alta relação C/N e causam imobilização de N, quando são incorporados ao solo. No sistema plantio direto, em que os resíduos permanecem na superfície do solo, é preciso, portanto, determinar a intensidade desse processo, a fim de aumentar a eficiência da adubação nitrogenada. Com o objetivo de avaliar a imobilização de N, os teores de N mineral e o N da biomassa microbiana, com aplicações de N, em diferentes épocas, no milho, sobre os resíduos culturais da aveia, em área com seis anos no sistema plantio direto, conduziu-se um experimento em 2002/03, na UFSM (RS), em um Argissolo Vermelho distrófico arênico. Os tratamentos foram: 1) sem resíduos culturais e sem N (SRSN); 2) sem resíduos culturais e com N na semeadura e em cobertura (SRCN1); 3) com resíduos culturais e sem N (CRSN); 4) com resíduos culturais e com N na semeadura e em cobertura (CRCN1) e 5) com resíduos culturais e com N na pré-semeadura e na semeadura (CRCN2). O N foi aplicado, na forma de uréia, nas doses de 50 kg ha⁻¹ em cada época, totalizando 100 kg ha⁻¹, a lançar sobre os resíduos culturais da aveia. No centro das parcelas, foram demarcadas microparcelsas e aplicada uréia marcada com 2,8 % de átomos de ¹⁵N em excesso. O N mineral foi determinado nas camadas de zero a 10; 10 a 30;

30 a 60 e 60 a 90 cm, em amostras de solo coletadas fora da microparcela. O N imobilizado foi determinado na camada de zero a 10 cm por meio da quantificação do excesso de ^{15}N na fração orgânica do solo. O N na biomassa microbiana foi quantificado pelo método da irradiação/extração, sem discriminar o N proveniente da adubação nitrogenada e do solo. Os resíduos culturais aumentaram a imobilização de N nas aplicações de N-uréia na pré-semeadura e na semeadura. A quantidade de N imobilizado, no sistema plantio direto, atingiu 18,6 %, quando 50 kg ha^{-1} de N-uréia foi aplicada na pré-semeadura e 50 kg ha^{-1} na semeadura e, de 15,3 %, quando as mesmas doses de N-uréia foram aplicadas na semeadura e em cobertura. Houve correlação entre a quantidade de C mineralizado dos resíduos culturais e a imobilização de N, com valor de 20 mg de N imobilizado para cada grama de C mineralizado. Além da maior imobilização de N, os resíduos culturais, na superfície do solo, proporcionaram maior incorporação de N na biomassa microbiana e diminuíram o teor de N mineral no solo.

2.2. INTRODUÇÃO

Na decomposição dos resíduos culturais, os nutrientes presentes nos compostos orgânicos são absorvidos pelas células microbianas e posteriormente são liberados na forma mineral, no processo de mineralização. A quantidade de nutrientes que é mineralizada depende do balanço líquido entre a mineralização e a imobilização e está relacionada ao tipo de resíduo cultural. A imobilização é o processo inverso da mineralização, no qual os nutrientes do solo, na forma mineral, são absorvidos pelos microrganismos e transformados em formas orgânicas na célula microbiana (MOREIRA & SIQUEIRA, 2002).

O balanço líquido entre mineralização e imobilização é controlado pela quantidade de C orgânico mineralizável e a relação deste com a quantidade dos demais nutrientes presentes nos resíduos culturais ou no

solo. O N é o principal nutriente, cujos teores no solo dependem do balanço entre mineralização e imobilização. A adição de resíduos culturais, ricos em N, possibilita aumentar a quantidade de N mineral no solo. A baixa concentração deste nutriente nos resíduos culturais, em relação ao C orgânico mineralizável, causa a imobilização do N no solo (GIACOMINI, 2001 e DA ROS et al., 2003).

A imobilização microbiana do N do solo ocorre quando são adicionados resíduos de plantas cuja relação entre o C orgânico mineralizável e o N supera a relação C/N dos microrganismos. Assim, a relação C/N e a quantidade de C mineralizável são os principais atributos dos resíduos culturais que irão condicionar a intensidade do processo de imobilização de N no solo. A imobilização de N reduz a produção das culturas quando elas são implantadas sobre resíduos culturais pobres em N, principalmente nas não leguminosas, pois elas não têm a capacidade de fixar N_2 da atmosfera, em simbiose com rizóbios (DA ROS, 1993; BASSO & CERETTA, 2000; GIACOMINI, 2001 e AMADO et al., 2003).

No sistema plantio direto, tem sido observado que a presença de resíduos culturais na superfície do solo diminui o aproveitamento de nitrogênio aplicado como fertilizante pelos cereais (MUZILLI, 1983; KITUR et al., 1984) e esse menor aproveitamento pode estar relacionado com os processos de imobilização/mineralização. No entanto, existem informações conflitantes com relação à imobilização de N no sistema plantio direto. DIEKOW et al. (2000), trabalhando com colunas indeformadas de solo, em casa de vegetação, não verificaram imobilização de N, logo após a aplicação do fertilizante nitrogenado, sobre os resíduos culturais de aveia, dispostos na superfície do solo. Já LARA CABEZAS et al. (2000) e LARA CABEZAS (2001) encontraram, em experimentos a campo, variação na imobilização de N de 8 a 45 kg ha⁻¹.

A hipótese que fundamenta este trabalho é a de que, no sistema plantio direto, a quantidade de C orgânico mineralizável da aveia é pequena, devido ao contato limitado dos resíduos culturais com o solo. Portanto, as quantidades de N mineral no solo e de N imobilizado não

devem ser influenciadas pelos resíduos culturais. Com o objetivo de avaliar esses aspectos, com aplicação de N-uréia em diferentes épocas, na presença e na ausência de resíduos culturais, conduziu-se este trabalho.

2.3. MATERIAL E MÉTODOS

2.3.1. Determinação do N imobilizado na fração orgânica do solo

Três subamostras de solo foram coletadas em cada microparcela, com ^{15}N -uréia, em nove épocas, durante o ciclo da cultura do milho, na camada de zero a 10 cm. Elas foram reunidas em uma amostra composta, acondicionadas em sacos plásticos e transportadas até o laboratório, em caixas de isopor com gelo. No laboratório, cada amostra foi homogeneizada, com o uso de peneira, com malha de 4 mm, retirando-se as raízes e os resíduos culturais.

O N da fração orgânica do solo foi determinado, após a eliminação do N mineral, conforme metodologia adaptada de RECOUS et al. (1988). Em cada amostra, foram pesadas 15 g de solo úmido e colocadas em tubos de centrifuga de 100 ml. Após a adição de 60 ml de KCl (1 mol L^{-1}), procedeu-se à agitação mecânica dos tubos por 15 minutos e, em seguida, à centrifugação por 15 minutos a 3000 rpm. O sobrenadante foi descartado, repetindo-se o procedimento por três vezes. Esse procedimento foi realizado para eliminar todo o N mineral presente na amostra. A fração sedimentada, após a terceira extração/centrifugação, foi submetida à secagem em estufa a 60°C e posteriormente moída. Nas amostras secas e moídas, foram quantificados os teores de N total

(TEDESCO et al., 1995) e o excesso de átomos de ^{15}N (TRIVELIN et al., 1973) na EMBRAPA Agrobiologia (RJ).

A imobilização de N foi quantificada por meio da determinação do excesso de átomos de ^{15}N , do N total da fração orgânica do solo. A quantidade de N imobilizado pela fração orgânica do solo, derivado da uréia marcada com ^{15}N , foi calculada conforme a equação:

$$\text{Nidu} = R_o * \text{QN}_{\text{to}} \quad [4]$$

onde: Nidu = quantidade de N imobilizado pela fração orgânica do solo, derivado da uréia, em kg ha^{-1} ; R_o = relação entre o percentual de átomos de ^{15}N em excesso no N total da fração orgânica do solo e o percentual de átomos de ^{15}N em excesso na uréia e QN_{to} = quantidade de N total na fração orgânica do solo, em kg ha^{-1} .

2.3.2. Determinação do N da biomassa microbiana

O N da biomassa microbiana (N_{BM}) foi determinado nas mesmas épocas da avaliação do C na biomassa microbiana. Os procedimentos de coleta de solo, preparo das amostras, irradiação e filtragem estão descritos no Capítulo I.

Após irradiação e extração, alíquotas de 20 ml do filtrado foram transferidas para tubos de digestão, onde foram adicionados 0,2 g de Liga Devarda e 3 ml de H_2SO_4 (18 mol L^{-1}) para digestão das mesmas por 30 minutos, a 140°C . Esse pré-tratamento é recomendado por LIAO (1981) para recuperar o N-NO_3^- e N-NO_2^- da amostra. Após esfriar a temperatura ambiente, adicionou-se 0,7g de mistura de digestão ($\text{Na}_2\text{SO}_4 + \text{CuSO}_4 \cdot 5\text{H}_2\text{O}$), recolocado-se os tubos no bloco digestor, cuja temperatura foi mantida entre 160°C e 170°C , durante 30 minutos. A seguir, a temperatura foi elevada até 250°C , em aproximadamente 40 minutos, até

evaporar a água, quando a temperatura foi elevada a 350°C, durante 80 minutos, até completar a digestão.

A destilação foi realizada em destilador de arraste de vapor semi-micro-Kjeldahl (TEDESCO et al., 1995), após a adição de 15ml de NaOH (10 mol L⁻¹), utilizando-se toda a amostra digerida.

O N na biomassa microbiana foi calculado pela equação:

$$N_{BM} = (N_i - N_n)/K_N \quad [5]$$

onde: N_{BM} = N na biomassa microbiana, expresso em kg ha⁻¹ de solo seco; N_i = quantidade de N da amostra irradiada, em kg ha⁻¹; N_n = quantidade de N da amostra não irradiada, em kg ha⁻¹ e K_N = fração do N da biomassa microbiana extraída pelo método irradiação-extração. O valor do K_N foi de 0,54, o mesmo utilizado para determinação do N_{BM} extraído pelo método fumigação-extração (BROOKES et al., 1985).

2.3.3. Determinação do N mineral no solo

O N mineral do solo foi avaliado nas camadas de zero a 10; 10 a 30; 30 a 60 e 60 a 90 cm, em seis épocas: aos 8 e 23 dias da aplicação do N em pré-semeadura (manejo da aveia), aos 6 e 32 dias da aplicação do N na semeadura do milho e aos 6 e 27 dias da aplicação do N em cobertura. As coletas das amostras de solo foram realizadas nas parcelas com aplicação de N-uréia não marcado. O calendário de coletas de solo é mostrado na tabela 2 do Capítulo I.

O solo foi coletado por meio de um trado calador, em seis pontos aleatórios de cada parcela. Logo após a coleta, as amostras, compostas de seis subamostras por parcela, foram levadas ao laboratório e homogeneizadas e, submetidas à extração, para determinação da concentração do N mineral.

A extração do N mineral foi realizada pesando-se 25 g de solo úmido em frascos de vidro, contendo 100 ml de KCl 1 mol L⁻¹. Após agitação, por 30 minutos, e repouso, determinou-se separadamente o teor de amônio (N-NH₄⁺), nitrito (N-NO₂⁻) e nitrato (N-NO₃⁻). O amônio foi determinado em uma alíquota de 20 ml do sobrenadante, em destilador de arraste de vapor semi-micro-Kjeldahl, após a adição de 0,2 g de MgO. O nitrito e nitrato foram determinados conjuntamente na mesma alíquota, após o resfriamento, adicionado-se 0,2 g de liga Devarda (TEDESCO et al., 1995). Todos os resultados relativos ao N mineral foram expressos em relação ao solo seco a 105°C, em kg ha⁻¹, considerando-se a concentração de N mineral em cada camada de solo e a sua respectiva densidade do solo (Anexo 1).

2.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

2.4.1. Imobilização de N

As maiores quantidades de N imobilizado, na fração orgânica do solo, derivado do N-uréia marcado com ¹⁵N (Nidu), ocorreram na primeira avaliação subsequente à aplicação da adubação nitrogenada (aproximadamente uma semana), independente da época de aplicação (Figura 10a). Na pré-semeadura, a quantidade de Nidu foi de 11,1 kg ha⁻¹ de N, com aplicação de 50 kg ha⁻¹ de N-uréia (CRCN2-A), diminuindo para 9,1 e 8,3 kg ha⁻¹ de Nidu, com a aplicação da mesma dose na semeadura nos tratamentos CRCN1-A e CRCN2-B, respectivamente, e 7,9 kg ha⁻¹ de Nidu quando o N-uréia foi aplicado em cobertura (CRCN1-B). No tratamento sem resíduos culturais, a quantidade de Nidu foi de 6,4 kg ha⁻¹ com aplicação do N-uréia na semeadura.

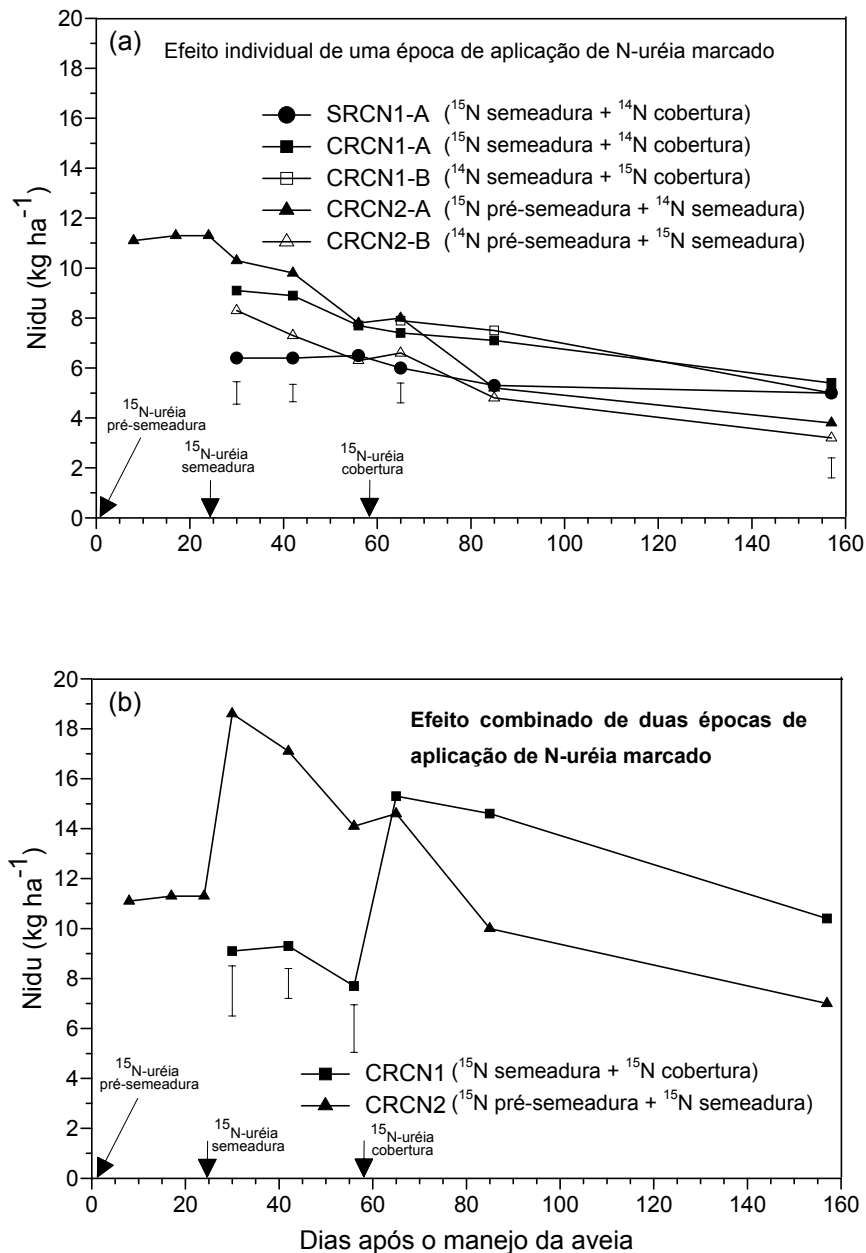


Figura 10. Quantidade de N imobilizado na fração orgânica do solo, derivado do N-uréia marcado com ^{15}N (Nidu), na dose de 50 kg ha^{-1} aplicada em uma única época, na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais (a) e na dose de 100 kg ha^{-1} , dividida em duas épocas: na semeadura e em cobertura (CN1), na pré-semeadura e na semeadura (CN2) (b). As barras indicam a diferença mínima significativa (Tukey 5%).

Somando-se as quantidades de Nidu, com aplicação de 100 kg ha^{-1} de N-uréia, dividido em duas épocas, foi encontrada a máxima quantidade de Nidu na primeira semana após a segunda aplicação (Figura 10b). A quantidade de Nidu com a aplicação da metade da dose na pré-semeadura e o restante na semeadura (CRCN2) foi de $18,6 \text{ kg ha}^{-1}$ e com aplicação das mesmas doses, porém na semeadura e em cobertura, a quantidade de Nidu foi $15,3 \text{ kg ha}^{-1}$ (CRCN1). Isso significa que, no sistema plantio direto, com seis anos de cultivos, foram imobilizados 15,3 a 18,6 % do N aplicado. Esses valores são significativos e devem ser considerados na recomendação da adubação nitrogenada.

Na maturação fisiológica do milho, os valores de Nidu diminuíram para $10,4 \text{ kg ha}^{-1}$, no tratamento CRCN2 e $7,0 \text{ kg ha}^{-1}$, no tratamento CRCN1. Nessa época, LARA CABEZAS et al. (2000) encontraram $10,1 \text{ kg ha}^{-1}$ de N imobilizado, utilizando a mesma dose de N-uréia (100 kg ha^{-1}), porém aplicada em dose única sobre os resíduos culturais de milheto ($1,91 \text{ Mg ha}^{-1}$) no estágio de 4 a 6 folhas do milho.

Em dois anos de estudos sobre resíduos culturais de aveia, utilizando 80 kg ha^{-1} de N-uréia, incorporado no sulco de adubação, LARA CABEZAS (2001) encontrou variação na imobilização de N de 15 a 45 kg ha^{-1} , com aplicação de N-uréia na pré-semeadura e de 8 a 14 kg ha^{-1} na pós-semeadura. A amplitude nos resultados, principalmente com a aplicação de N-uréia na pré-semeadura, pode estar relacionada à metodologia utilizada para a determinação da imobilização de N. Ela foi calculada a partir da diferença entre as quantidades de N total e mineral no solo, derivados do N-uréia marcado com ^{15}N . A grande variabilidade dos teores de N mineral no solo pode resultar em elevada amplitude de variação nos valores de imobilização de N, quando calculada por meio de diferença.

A quantidade de Nidu está relacionada com a disponibilidade de C orgânico dos resíduos culturais da aveia, principalmente com o C orgânico solúvel, pois o Nidu foi maior logo após o manejo da aveia (Figura 10a). Na semeadura do milho, aos 24 dias após o manejo da aveia, a

contribuição dos resíduos culturais na quantidade de Nidu, calculada por meio de diferença entre os tratamentos com e sem resíduos culturais, foi de 2,7 kg ha⁻¹. Na aplicação de N-uréia em cobertura, não houve diferença na quantidade de Nidu entre os tratamentos com e sem resíduos culturais. Na pré-semeadura, apesar de não existir um tratamento sem resíduos culturais e com N-uréia nesta época, estimou-se que a contribuição dos resíduos culturais foi de 4,7 kg ha⁻¹ de Nidu. Para essa estimativa, foi utilizada a quantidade de Nidu obtida com a aplicação de N-uréia na semeadura, pois é esperado que, na ausência de resíduos culturais, o Nidu não deva variar em função da época de aplicação da adubação nitrogenada.

A hipótese de que os resíduos culturais de aveia não influenciam na imobilização de N foi confirmada somente com a aplicação de N em cobertura. Como a aplicação da adubação nitrogenada no milho é recomendada na semeadura e em cobertura (COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO-RS/SC, 1995) deve-se considerar o efeito dos resíduos culturais da aveia na imobilização de N.

Foi investigada a relação existente entre as quantidades de Nidu e de C orgânico mineralizado proveniente dos resíduos culturais. Para isso, utilizaram-se as quantidades de Nidu obtidas na primeira avaliação subsequente a cada época de aplicação de N-uréia e as respectivas quantidades acumuladas de C orgânico mineralizado no respectivo período (aproximadamente uma semana). As quantidades de Nidu e de C orgânico mineralizado, provenientes dos resíduos culturais, foram obtidas por meio da diferença entre os tratamentos com e sem resíduos culturais. Ajustando-se estes valores a uma equação linear, estimou-se que, para cada grama de C orgânico mineralizado, foram imobilizados 20 mg de N na camada de zero a 10 cm (Figura 11).

Essa estreita relação encontrada entre Nidu e o C orgânico mineralizado pode ser útil para a previsão da imobilização de N, durante a decomposição dos resíduos culturais, já que a medição da mineralização do C orgânico por meio da emissão do C-CO₂ é uma técnica simples e

barata. Todavia, antes de generalizar o uso dessa correlação para as condições de plantio direto, é necessário conduzir outros estudos, variando o tipo e a quantidade de resíduos culturais e as doses de N.

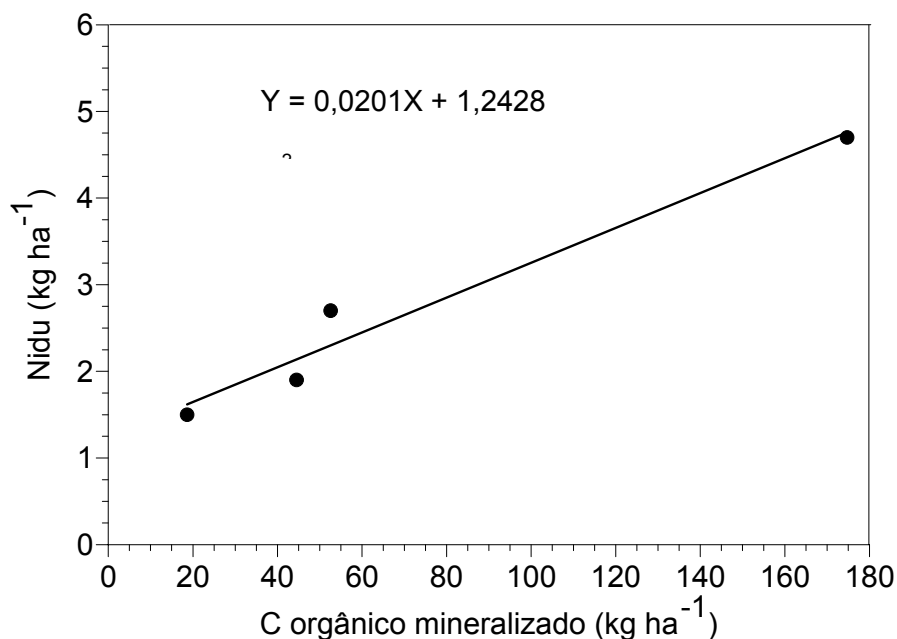


Figura 11. Relação entre o C orgânico mineralizado proveniente dos resíduos culturais e a quantidade de N imobilizado derivado do N-uréia marcado com ¹⁵N (Nidu).

Com a adição de resíduos culturais de trigo, uniformemente incorporados ao solo e equivalendo a uma produção de matéria seca de 8 Mg ha⁻¹, RECOUS et al. (1999) encontraram 126 mg de N imobilizado para cada grama de C orgânico mineralizado, proveniente dos resíduos culturais. Em condição de laboratório, TRINSOUTROT et al. (200b) encontraram 287 mg de N imobilizado para cada grama de C orgânico mineralizado. A condição ideal de umidade e temperatura do solo proporcionada aos microrganismos, em condições de laboratório, no trabalho de TRINSOUTROT et al. (200b) e a incorporação dos resíduos culturais no trabalho de RECOUS et al. (1999) foram os fatores que,

provavelmente, determinaram a maior imobilização de N por unidade de C mineralizado, em relação ao presente trabalho.

A aplicação de N-uréia na pré-semeadura, no tratamento com resíduos culturais (CRCN2), aumentou a quantidade de N na biomassa microbiana (N_{BM}), aos 8 dias da aplicação de N-uréia, com aumento de $6,4 \text{ kg ha}^{-1}$, em relação ao tratamento sem N (Figura 12). Na semeadura, houve aumento no N_{BM} com aplicação de N-uréia somente no tratamento que recebeu anteriormente N-uréia na pré-semeadura (CRCN2), com diferença entre os tratamentos com e sem N-uréia de $11,8 \text{ kg ha}^{-1}$, aos 6 dias da aplicação do N-uréia.

Os dados de N_{BM} reforçam a idéia de que os resíduos culturais têm maior efeito na imobilização de N na fase inicial de decomposição. Isso sugere que houve maior incorporação de N da uréia à biomassa microbiana durante a fase inicial de decomposição, quando o C orgânico solúvel e os compostos orgânicos mais facilmente degradáveis foram decompostos, coincidindo com a primeira fase de decomposição dos resíduos culturais, que ocorreu nos primeiros 18 dias do manejo da aveia (Capítulo I). Posteriormente, a assimilação de N pelos microrganismos foi menor, em razão da presença de compostos mais recalcitrantes dos resíduos culturais. A quantidade de C orgânico assimilável, disponível no solo, é o fator que mais influencia no processo de imobilização do N no solo, durante o ciclo das culturas (RECOUS et al., 1988; RECOUS et al., 1992).

Ao contrário do Nidu (Figura 10), o N_{BM} (Figura 12) e o C_{BM} (Capítulo I) variaram pouco no tempo. Como houve diminuição do Nidu durante o ciclo da cultura do milho, é possível inferir que houve reciclagem do N da biomassa microbiana e parte do N imobilizado foi remineralizado. É provável que o N mineral não marcado do solo, proveniente da decomposição da matéria orgânica e/ou dos resíduos culturais, substituiu o N-uréia marcado devido à renovação periódica da biomassa microbiana do solo.

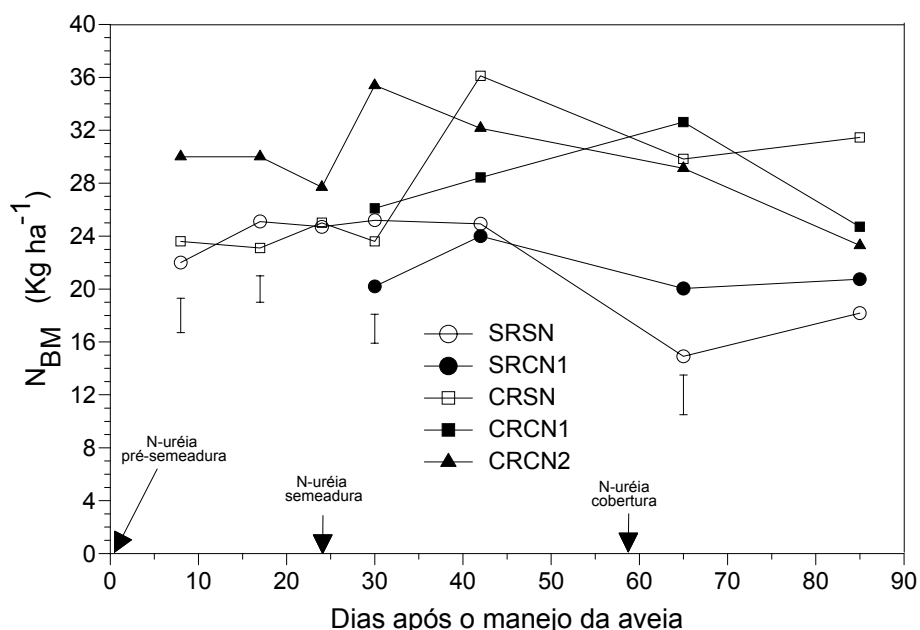


Figura 12. Nitrogênio na biomassa microbiana, nos primeiros 85 dias do manejo da aveia, sem N (SN) e com aplicação de N-uréia na semeadura e em cobertura (CN1), na pré-semeadura e na semeadura (CN2), na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais.

Utilizando os dados de Nidu obtidos nas diferentes épocas, durante o ciclo da cultura do milho, com aplicação de 50 kg ha^{-1} de N-uréia (Figura 10a) estimou-se, por meio de regressão linear, uma remineralização de $0,057 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ de N com aplicação de N-uréia na pré-semeadura ($r^2 = 0,91$), $0,030 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ com aplicação de N-uréia na semeadura ($r^2 = 0,90$) e $0,032 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1}$ com aplicação de N-uréia em cobertura ($r^2 = 0,99$).

A maior taxa de remineralização, com aplicação de N-uréia na pré-semeadura, está relacionada à maior imobilização de N. A partir dessa taxa, estimou-se que até a maturação fisiológica do milho foi remineralizado $8,5 \text{ kg ha}^{-1}$ de N ($0,057 \text{ kg ha}^{-1} \text{ dia}^{-1} \times 149$ dias). Esse valor equivale a 76% da imobilização que ocorreu na primeira semana da aplicação do N-uréia na pré-semeadura ($11,1 \text{ kg ha}^{-1}$) e 17 % da quantidade de N-uréia aplicado (50 kg ha^{-1}). No estágio de maior demanda

de N pelas plantas de milho (11 a 12 folhas), o N remineralizado, proveniente da aplicação de N-uréia na pré-semeadura, foi de 3,8 kg ha⁻¹ (0,057 kg ha⁻¹ dia⁻¹ x 67 dias).

Os resultados deste trabalho evidenciam que ocorre imobilização de N e posterior remineralização, conforme foi enfatizado por SÁ (1996). Todavia, parece que a quantidade de N remineralizado com a aplicação de N-uréia na pré-semeadura, na época de maior demanda pelo milho pode não ser suficiente para atender à cultura. Por outro lado, na maturação fisiológica do milho, a antecipação da adubação nitrogenada aumentou na quantidade de N mineral no solo derivado da uréia marcada com ¹⁵N (Tabela 6).

Tabela 6. Quantidade de N derivado da uréia marcada com ¹⁵N, no N total do solo (Ntdu), na fração orgânica (Nodu) e na fração mineral (Nmdu), na maturação fisiológica do milho, nos tratamentos com resíduos culturais (CR) e com N-uréia na semeadura + cobertura (CN1) e na pré-semeadura + semeadura (CN2)

Tratamentos	Ntdu	Nodu	Nmdu
	----- kg ha ⁻¹ -----		
CRCN1	20,3 b ⁽¹⁾	10,4	9,9 b
CRCN2	28,1 a	7,0	21,1 a

⁽¹⁾ Médias não seguidas pela mesma letra diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

A acumulação de N mineral no solo, derivado da uréia, na maturação fisiológica do milho, deve-se, provavelmente, à diminuição da disponibilidade de C orgânico proveniente dos resíduos culturais, nos estádios finais de desenvolvimento da cultura, o que deve ter reduzido a imobilização de N pelos microrganismos do solo. A baixa absorção de N, no final do ciclo do milho, também deve ter contribuído para esse resultado. Portanto, a prática de antecipação da adubação nitrogenada para a pré-semeadura do milho, com o objetivo de aumentar o

aproveitamento do N, parece não ser adequada. A contribuição do N da uréia na nutrição das plantas de milho será abordada com mais detalhes no Capítulo IV.

2.4.2. N mineral no solo

A quantidade de N mineral ($\text{N-NH}_4^+ + \text{N-NO}_2^- + \text{N-NO}_3^-$) durante os primeiros 85 dias do manejo da aveia na camada superficial do solo (zero a 10 cm) (Figura 13a) e na camada de zero a 90 cm (soma das camadas analisadas) (Figura 13b), variou com a presença dos resíduos culturais de aveia na superfície do solo e com a época de aplicação do N-uréia no milho.

Quando não foi aplicado N-uréia, a quantidade de N mineral na camada superficial do solo não diferiu entre os tratamentos com e sem resíduos culturais (Figura 13a). Considerando que, no tratamento com resíduos culturais, ocorreu maior imobilização de N, principalmente na fase inicial de decomposição dos resíduos culturais (Figura 10), era de se esperar que, nesse tratamento, a quantidade de N mineral fosse menor do que nos tratamentos sem resíduos culturais.

Considerando a camada de zero a 90 cm, observa-se que, no tratamento sem resíduos culturais (SRSN), na primeira avaliação realizada após o manejo da aveia, houve maior quantidade de N mineral em relação ao tratamento com resíduos culturais (CRSN) (Figura 13b). Nas avaliações posteriores, diminuiu a diferença no teor de N mineral entre os tratamentos, chegando aos dois meses do manejo da aveia com maior teor de N mineral no tratamento com resíduos culturais (CRSN).

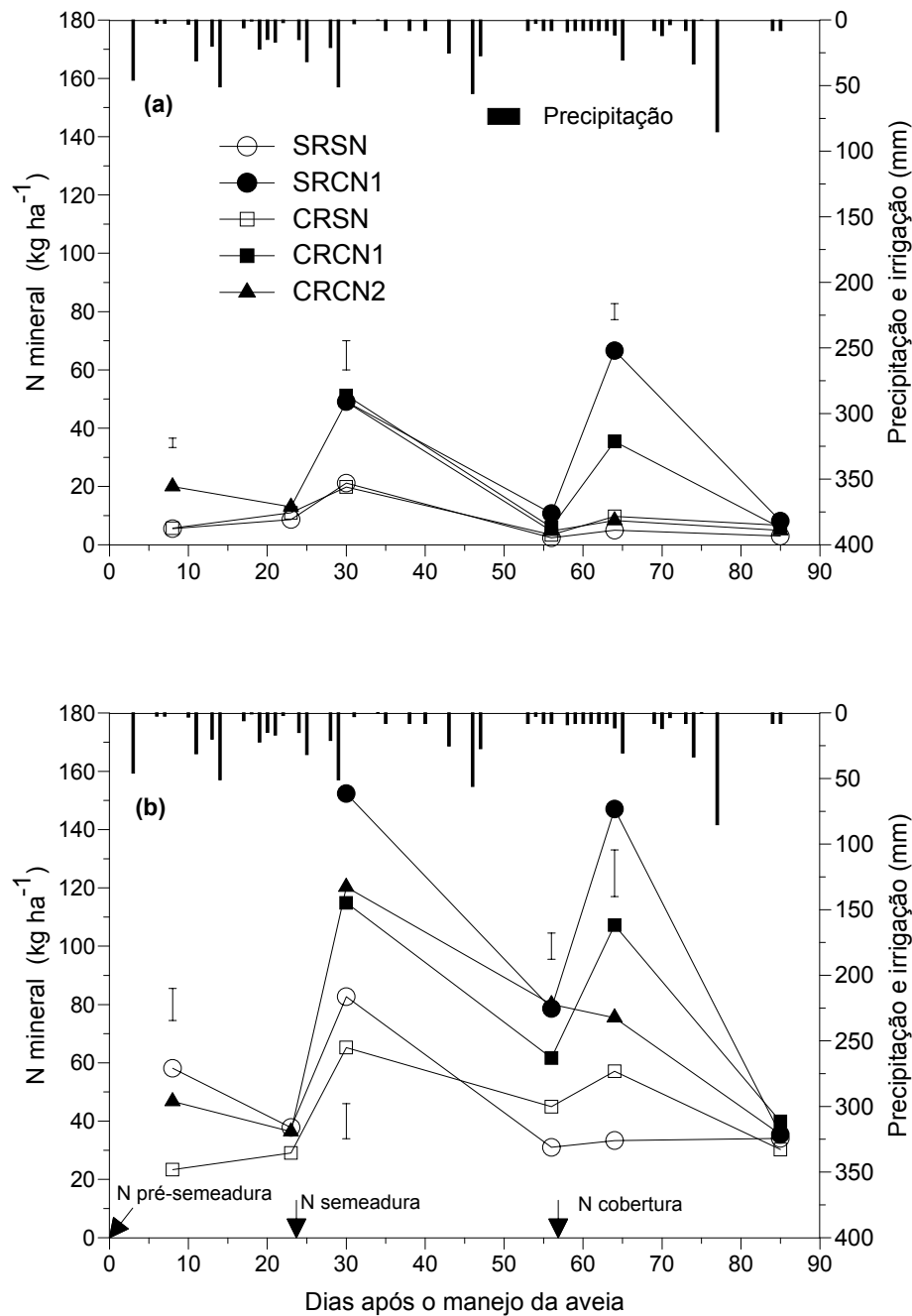


Figura 13. Quantidade de N mineral no solo, nos primeiros 85 dias do manejo da aveia, na camada de zero a 10 cm (a) e de zero a 90 cm (b), com aplicação de N-uréia na semeadura e em cobertura do milho (CN1), na pré-semeadura e na semeadura (CN2), na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais. As barras verticais indicam a diferença mínima significativa (Tukey 5%).

A menor quantidade de N mineral logo após o manejo da aveia, no tratamento com resíduos culturais (CRSN), deve ter ocorrido devido à maior imobilização de N e também à absorção de N pelas plantas de aveia, cultivadas no outono/inverno. No tratamento sem resíduos culturais, além da menor imobilização de N, não tinha plantas de aveia para absorver o N que foi mineralizado da matéria orgânica do solo.

Após dois meses do manejo da aveia, a maior quantidade de N mineral no solo, no tratamento com resíduos culturais e sem N (CRSN), deve estar relacionada à maior mineralização líquida do N dos resíduos culturais, já que nessa época não houve contribuição dos resíduos culturais na imobilização de N (Figura 10). Ao contrário, com aplicação de N-uréia, houve menor quantidade de N mineral no tratamento com resíduos culturais (CRCN1) (Figura 13b). Nesse caso, a diferença de N mineral entre os tratamentos com e sem resíduos culturais não foi confirmada pelos dados de imobilização de N (Figura 10). Isso mostra que a determinação de N mineral no solo para quantificar a imobilização de N pode não ser precisa.

A quantidade de N mineral no solo proveniente do N-uréia, calculada por meio da diferença entre os tratamentos com e sem N-uréia, na camada de zero a 10 cm (Figura 14a) e na camada de zero a 90 cm (Figura 14b) foi menor na primeira avaliação subsequente à aplicação de N-uréia, na pré-semeadura, seguida da semeadura e em cobertura. A maior imobilização de N pelos microrganismos do solo, na fase inicial de decomposição dos resíduos culturais (Figura 10), deve ter contribuído para esse resultado.

A quantidade de N mineral no solo, proveniente do N-uréia, diminuiu rapidamente após a aplicação da adubação nitrogenada (Figura 14). Isso é confirmado com experimentos utilizando N marcado (^{15}N) (BRISTOW et al., 1987; RECOUS et al., 1988; VOS et al., 1993; RECOUS & MACHET, 1999) e deve estar associado, principalmente, à imobilização de N pelos microrganismos do solo.

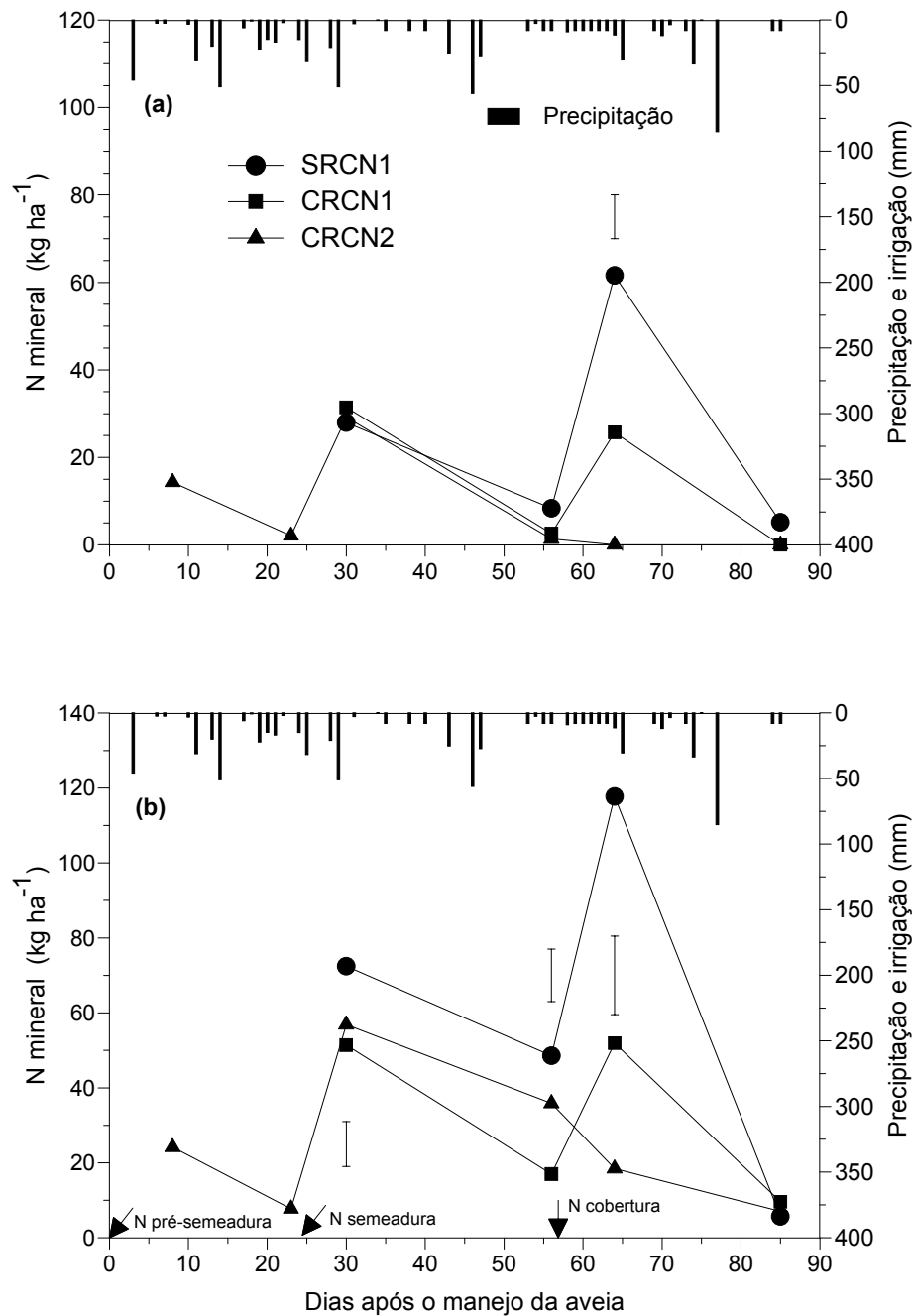


Figura 14. Estimativa da quantidade de N mineral no solo, nos primeiros 85 dias do manejo da aveia, na camada de zero a 10cm (a) e de zero a 90 cm (b), proveniente da aplicação de N-uréia na semeadura e em cobertura do milho (CN1), na pré-semeadura e na semeadura (CN2), na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais. As barras verticais indicam a diferença mínima significativa (Tukey 5%).

Aos 65 dias do manejo da aveia (estádio de 6 a 7 folhas do milho) a quantidade de N mineral no solo foi menor com a aplicação de N-uréia na pré-semeadura (CRCN2) do que quando o N-uréia foi aplicado em cobertura (CRCN1). Resultados semelhantes foram obtidos por DA ROS et al. (2003), trabalhando com diferentes épocas de aplicação de N-uréia na cultura do milho, em um Latossolo Vermelho distrófico argiloso. A aplicação antecipada da adubação nitrogenada deve resultar em uma menor acumulação de N pelas plantas de milho, pois a maior demanda de N pela cultura é no estágio de 11 a 12 folhas (LARA CABEZAS, 2001). Assim, a aplicação antecipada da adubação nitrogenada não é uma alternativa recomendada para aumentar a disponibilidade N mineral no solo na época de maior demanda pela cultura do milho.

2.5. CONCLUSÕES

- A imobilização de N foi maior na fase inicial de decomposição dos resíduos culturais e esteve relacionada com a quantidade de C orgânico mineralizado.
- Os resíduos culturais de aveia na superfície do solo aumentaram a imobilização de N quando a adubação nitrogenada foi aplicada na pré-semeadura e na semeadura do milho.
- A quantidade de N imobilizado na presença dos resíduos culturais foi maior com a aplicação da adubação nitrogenada na pré-semeadura do milho, seguida da semeadura e em cobertura.

3. Capítulo III – DINÂMICA DO CARBONO E DO NITROGÊNIO COM O USO DE URÉIA, NA SUCESSÃO AVEIA PRETA/MILHO, NO SISTEMA PLANTIO DIRETO: III. Volatilização de amônia e deslocamento de nitrato no perfil do solo

3.1. RESUMO

As perdas de amônia por volatilização estão associadas, principalmente, ao contato da uréia com o solo, à atividade da urease, à umidade e à temperatura do solo. No sistema plantio direto, é difícil prever a sua magnitude, em função da presença dos resíduos culturais. Com relação ao deslocamento de N no perfil do solo, os resíduos culturais podem diminuir o deslocamento se aumentar a imobilização de N. Com o objetivo de quantificar as perdas de N por volatilização de amônia e o deslocamento de nitrato no perfil do solo, com a aplicação de N em diferentes épocas no milho, na presença e na ausência de resíduos culturais de aveia na superfície do solo, conduziu-se um experimento a campo, em 2002/03, na UFSM (RS), em um Argissolo Vermelho distrófico arênico. Os tratamentos foram: 1) sem resíduos culturais e sem N (SRSN); 2) sem resíduos culturais e com N na semeadura e em cobertura (SRCN1); 3) com resíduos culturais e sem N (CRSN); 4) com resíduos culturais e com N na semeadura e em cobertura (CRCN1) e 5) com resíduos culturais e com N na pré-semeadura e na semeadura (CRCN2). O N foi aplicado, na forma de uréia, nas doses de 50 kg ha^{-1} em cada época, totalizando 100 kg ha^{-1} , a lançar sobre os resíduos culturais da aveia. Para melhor traçar o deslocamento do N no perfil do solo, foram demarcadas microparcels no interior das parcelas e aplicada N-uréia marcada com 2,8 % de átomos de ^{15}N em excesso. As perdas de N por volatilização de amônia foram quantificadas por meio de um sistema semi-

aberto estático. Para avaliar o deslocamento de nitrato no perfil do solo, foram coletadas amostras em seis épocas, após o manejo da aveia, nas parcelas que não receberam a uréia marcada, nas camadas de zero a 10; 10 a 30; 30 a 60 e 60 a 90 cm. Nas microparcelas que receberam a uréia marcada, foram abertas trincheiras na maturação fisiológica do milho, onde se coletaram amostras de solo, nas camadas de zero a 10; 10 a 20; 20 a 30; 30 a 40; 40 a 60; 60 a 80; 80 a 100 e 100 a 120 cm, para a determinação das quantidades de N derivado da uréia. Os resíduos culturais diminuíram os fluxos de volatilização de amônia quando eles proporcionaram maior umidade do solo no momento da aplicação da uréia, em relação ao solo descoberto. Em condições semelhantes de umidade de solo, entre os tratamentos com e sem resíduos culturais, houve menor volatilização de amônia quando a uréia foi aplicada sobre o solo descoberto. Na soma das duas épocas de aplicação de N-uréia na cultura do milho, a quantidade de amônia volatilizada não diferiu entre os tratamentos com e sem resíduos culturais, com média de 17 % de perda. O deslocamento de nitrato no perfil do solo ocorreu logo após a aplicação do N-uréia, sendo maior na ausência de resíduos culturais e com aplicação de N-uréia na pré-semeadura, porém não ultrapassou a camada de 10 a 30 cm de profundidade. Na maturação fisiológica do milho, as maiores quantidades de N retido no solo, derivado da uréia marcada com ^{15}N , permaneceram na camada de zero a 20 cm. O deslocamento de N derivado da uréia, até a camada 100 a 120 cm de profundidade, foi inferior a $0,3 \text{ kg ha}^{-1}$, indicando baixo potencial de lixiviação de nitrato com aplicação de 100 kg ha^{-1} de N-uréia, parcelado em duas épocas, sobre os resíduos culturais de aveia.

3.2. INTRODUÇÃO

Os adubos nitrogenados minerais aplicados como fertilizantes são altamente solúveis em água e, desse modo, os produtos finais da dissolução ou hidrólise, como a amônia (NH_3), amônio (NH_4^+) ou nitrato (NO_3^-), seguem diferentes destinos no solo, podendo ser lixiviados na forma de nitrato, volatilizados na forma de amônia e imobilizados pela biomassa microbiana.

As perdas de N por lixiviação foram consideradas, durante muito tempo, como a causa principal da baixa eficiência dos fertilizantes nitrogenados. Com o advento do uso de ^{15}N , descobriu-se que as perdas por lixiviação durante o ciclo das culturas são, normalmente, baixas (MEIRELLES et al., 1980; COELHO et al., 1991; LARA CABEZAS et al., 2000), sendo significantes somente com elevadas precipitações pluviométricas e em solos muito arenosos, com baixos teores de matéria orgânica (URQUIAGA et al., 1990).

A adição de resíduos culturais, com elevada relação C/N e com alta quantidade de C orgânico mineralizável, é uma alternativa para aumentar a imobilização de N e diminuir a lixiviação de nitrato. No sistema plantio direto, em que os resíduos culturais permanecem na superfície do solo, a quantidade de C orgânico mineralizável é pequena. Portanto, é de se esperar que eles não exerçam efeito no deslocamento de nitrato.

As perdas de amônia por volatilização estão associadas ao contato da uréia com o solo (MENGEL, 1996; CERETTA, 1997) e à atividade da urease (NELSON et al., 1980; ECKERT et al., 1986; McINNIS et al., 1986; MELLO, 1987; MOAL et al., 1995). No sistema plantio direto, é difícil prever a sua magnitude em função da presença dos resíduos culturais. Se, por um lado, ela pode aumentar a concentração e a atividade da urease (NELSON et al., 1980; ECKERT et al., 1986; McINNIS et al., 1986; MELLO, 1987; MOAL et al., 1995), o que aumentaria a volatilização de amônia, por outro lado, os resíduos culturais, na superfície do solo,

poderiam diminuir a temperatura e a perda de umidade por evaporação (BRAGAGNOLO & MIELNICZUK, 1990), o que poderia diminuir a volatilização de amônia.

Este trabalho teve por objetivo quantificar as perdas de N por volatilização de amônia e o deslocamento de nitrato no perfil do solo, com a aplicação de N-uréia, em diferentes épocas no milho, na presença e na ausência de resíduos culturais de aveia na superfície do solo.

3.3. MATERIAL E MÉTODOS

3.3.1. Avaliação das perdas de N por volatilização de amônia

As perdas de N por volatilização de amônia ($N-NH_3$) foram quantificadas por meio de um sistema semi-aberto estático, proposto por NÖMMIK (1973), com algumas adaptações (Figura 15). As câmaras coletoras, construídas a partir de cilindros de cloro polivinil (PVC) com 200 mm de diâmetro e 400 mm de altura, foram encaixadas sobre bases, também de PVC com 70 mm de altura, as quais foram introduzidas no solo até uma profundidade de 30 mm. Sobre os cilindros, foram encaixados suportes de metal, aos quais foi acoplada uma tampa protetora (pratos plásticos para vasos de flores), para impedir que a precipitação pluviométrica e os raios solares atingissem o interior do cilindro.

As câmaras coletoras foram instaladas no solo, imediatamente antes das aplicações do N-uréia, na pré-semeadura, na semeadura e em cobertura. Em cada câmara coletora, foram colocadas duas esponjas de 20 mm de espessura e 28 de densidade. A primeira foi colocada na parte inferior da câmara, a uma altura de 15 cm do solo, com o objetivo de captar somente a amônia que foi volatilizada na parte interna das câmaras. A segunda foi colocada na parte superior da câmara, a 30 cm do

solo, para captar a amônia externa às câmaras, evitando a contaminação da esponja inferior.

As esponjas foram colocadas sobre suportes metálicos em forma de “X”, adaptados no interior das câmaras. Elas foram embebidas com 100 ml de uma solução contendo ácido fosfórico (50 ml L^{-1}) e glicerina (40 ml L^{-1}). Antes de colocar as esponjas nas câmaras coletoras, elas foram pressionadas manualmente para eliminar o excesso de solução e evitar o gotejamento no interior dos cilindros. O volume final de solução em cada esponja foi de, aproximadamente, 70 ml.

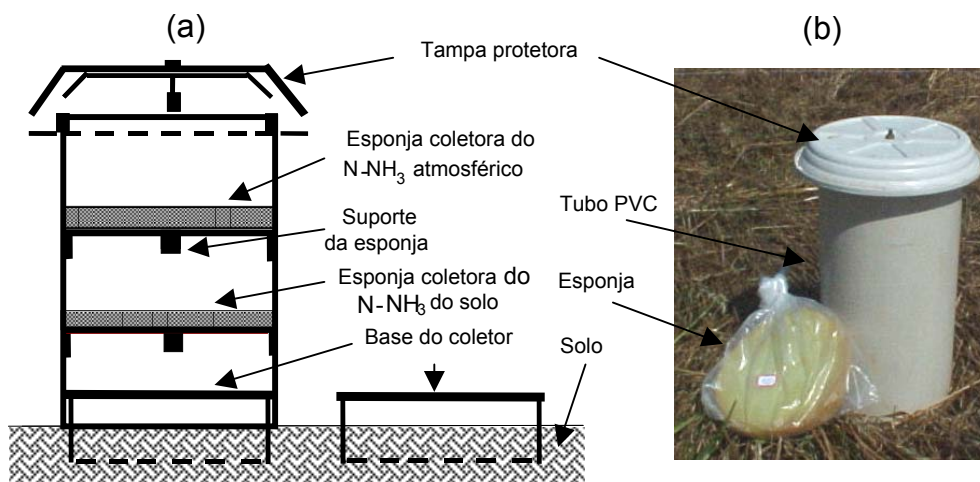


Figura 15. Esquema (a) e foto (b) do dispositivo utilizado para medir a volatilização de amônia. Adaptado de NÔMMIK (1973).

Foram efetuadas seis trocas das esponjas nas primeiras 70 horas após a aplicação do N-uréia na pré-semeadura e nas primeiras 89,5 horas após a aplicação da semeadura. Na aplicação de N-uréia em cobertura, as esponjas foram trocadas sete vezes, no período de 118,75 horas. Após cada coleta, foi colocada, no interior das câmaras, uma quantidade de água equivalente à chuva ocorrida no período.

A amônia retida nas esponjas, na forma de fosfato de amônio, foi extraída mediante oito a 10 lavagens sucessivas com uma solução de KCl 1M. Após o ajuste do volume desta solução para 500 ml, procedeu-se à destilação de uma alíquota de 20 ml em destilador de arraste de vapores, adicionando-se 0,2 g de MgO em cada amostra e posterior titulação com H_2SO_4 (TEDESCO et al., 1995).

3.3.2. Avaliação do deslocamento de nitrato no perfil do solo

O deslocamento de nitrato ($N-NO_3^-$) no perfil do solo foi avaliado por meio da determinação dos teores de $N-NO_3^-$ no perfil do solo, em seis épocas, após o manejo da aveia e também por meio da determinação da quantidade de N no perfil do solo derivado da uréia marcada com ^{15}N na maturação fisiológica do milho.

Amostras de solo nas camadas de zero a 10; 10 a 30; 30 a 60 e 60 a 90 cm foram coletadas em seis épocas, no período de 85 dias do manejo da aveia (61 dias da semeadura do milho). As coletas foram realizadas aos 8 e 23 dias da aplicação do N-uréia na pré-semeadura (manejo da aveia), aos 6 e 32 dias da aplicação do N-uréia na semeadura do milho e aos 6 e 27 dias da aplicação do N-uréia em cobertura. O calendário de coletas de solo é mostrado na tabela 3 do capítulo I.

O solo foi coletado por meio de um trado calador, em seis pontos aleatórios de cada parcela. As amostras, compostas de seis subamostras por parcela, foram misturadas, homogeneizadas e, imediatamente, submetidas à extração do $N-NO_3^-$.

A extração do $N-NO_3^-$ foi realizada pesando-se 25 g de solo úmido em frascos de vidro contendo 100 ml de KCl 1 mol L^{-1} . Após agitação por 30 minutos e repouso, determinou-se a concentração de $N-NO_3^-$ no sobrenadante por destilação em semi-micro Kjeldahl e titulação com H_2SO_4 (TEDESCO et al., 1995). Os resultados foram expressos em relação ao solo seco a 105°C, em $kg\ ha^{-1}$, considerando-se a

concentração de N-NO_3^- e a densidade aparente do solo de cada camada de solo (Anexo 1).

3.3.3. Determinação do N derivado da uréia no perfil do solo

Aos 157 dias do manejo da aveia, no estágio de maturação fisiológica do milho, foram coletadas amostras de solo nas microparcelas com ^{15}N -uréia, em trincheiras, nas camadas de zero a 10; 10 a 20; 20 a 30; 30 a 40; 40 a 60; 60 a 80; 80 a 100 e 100 a 120 cm. As amostras foram coletadas nas trincheiras com auxílio de espátulas e, posteriormente, secadas ao ar, destorroadas e peneiradas (malha de 2 mm). As raízes de milho e os resíduos culturais presentes no solo foram retirados manualmente, durante o processo de destorroamento e peneiração. O solo foi seco a 45°C e moído a pó, em graal de ágata, para evitar contaminação. Determinou-se o N-total (TEDESCO et al., 1995), na UFSM, e o excesso de átomos de ^{15}N (TRIVELIN et al., 1973), na EMBRAPA Agrobiologia (RJ).

A quantidade de N total e a quantidade de N derivado da uréia foram expressos em kg ha^{-1} , para cada camada de solo, considerando a respectiva densidade aparente do solo (Anexo 1). A quantidade de N derivado da uréia marcada com ^{15}N foi calculada conforme a equação:

$$\text{Nsdu} = R_s * \text{QN}_{ts} \quad [6]$$

onde: Nsdu = N total no solo derivado da uréia, em kg ha^{-1} ; R_s = relação entre o percentual de átomos de ^{15}N em excesso no N total do solo e o percentual de átomos de ^{15}N em excesso na uréia e QN_{ts} = quantidade de N total no solo, em kg ha^{-1} .

3.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.4.1. Volatilização de amônia

Os maiores fluxos de volatilização de amônia (N-NH_3) foram observados na segunda avaliação, realizada aproximadamente 20 horas após a aplicação da uréia (Figuras 16). As aplicações de N-uréia, em todas as épocas, foram realizadas no final da tarde, entre 16 h 30 mim e 19 h 15 min, e a primeira avaliação de volatilização de amônia foi feita no início da manhã do dia seguinte (± 9 h). O teor de umidade do solo e a quantidade de água condensada dentro das câmeras de medição, na noite subsequente à aplicação do fertilizante, possivelmente, foram suficientes para desencadear os processos de hidrólise enzimática das moléculas de uréia e liberar a amônia.

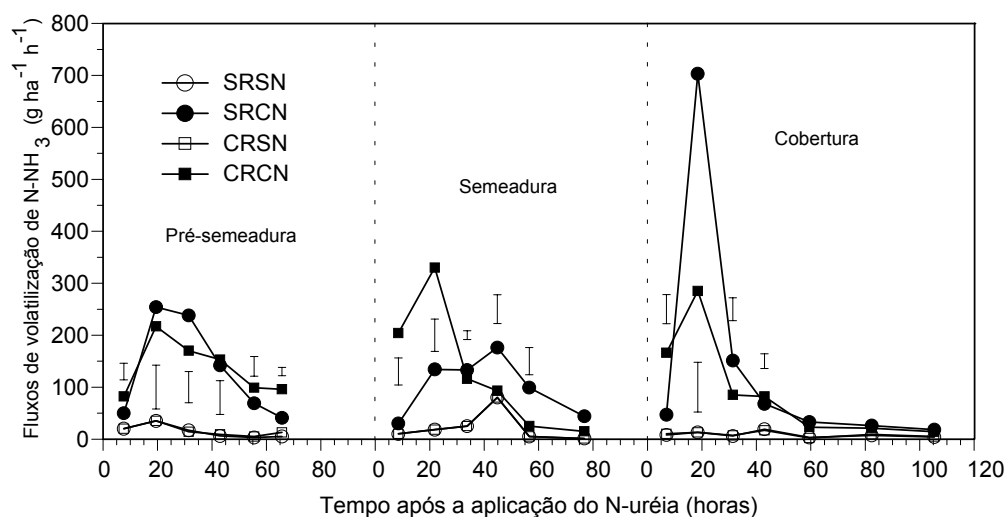


Figura 16. Fluxos de volatilização de N-NH_3 sem aplicação de N-uréia (SN) e com aplicação de 50 kg ha^{-1} N-uréia (CN) na pré-semeadura, semeadura e em cobertura, na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais. As barras verticais indicam a diferença mínima significativa (Tukey 5%).

Essa cinética observada na volatilização da amônia está de acordo com a maioria dos estudos, em que esse processo inicia logo após a aplicação da uréia, cuja hidrólise da uréia ocorre com relativa rapidez no solo (RODRIGES & KIEHL, 1986; SENGIK & KIEHL, 1995a; LARA CABEZAS et al., 1997a; COSTA et al., 2003). Normalmente, a máxima perda de amônia por volatilização concentra-se nos primeiros 6 dias, após a aplicação do fertilizante (LARA CABEZAS & TRIVELIN, 1990; AL-KANANI et al., 1991; SENGIK & KIEHL, 1995a e 1995b; RECOUS & MACHET, 1999; SANGOI, et al., 2003).

A volatilização de amônia apresentou comportamento diferenciado em função das épocas de aplicação do N-uréia e da presença ou ausência de resíduos culturais de aveia na superfície do solo (Figuras 16 e 17). Na pré-semeadura, não houve diferença significativa entre os tratamentos com e sem resíduos culturais, tanto nos fluxos de volatilização (Figura 16) como na volatilização acumulada de amônia (Figura 17). O alto teor de umidade do solo no momento da aplicação da uréia na pré-semeadura (Tabela 7) e, principalmente, a precipitação pluviométrica que ocorreu na manhã do dia posterior à aplicação (Figura 18) devem ter anulado o efeito dos resíduos culturais na perda de N por volatilização.

O umedecimento do solo, imediatamente após a aplicação da uréia, é mais importante do que a condição de umidade do solo no momento da aplicação (LARA CABEZAS et al., 1997b), principalmente quando a uréia é aplicada na superfície e sem incorporação ao solo. A água diminui a volatilização da amônia se for suficiente para diluir a concentração de oxidrilas (OH^-), ao redor dos grânulos de uréia, que foram produzidos na reação de hidrólise, além de proporcionar a incorporação da uréia no solo (LARA CABEZAS et al., 1997a).

Na semeadura, houve precipitação pluviométrica somente no início da tarde do dia posterior à aplicação do N-uréia (Figura 18). Assim, os fluxos de volatilização de amônia, que ocorreram antes da precipitação, foram maiores na presença dos resíduos culturais (Figura 16) e contribuíram para a maior quantidade acumulada de amônia volatilizada

(Figura 17). O menor contato da uréia com o solo (MENGEL, 1986; CERETTA, 1997) e a maior atividade da urease na presença dos resíduos culturais, em relação à ausência dos mesmos (NELSON et al., 1980; ECKERT et al., 1986; McINNIS et al., 1986; MELLO, 1987; MOAL et al., 1995), devem ter sido os fatores que mais contribuíram para o aumento dos fluxos de volatilização de amônia nessa condição.

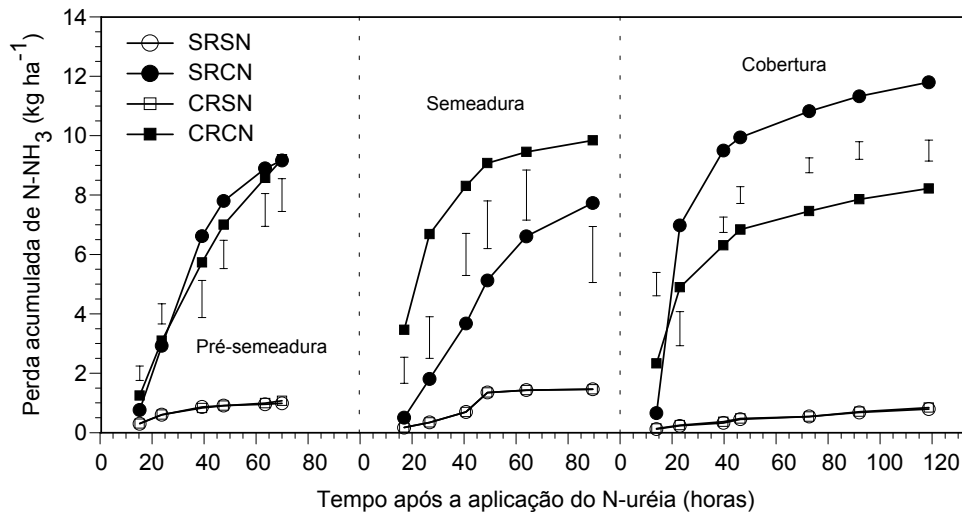


Figura 17. Perda acumulada de N-NH₃ sem aplicação de N-uréia (SN) e com aplicação de 50 kg ha⁻¹ N-uréia (CN) na pré-semeadura, semeadura e em cobertura, na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais. As barras verticais indicam a diferença mínima significativa (Tukey 5%).

Na aplicação do N-uréia em cobertura, a precipitação pluviométrica ocorreu somente no final do segundo dia, após a adubação nitrogenada (Figura 18) e teve pouca influência na incorporação da uréia ao solo, pois a maior parte da amônia já tinha sido volatilizada antes da ocorrência da precipitação (Figuras 16 e 17). Observa-se que, na primeira avaliação, posterior à aplicação do N-uréia, houve maior quantidade de amônia volatilizada na presença de resíduos culturais (Figuras 16 e 17), o que

deve estar relacionado ao efeito do contato da uréia com o solo e da atividade da urease. Na segunda avaliação, o maior fluxo de volatilização ocorreu na ausência de resíduos culturais (Figura 16) e contribuiu para a maior quantidade acumulada de amônia volatilizada (Figura 17).

Tabela 7. Umidade gravimétrica do solo (%), imediatamente antes da aplicação do N-uréia na pré-semeadura do milho, na semeadura e em cobertura, na presença e na ausência de resíduos culturais de aveia

Tratamentos	Épocas de aplicação do N-uréia			
	Pré-semeadura	Semeadura	Cobertura	
	(0 - 10 cm)	(0 - 10 cm)	(0 - 10 cm)	(0 - 2,5 cm)
Sem resíduos	18,3	15,8	12,8	6,9
Com resíduos	19,3	17,5	14,8	13,0

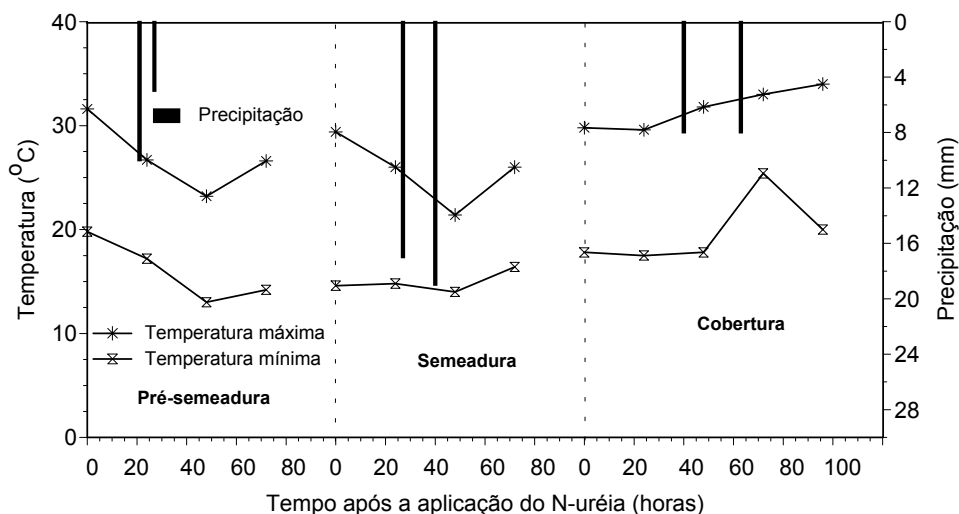


Figura 18. Temperaturas do ar e precipitações pluviométricas no período de avaliação da volatilização de amônia após a aplicação de N-uréia na pré-semeadura, semeadura e em cobertura.

A maior volatilização de amônia, na ausência de resíduos culturais, pode ser justificada pela menor umidade do solo, em relação ao tratamento com resíduos culturais, principalmente na camada superficial (Tabela 7). A temperatura do solo também é maior na ausência de resíduos culturais (BRAGAGNOLO & MIELNICZUK, 1990) e, por isso, o pico de volatilização ocorreu no período das 9 h as 18 h do dia seguinte da aplicação (Figura 17). A maior temperatura facilita a difusão ascendente de amônia que ocorre juntamente com a evaporação da água do solo e aumenta a volatilização de amônia (AL-KANANI et al., 1991), pois o aumento da temperatura favorece a atividade da urease e, assim, a taxa de hidrólise da uréia (CHIN & KROONTJE, 1963).

Ressalta-se que o efeito dos resíduos culturais na diminuição da volatilização de amônia ocorreu somente quando a cobertura proporcionada por eles manteve maior umidade no solo em relação ao solo descoberto. Isso aconteceu quando a uréia foi aplicada após um período de 5 dias sem chuva.

A quantidade total de N volatilizado, proveniente do N-uréia, calculada por meio da diferença entre os tratamentos com e sem N-uréia, na combinação de duas épocas de aplicação de N-uréia, não foi afetada pela presença dos resíduos culturais da aveia (Figura 19). Isso, novamente, não valida a hipótese de que os resíduos culturais diminuem a volatilização de amônia. A melhor alternativa para reduzir a volatilização de amônia é a incorporação da uréia ao solo, independente da presença ou da ausência de resíduos culturais (LARA CABEZAS et al., 2000 e SANGOI et al., 2003).

A quantidade de amônia volatilizada com a aplicação de 100 kg ha^{-1} de N-uréia, dividido em duas épocas, foi em média de 17 kg ha^{-1} ou 17 % do N aplicado (Figura 19). Esse valor é relativamente baixo, comparado aos valores normalmente encontrados na literatura, com aplicação de uréia na superfície do solo.

Em condições de campo, aplicando 100 kg ha^{-1} de N-uréia na superfície do solo, LARA CABEZAS et al. (2000) encontraram 54 % de

perda de N por volatilização e LARA CABEZAS et al. (1997b) chegaram a valores de até 78 % do N aplicado. Em laboratório, os valores variam de 83 a 96% (RODRIGES & KIEHL, 1986), 20 a 58% (SILVA et al., 1995) e 14 a 54% (SANGOI et al., 2003). As diferenças nas perdas de N por volatilização estão relacionadas às características do solo, à quantidade de uréia aplicada e, principalmente, às variações bruscas da umidade na superfície do solo no momento da aplicação da uréia.

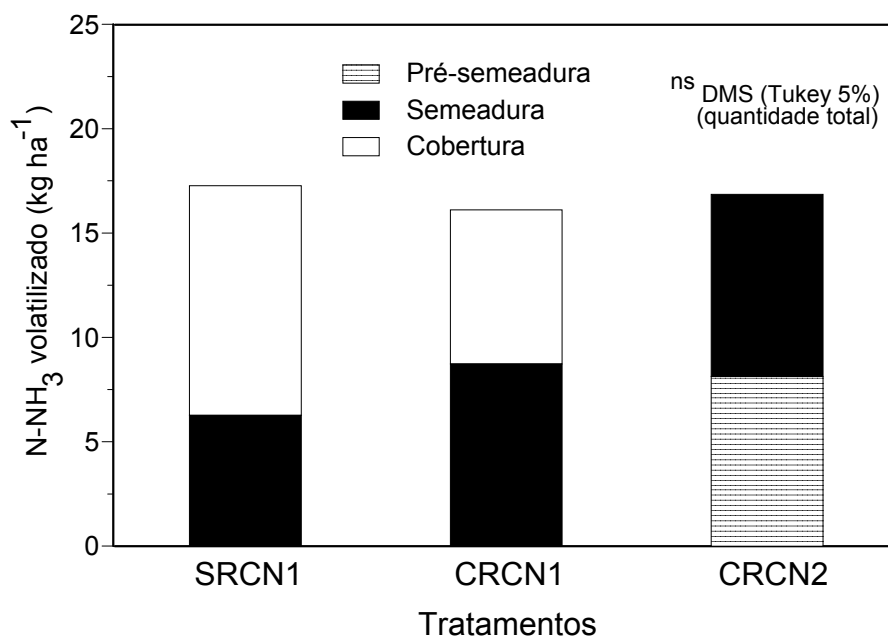


Figura 19. Quantidade total de N-NH₃ volatilizado proveniente da aplicação de N-uréia em duas épocas: na semeadura e em cobertura (CR1), na pré-semeadura e na semeadura (CR2), na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais. Dose de N-uréia aplicado em cada época = 50 kg ha⁻¹.

Alguns resultados de pesquisa indicam que as perdas de N por volatilização de amônia são subestimadas em valores próximos a 28%, em relação às condições naturais, quando o coletor semi-aberto estático é utilizado (LARA CABEZAS & TRIVELIN, 1990; PORT et al., 2003). A interferência do coletor, diminuindo a volatilização de amônia, deve-se às

alterações no ambiente no interior da câmara de medição, como a maior umidade do solo, associada à menor circulação de ar, e à diminuição da evaporação de água em relação ao ambiente externo (LARA CABEZAS & TRIVELIN, 1990).

Os resultados deste trabalho indicam que, apesar do coletor semi-aberto estático subestimar as perdas de N, ele pode ser útil à comparação da volatilização de amônia entre diferentes tratamentos, sob condições semelhantes de solo e de clima. Todavia, deve-se tomar cuidado na interpretação dos resultados obtidos, especialmente quando eles forem utilizados na estimativa do balanço de N no sistema solo-planta.

3.4.2. Deslocamento de nitrato no perfil do solo

O deslocamento de nitrato no perfil do solo ocorreu rapidamente após a aplicação do N-uréia, atingindo a camada de 10 a 30 cm de solo na primeira semana da aplicação da adubação nitrogenada (Figuras 20a, 20c e 20e), independente da época de aplicação de N-uréia. Aproximadamente, um mês após a aplicação do N-uréia, na pré-semeadura (Figura 20b) e em cobertura (Figura 20f), a quantidade de nitrato encontrada nos tratamentos com N-uréia diminuiu para valores semelhantes aos tratamentos sem N.

A uréia aplicada no solo sofre, em poucos dias, uma reação de hidrólise enzimática que resulta na liberação de amônia (NH_3) (SENGIK & KIEHL, 1995a; RODRIGES & KIEHL, 1986; LARA CABEZAS et al., 1997a e RECOUS & MACHET, 1999), a qual é rapidamente oxidada para nitrato (NO_3^-), que é a forma predominante de N mineral em solos bem drenados. O nitrato, que é fracamente adsorvido aos colóides do solo, devido à baixa energia de adsorção, principalmente em solos tropicais, com predominância de cargas negativas, tende a permanecer livre na solução

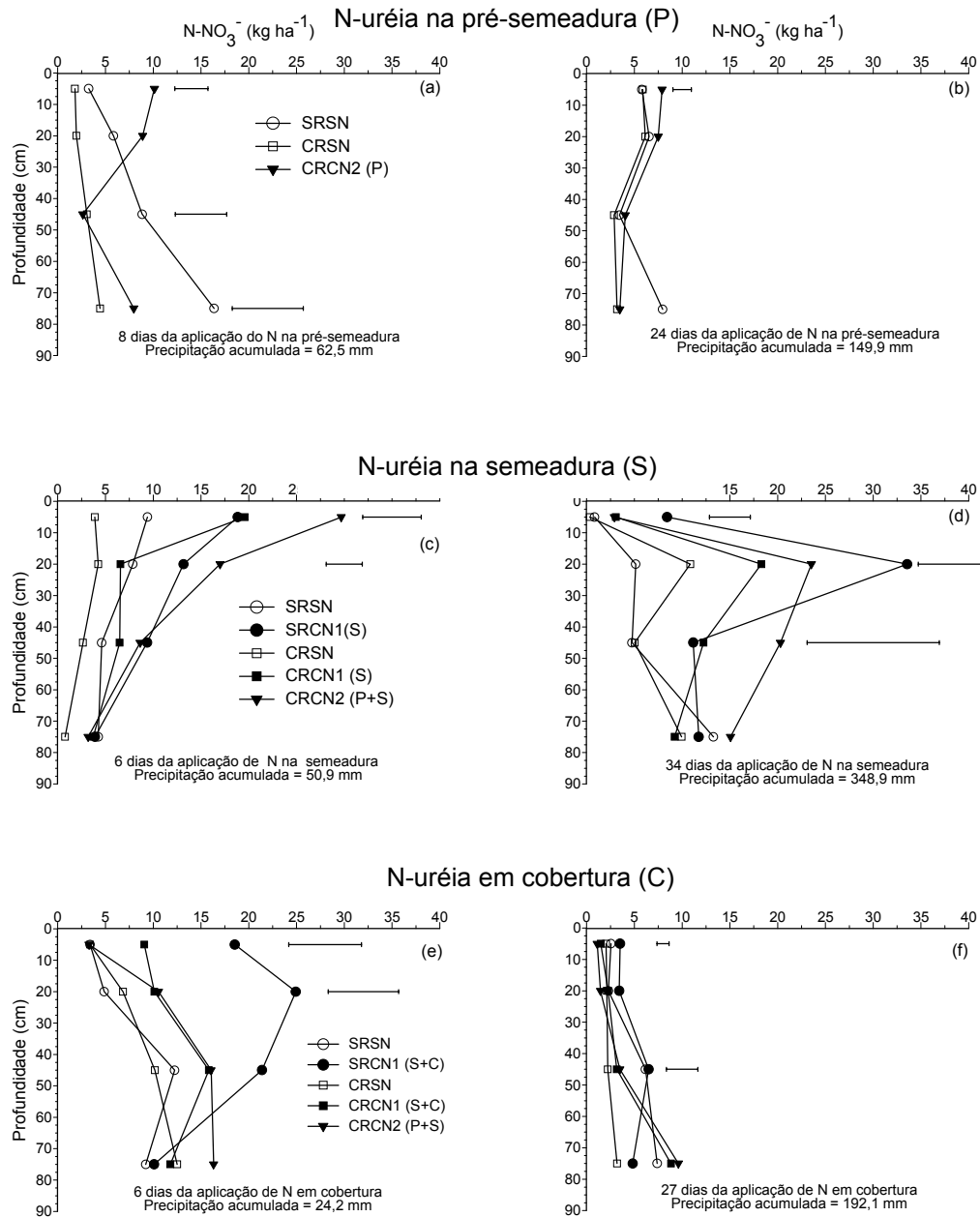


Figura 20. Distribuição de nitrato (N-NO_3^-) no perfil do solo (0 a 90 cm), nos tratamentos sem (SN) e com aplicação de N-uréia na semeadura e em cobertura do milho (CN1), na pré-semeadura e na semeadura (CN2), na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais. As barras horizontais indicam a diferença mínima significativa (Tukey 5%).

do solo, sendo facilmente carregado pelo movimento de água no solo (MOREIRA & SIQUEIRA, 2002). Essa dinâmica explica a rápida descida do nitrato na camada de 10 a 30 cm no presente trabalho.

A quantidade acumulada de água das chuvas, ocorridas entre a aplicação do N-uréia e a avaliação subsequente (Figura 20) e a umidade do solo, imediatamente antes da precipitação, podem ter proporcionado fluxos diferenciados de água no solo e, conseqüentemente, o deslocamento diferenciado do nitrato entre as épocas de aplicação do N-uréia e entre os tratamentos com e sem resíduos culturais.

Nos tratamentos com resíduos culturais (CRCN1), aos 6 dias da aplicação de N-uréia na semeadura e em cobertura (Figuras 20c e 20e) e aos 34 dias da aplicação de N-uréia na semeadura (Figura 20d), a quantidade de nitrato foi menor na camada de 10 a 30 cm, em relação à ausência dos resíduos culturais (SRCN1). A contribuição do C orgânico dos resíduos culturais, na imobilização de N pelos microrganismos heterotróficos do solo, na camada de zero a 10 cm (Capítulo II), deve ter contribuído para a diminuição do nitrato e reduzido o seu deslocamento para a camada de 10 a 30 cm.

Nas camadas de solo abaixo de 30 cm de profundidade, houve maior deslocamento de nitrato no tratamento sem resíduos culturais somente na primeira avaliação realizada após o manejo da aveia (Figura 20a). Destaca-se que o nitrato deslocado foi no tratamento sem resíduos culturais e sem N (SRSN). Isso se deve a ausência de plantas de aveia, no outono/inverno, nos tratamentos sem resíduos culturais, para absorver o N mineral resultante da mineralização da matéria orgânica do solo. A presença de plantas, em fase vegetativa, para reciclar o N mineral do solo, é uma prática imprescindível para diminuir o seu deslocamento no perfil do solo. A quantidade acumulada de 67 kg ha^{-1} de N, na parte aérea e raízes da aveia, poderia ter permanecido no solo sujeita a perdas, não apenas por lixiviação, mas também por volatilização de amônia e por desnitrificação.

Após a semeadura do milho (24 dias após o manejo da aveia), abaixo da camada de 10 a 30 cm, não houve diferença na quantidade de nitrato entre os tratamentos com e sem resíduos culturais (Figuras 20c, 20d, 20e e 20f). Isso mostra que a imobilização N pelos microrganismos heterotróficos do solo e a absorção de N pelas plantas de milho exercem influência nas camadas superficiais do solo e são capazes de reduzir o deslocamento de nitrato. Se houve deslocamento de nitrato abaixo da profundidade de 30 cm, não foi possível detectá-lo, devido à frequência de amostragens realizadas. Quanto menor o intervalo de tempo entre cada coleta, melhor é traçado o destino do nitrato no perfil.

O deslocamento de nitrato em profundidade pode caracterizar perda de N por lixiviação se o mesmo ultrapassar a zona de absorção de N pelo sistema radicular das culturas, podendo atingir o lençol freático. Embora não se possa afirmar que o nitrato tenha se deslocado para além da zona radicular da cultura do milho, é possível inferir pelos resultados que o potencial de lixiviação de nitrato foi maior na ausência de resíduos culturais de aveia.

A aplicação de N-uréia na pré-semeadura sobre os resíduos culturais (CRCN2), em relação ao tratamento sem N-uréia (CRSN), não aumentou a quantidade de nitrato no solo abaixo da camada de 10 a 30 cm, no período do manejo da aveia até a semeadura do milho (Figuras 20a e 20b). Provavelmente, a maior imobilização de N na fase inicial de decomposição dos resíduos culturais da aveia foi capaz de reter o N na camada superficial do solo. No entanto, foi encontrada, após a aplicação do N-uréia na semeadura do milho, uma maior taxa de nitrificação do amônio da uréia, na camada de zero a 10 cm, no tratamento que recebeu anteriormente a adubação nitrogenada na pré-semeadura (CRCN2), em relação ao tratamento que foi aplicado N-uréia somente na semeadura (CRCN1) (Tabela 8). O aumento da taxa de nitrificação do amônio, de 2,4 kg ha⁻¹ dia⁻¹ no tratamento CRCN1 para 3,9 kg ha⁻¹ dia⁻¹ no tratamento CRCN2, pode favorecer o deslocamento de N. Isso se justifica por ser o nitrato mais facilmente deslocado em relação ao amônio (WANG & ALVA,

2000). Apesar disso, não houve maior deslocamento de nitrato abaixo da camada de 10 a 30, tanto na avaliação realizada aos 6 dias da semeadura (Figura 20c) como nas avaliações realizadas posteriormente (Figuras 20d, 20e e 20f), mesmo com precipitações de 349 mm no período de 24 dias da aplicação do N-uréia na semeadura (Figura 20d).

Tabela 8. Quantidade de nitrato no solo, na camada de zero a 10 cm de profundidade, antes e após a semeadura do milho, no tratamento que recebeu o N-uréia somente na semeadura (CRCN1) e no tratamento que recebeu N-uréia na pré-semeadura e na semeadura (CRCN2) e as suas respectivas taxas de nitrificação do amônio da uréia

Tratamentos	Quantidade de N-NO ₃ ⁻ (kg ha ⁻¹)		Taxa de nitrificação ⁽²⁾ (kg ha ⁻¹ dia ⁻¹)
	Imediatamente antes da aplicação do N-uréia na semeadura (t ₀)	Após 6 dias da aplicação do N-uréia na semeadura (t ₁)	
CRCN1	6,2 a ⁽¹⁾	20,6 b	2,4 b
CRCN2	8,2 a	31,3 a	3,9 a

⁽¹⁾ Médias não seguidas pela mesma letra diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro. ⁽²⁾ Taxa de nitrificação = (t₁-t₀)/intervalo de tempo

A antecipação da adubação de cobertura para a pré-semeadura, apesar de não aumentar o deslocamento de nitrato abaixo da camada de 10 a 30 cm, é uma prática de risco, pois aumenta o potencial de perda de nitrato por lixiviação, devido ao aumento da taxa de nitrificação do N da uréia aplicada na semeadura, associada à pequena taxa de absorção de N pelas plantas de milho nos estádios iniciais de desenvolvimento da cultura.

3.4.3. Deslocamento de N no solo derivado da uréia marcada com ^{15}N

A partir dos resultados relativos ao N retido no perfil do solo, derivado da uréia marcada com ^{15}N (Nsdu), em 8 camadas, até a profundidade de 120 cm, na maturação fisiológica do milho, também foi possível inferir sobre o deslocamento de N no perfil do solo (Figuras 21 e 22). As maiores quantidades de Nsdu foram encontradas nas duas primeiras camadas de solo (0 a 10 e 10 a 20 cm), o que corrobora os dados da literatura, mostrando que, no final do ciclo das culturas, o N derivado da adubação nitrogenada fica retido em maior quantidade na camada superficial do solo (KITUR et al., 1984; OLSON, 1980; COELHO et al., 1991; REDDY & REDDY, 1993; LARA CABEZAS et al., 2000; OLIVEIRA et al., 2003).

Na presença de resíduos culturais, houve diferença na quantidade de Nsdu entre as épocas de aplicação de N-uréia, somente na camada superficial do solo, com maiores valores quando o N-uréia foi aplicado na pré-semeadura do milho (CRCN2-A), seguido da semeadura (CRCN1-A) e em cobertura (CRCN1-B) (Figura 21). A maior imobilização de N pelos microrganismos do solo (Capítulo II), devido à maior quantidade de C orgânico disponibilizado pelos resíduos culturais da aveia, na fase inicial de decomposição (Capítulo I), deve ser a causa da maior retenção do Nsdu na camada superficial do solo.

Nas camadas subsuperficiais, abaixo de 10 cm, não houve diferença na quantidade de Nsdu entre as épocas de aplicação de N-uréia sobre os resíduos culturais, mesmo com aplicação de N-uréia na pré-semeadura (Figura 21). Esperava-se que, no período de ausência de plantas de milho para absorver o N, derivado da adubação nitrogenada de pré-semeadura, haveria maior quantidade de Nsdu em profundidade, mesmo com maior imobilização de N na fase inicial de decomposição. Isso porque, nas avaliações periódicas de nitrato no perfil do solo, sem o uso

de ^{15}N , houve maior deslocamento de nitrato até a camada de 10 a 30 cm no primeiro mês após a semeadura do milho (Figura 20).

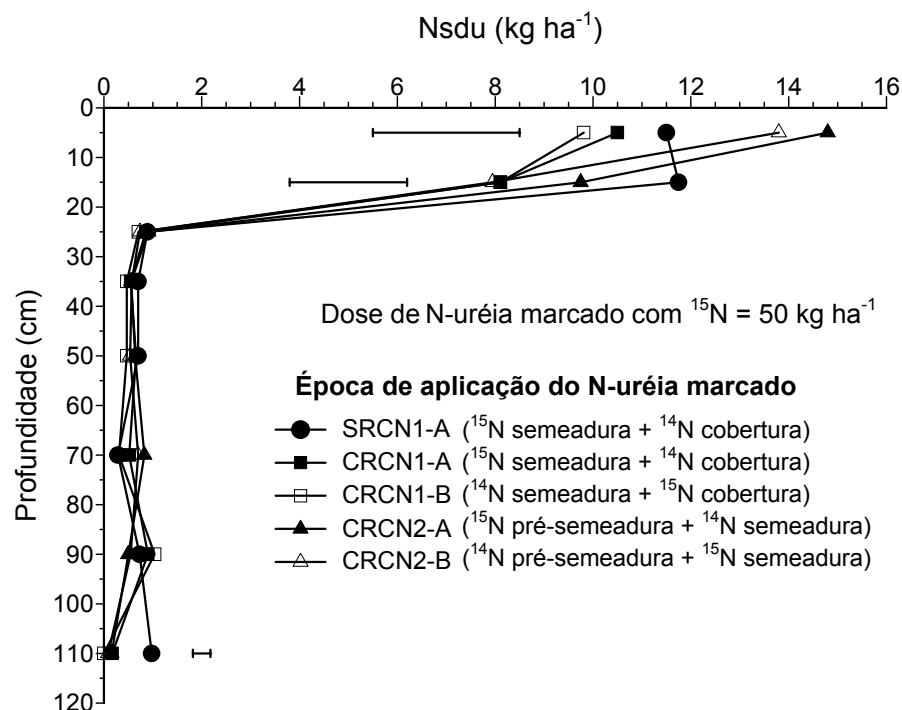


Figura 21. Distribuição do N no solo derivado da uréia marcada com ^{15}N (Nsd), na camada de zero a 120 cm, na maturação fisiológica do milho, com aplicação individual de 50 kg ha^{-1} de N-uréia marcado na pré-semeadura, semeadura e em cobertura, na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais. As barras horizontais indicam a diferença mínima significativa (Tukey 5%).

O deslocamento de Nsd em profundidade, no perfil do solo, não foi maior com a aplicação de N-uréia na pré-semeadura, mesmo com precipitações pluviométricas acima da média (Figura 2). Isso se deve à quantidade de N mineral que restou no solo proveniente do N-uréia aplicada nesta época. Dos 50 kg ha^{-1} de N-uréia aplicados, 21,2 % do N foi perdido por volatilização ($8,1 \text{ kg ha}^{-1}$) e 22,4 % do N foi imobilizado na fração orgânica do solo ($11,2 \text{ kg ha}^{-1}$). Sem contabilizar as perdas de N por desnitrificação, restaram, no máximo, $30,7 \text{ kg ha}^{-1}$ de N mineral no

solo. Possivelmente, esta quantidade de N mineral não foi suficiente para contribuir para o deslocamento de Nsdu nas diferentes camadas de solo.

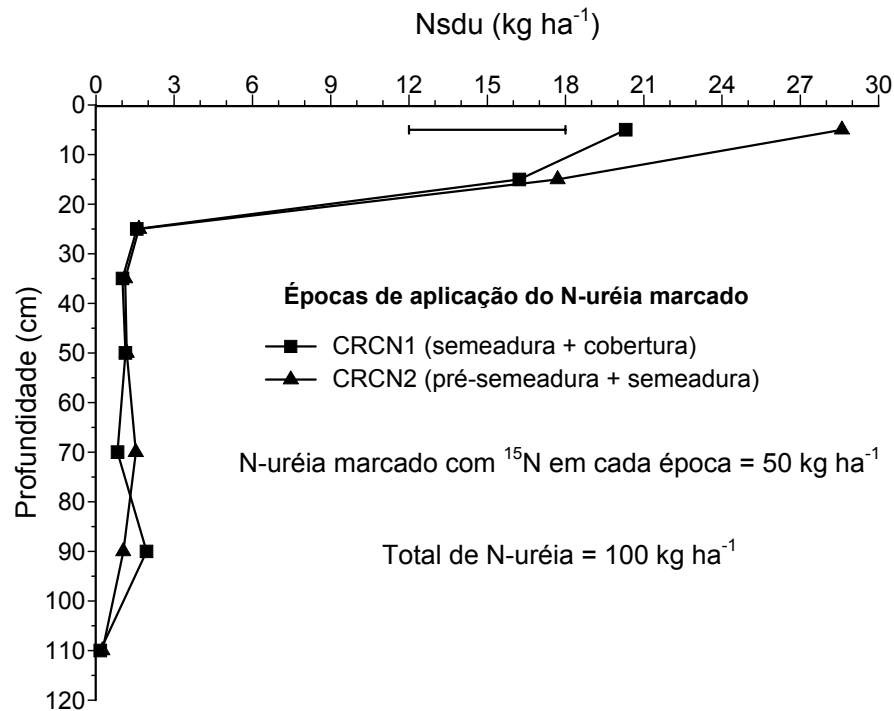


Figura 22. Distribuição do N no solo derivado da uréia marcada com ^{15}N (Nsdu), na camada de zero a 120 cm, na maturação fisiológica do milho, com aplicação de 100 kg ha^{-1} de N-uréia sobre os resíduos culturais de aveia (CR), dividido em duas épocas: semeadura e em cobertura (CN1), pré-semeadura e na semeadura (CN2). As barras horizontais indicam a diferença mínima significativa (Tukey 5%).

As quantidades de Nsdu abaixo de 20 cm, nos tratamentos com resíduos culturais, foram constantes e inferiores a $1,0 \text{ kg ha}^{-1}$ por camada (Figura 21). Na camada de 100 a 120, não foi encontrado Nsdu no tratamento com N-uréia em cobertura, e as quantidades de Nsdu foram inferiores a $0,2 \text{ kg ha}^{-1}$ quando o N-uréia foi aplicado na pré-semeadura ou na semeadura do milho. Tais resultados indicam que, provavelmente, houve pouco deslocamento de N abaixo de 120 cm de profundidade, o que permite inferir que o potencial de lixiviação de nitrato foi baixo durante

o ciclo da cultura do milho, mesmo com aplicação de 100 kg ha^{-1} de N-uréia sobre os resíduos culturais (Figura 22).

Observa-se que a soma do N_{sdu}, nas camadas de 20 a 120 cm, nos tratamentos com resíduos culturais e com aplicação de 100 kg ha^{-1} de N-uréia, foi em média de $6,7 \text{ kg ha}^{-1}$, na maturação fisiológica do milho (Figura 22). Como esta quantidade está abaixo de 20 cm de profundidade, deve-se implantar uma cultura em sucessão, imediatamente após a colheita do milho, para possibilitar a absorção de parte do N_{sdu} e reduzir a sua perda por lixiviação.

A quantidade de N_{sdu}, abaixo da camada de 10 a 20 cm, foi praticamente constante, indicando que o horizonte B textural não impediu o deslocamento de N. É importante salientar que as quantidades de N_{sdu} deslocadas até a profundidade de 120 cm podem ser devidas aos fluxos preferenciais de água no perfil do solo e também ao transporte pelas próprias raízes, pois houve crescimento de raízes em todas as camadas de solo. Na análise do solo para quantificar o N_{sdu}, pode ter havido contribuição do N derivado da uréia, que foi eliminado junto com os exudatos das raízes, e também com a contaminação do solo com raízes finas, devido à dificuldade de sua separação do solo.

A maior parte do N retido no solo, derivado da uréia marcada com ^{15}N , na camada de zero a 10 cm, na maturação fisiológica do milho, encontra-se na forma de N mineral (Capítulo II - Tabela 6), com 51% ($10,0 \text{ kg ha}^{-1}$) de N mineral em relação ao total de N_{sdu} no tratamento CRCN1 e 75% ($21,1 \text{ kg ha}^{-1}$) no tratamento CRCN2.

As diferentes quantidades de N mineral no solo, na maturação fisiológica do milho, provavelmente, sejam resultantes da remineralização do N imobilizado da uréia e da baixa absorção de N pelas plantas no final do ciclo da cultura. Esses dados reforçam a importância de implantar, imediatamente após a colheita do milho, uma cultura em sucessão ao milho para aproveitar o N residual do solo proveniente da adubação nitrogenada ou da mineralização da matéria orgânica do solo. Isso

evitaria, após a colheita do milho, o deslocamento do nitrato em profundidade no perfil do solo, diminuindo o seu potencial de perda.

Na ausência de resíduos culturais (SRCN1-A), houve maior quantidade de N_{sdu} na camada de 10 a 20 cm, em relação à presença de resíduos culturais (CRCN1-A) (Figura 21). Isso contradiz a hipótese de que a presença de resíduos culturais na superfície do solo não influencia no deslocamento de nitrato. A maior imobilização de N na camada superficial do solo, na presença de resíduos culturais (Capítulo II), deve ter contribuído para reduzir o deslocamento de N em profundidade. Já nas camadas abaixo de 20 cm, houve maior quantidade de N_{sdu} no tratamento sem resíduos culturais somente na camada de 100 a 120 cm. Apesar de não existir diferença significativa entre os tratamentos com e sem resíduos culturais nas camadas entre 20 e 100 cm, existe um maior potencial de perda de N por lixiviação na ausência de resíduos culturais. No entanto, não se pode estimar quanto do N derivado da uréia foi deslocado abaixo da camada de 100 a 120 cm.

Para avaliar o deslocamento do N proveniente da adubação nitrogenada, devem ser realizadas as coletas de solo em intervalos de tempo o mais próximos possível, em diferentes profundidades, analisando-se a sua concentração e a respectiva contribuição do N da uréia marcada com ¹⁵N. Outra maneira de avaliar o deslocamento de nitrato no perfil do solo consiste na coleta da solução do solo e na determinação da concentração de nitrato e o excesso de ¹⁵N na solução. O nitrato lixiviado é estimado pelo volume de água drenado no perfil do solo em cada intervalo de coleta e a sua respectiva concentração de nitrato. Usando essa metodologia, REICHARDT et al. (1979) encontraram 0,4 kg ha⁻¹ de N lixiviado derivado da aplicação de 80 kg ha⁻¹ de sulfato de amônio e MEIRELLES et al. (1980) 1,35 kg ha⁻¹ com 100 kg ha⁻¹ de sulfato de amônio. No trabalho de NORMAND et al. (1997), com a aplicação de 160 kg ha⁻¹ de nitrato de amônio, 2,1 kg ha⁻¹ de nitrato foram lixiviados.

Os resultados de lixiviação de N podem não ser precisos com a coleta de amostras de solo ou de solução em profundidade (LARA

CABEZAS et al., 2000). Em microparcelas não confinadas, pode ocorrer dispersão do N marcado e, mesmo com confinamento, existe a possibilidade de haver drenagem lateral e subsuperficial, o que dificultaria uma amostragem representativa.

A quantidade de N lixiviado no perfil do solo também pode ser estimada por meio do balanço de N no sistema solo-planta. Nesse caso, é necessário quantificar a acumulação de N proveniente da uréia nas plantas, a quantidade de N retido no solo e as perdas gasosas de N por volatilização e por desnitrificação. Como no presente trabalho, não foram determinadas as perdas de N por desnitrificação, a quantidade de N proveniente da uréia que não foi recuperada no sistema solo-planta foi atribuída às perdas de N por lixiviação e por desnitrificação, não sendo possível separá-las (Figura 23). Os valores encontrados não diferiram entre os tratamentos, variando de 4,5 a 9,3 kg ha⁻¹.

É importante ressaltar que a maior umidade do solo proporcionada pelos resíduos culturais dispostos na superfície do solo no sistema plantio direto e a maior densidade do solo em função do não revolvimento e do tráfego de máquinas condicionam o aparecimento de sítios com menor concentração de O₂. Essa condição, associada à maior disponibilidade de C orgânico, pode aumentar a atividade das bactérias quimioheterotróficas anaeróbicas facultativas e proporcionar perdas significativas de N por desnitrificação. As perdas de N por desnitrificação no sistema plantio direto situam-se, normalmente, na faixa de 2 a 10 kg ha⁻¹ de N-N₂O (BURFORD et al., 1981; ROZAS et al., 2001).

Somando-se as perdas de N volatilização de amônia, que não foram contabilizadas pelo fato do coletor semi-aberto estático subestimá-las, em média de 28% (LARA CABEZAS & TRIVELIN, 1990; PORT et al., 2003) e as perdas de N por desnitrificação, pode-se inferir que é pequena a contribuição do N não recuperado pelo método do balanço na quantidade de N da uréia deslocado abaixo da camada de 100 a 120 cm. A dose N-uréia aplicada e o seu parcelamento devem ter contribuído para a pequena quantidade de N lixiviado. Com a aplicação de 60 kg ha⁻¹ de N-

uréia, na superfície e sem incorporação ao solo, a quantidade N lixiviado estimado pelo balanço de N foi $2,2 \text{ kg ha}^{-1}$ (COELHO et al., 1991). No trabalho de YAMADA & ABDALLA (2000), a aplicação de 90 kg ha^{-1} de N não causou perda de N por lixiviação.

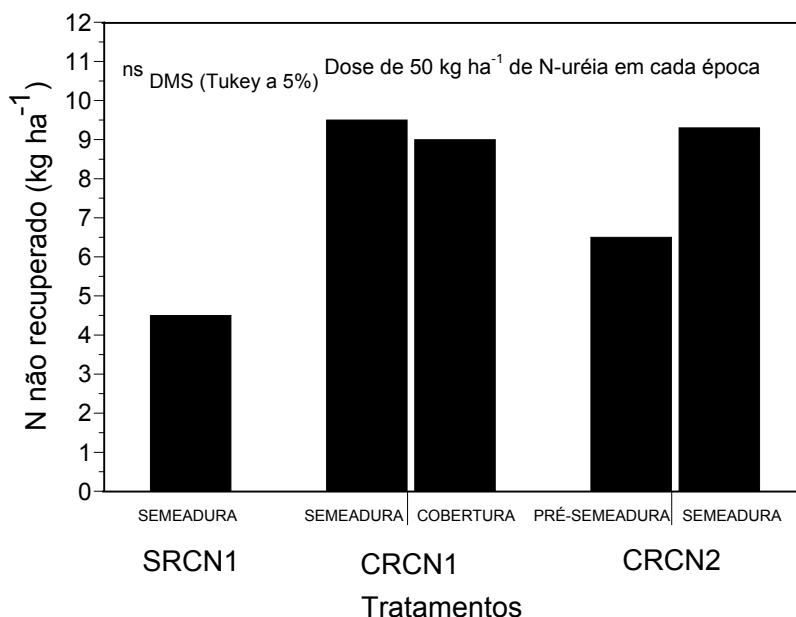


Figura 23. N não recuperado por meio do balanço de N no sistema solo-planta-atmosfera, na maturação fisiológica do milho, com aplicação de N-uréia na semeadura e em cobertura (CN1), na pré-semeadura e na semeadura (CN2), na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais. DMS: diferença mínima não significativa (Tukey 5%).

A idéia generalizada de que a lixiviação de nitrato é alta, principalmente em solos arenosos com alta permeabilidade, associada a altas precipitações pluviométricas, não se confirmou no presente trabalho, mesmo com a antecipação da adubação nitrogenada para a pré-semeadura do milho.

3.5. CONCLUSÕES

- Os resíduos culturais de aveia dispostos na superfície do solo diminuíram a volatilização de amônia somente quando eles proporcionaram maior umidade do solo, em relação à aplicação do N-uréia diretamente sobre o solo descoberto.
- A presença dos resíduos culturais de aveia reduziu o deslocamento de nitrato no perfil do solo.
- As épocas de aplicação de N-uréia no milho sobre os resíduos culturais de aveia não influenciaram no deslocamento de nitrato nas camadas de solo abaixo de 30 cm de profundidade.
- O deslocamento de N, na camada de 100 a 120 cm de profundidade, foi baixo, indicando baixo potencial de perda de nitrato por lixiviação, com aplicação de 100 kg ha^{-1} de N-uréia, parcelado em duas épocas, sobre os resíduos culturais de aveia, no sistema plantio direto.

4. Capítulo IV – DINÂMICA DO CARBONO E DO NITROGÊNIO COM O USO DE URÉIA, NA SUCESSÃO AVEIA PRETA/MILHO, NO SISTEMA PLANTIO DIRETO: IV. Acúmulo de nitrogênio e produção de milho

4.1. RESUMO

A presença de resíduos culturais na superfície do solo, no sistema plantio direto, exerce uma forte interação na dinâmica do C e do N e pode afetar a resposta do milho à estratégia da adubação nitrogenada empregada. Normalmente, o aproveitamento do N da adubação nitrogenada pelo milho, no sistema plantio direto, é baixo quando cultivado sobre gramíneas com alta relação C/N. A época de aplicação de N é uma alternativa que vem sendo estudada para aumentar a eficiência da adubação nitrogenada, quando o milho é cultivado sobre estas plantas de cobertura do solo. Com o objetivo de avaliar a eficiência da adubação nitrogenada e a produção de milho, no sistema plantio direto, cultivado sobre resíduos culturais de aveia, em diferentes épocas de aplicação de N no milho, conduziu-se um experimento a campo, em 2002/03, na UFSM (RS), em um Argissolo Vermelho distrófico arênico. Os tratamentos foram: 1) sem resíduos culturais e sem N (SRSN); 2) sem resíduos culturais e com N na semeadura e em cobertura (SRCN1); 3) com resíduos culturais e sem N (CRSN); 4) com resíduos culturais e com N na semeadura e em cobertura (CRCN1) e 5) com resíduos culturais e com N na pré-semeadura e na semeadura (CRCN2). O N foi aplicado, na forma de uréia, nas doses de 50 kg ha⁻¹ em cada época, totalizando 100 kg ha⁻¹, a lanço sobre os resíduos culturais da aveia. No centro das parcelas, foram demarcadas microparcelas e aplicada uréia marcada com 2,8 % de átomos de ¹⁵N em excesso. Na maturação fisiológica do milho, foram coletadas plantas e raízes de milho, e determinadas as quantidades acumuladas de N. As raízes foram coletadas em trincheiras, no centro das

microparcelas, em um volume de solo equivalente a uma planta de milho, nas camadas de zero a 10; 10 a 20; 20 a 30; 30 a 40; 40 a 60; 60 a 80; 80 a 100 e 100 a 120 cm. A presença dos resíduos culturais de aveia reduziu a produção de matéria seca, acumulação de N e rendimento de grãos de milho. Na presença dos resíduos culturais, o milho recuperou 22 % do N da uréia quando foram aplicados 100 kg ha^{-1} de N-uréia, metade na semeadura e o restante em cobertura e 15 % quando foram aplicadas as mesmas doses na pré-semeadura e semeadura. A baixa recuperação de N da uréia pelo milho, independente da época de aplicação do N-uréia, não está relacionada às perdas de N por lixiviação. A antecipação da adubação nitrogenada de cobertura para a pré-semeadura diminuiu o aproveitamento de N e a produção de grãos de milho.

4.2. INTRODUÇÃO

O nitrogênio é um dos nutrientes absorvidos em maior quantidade pela cultura do milho, e também pode ser o mais limitante para a ela. A disponibilidade deste nutriente no solo está relacionada, entre outros fatores, com a relação carbono/nitrogênio (C/N) dos resíduos culturais, principalmente no sistema plantio direto, em que eles permanecem na superfície do solo. Nessas condições, pode ocorrer deficiência N para o milho quando cultivado sobre resíduos culturais com alta relação C/N, devido à imobilização do N pelos microrganismos do solo (SALET et al., 1997; LARA CABEZAS et al., 2000; LARA CABEZAS, 2001).

A época de aplicação da adubação nitrogenada pode influir na quantidade de N mineral no solo na época de maior demanda pela cultura do milho e influenciar o seu aproveitamento. No Brasil, a partir do trabalho de SÁ (1996), vários estudos foram realizados com o objetivo de aumentar a produtividade de milho com a aplicação da adubação nitrogenada antes da semeadura do milho, seja no manejo da aveia ou logo após, chamada de adubação de pré-semeadura. A justificativa da adubação antecipada

está embasada na imobilização pelos microrganismos do solo do N aplicado na pré-semeadura, devido à presença dos resíduos culturais e posterior remineralização do N que foi imobilizado, disponibilizando o N na forma mineral na época de maior demanda pela cultura do milho.

A maioria dos resultados desses trabalhos mostra que a antecipação da adubação nitrogenada, em condições de precipitação pluviométrica acima da média, pode diminuir a produção de grãos e, em condições de precipitação pluviométrica abaixo da média, não há diferença na produção de grãos (BASSO & CERETTA, 2000; PÖTKER & WIETHÖLTER, 2000; CANTARELLA et al., 2003).

No sistema plantio direto, em que os resíduos permanecem na superfície do solo, há forte interação entre as dinâmicas do C e do N, o que pode afetar a resposta do milho à estratégia de adubação nitrogenada empregada. O presente trabalho foi conduzido com o objetivo de avaliar a eficiência da adubação nitrogenada no milho, cultivado sobre resíduos culturais de aveia, variando a época de aplicação do N.

4.3. MATERIAL E MÉTODOS

4.3.1. Acumulação de matéria seca e de N pela parte aérea do milho

As coletas de plantas de milho (cinco por parcela), para avaliação da curva de produção de matéria seca e de acúmulo de N da parte aérea, durante o ciclo da cultura, foram realizadas em sete épocas: aos 34, 48, 61, 74, 88, 104 e 134 dias após a semeadura. Aos 138 dias após a semeadura do milho (maturação fisiológica), as plantas coletadas foram separadas em palhada (folhas, caules, sabugo e palha da espiga) e grãos. A determinação da matéria seca das plantas de milho ou de cada componente da planta foi realizada após secagem em estufa a 65°C, até

massa constante. No material, seco e moído, foi analisada a concentração de N total (TEDESCO et al., 1995).

4.3.2. Produção de matéria seca e acumulação de N nas raízes do milho

A produção de matéria seca e a acumulação de N nas raízes, foram realizadas somente nas microparcelas dos tratamentos que receberam ^{15}N -uréia (SRCN1, CRCN1 e CRCN2). Foram abertas trincheiras, até a profundidade de 150 cm, coletando-se um volume de solo equivalente ao ocupado por uma planta de milho (45 cm de cada lado da linha e 20 cm na linha), em oito camadas (0 a 10, 10 a 20, 20 a 30, 30 a 40, 40 a 60, 60 a 80, 80 a 100 e 100 a 120 cm). Para separação das raízes do solo, foram utilizados jatos de água sobre uma peneira de malha de 2 mm. As raízes foram secas em estufa a 65°C, até massa constante, e moídas para determinação da concentração de N total (TEDESCO et al., 1995).

4.3.3. Acumulação de N derivado da uréia pelas plantas de milho

A quantidade de N acumulado nas plantas de milho, derivado da uréia marcada (Npdu), foi determinada na maturação fisiológica do milho, separadamente, na palhada (folha, caules, sabugo e palha da espiga), nos grãos e nas raízes. As amostras dos diferentes componentes das plantas de milho, após a secagem em estufa a 65°C, até massa constante, foram moídas e quantificado o N-total (TEDESCO et al., 1995) e encaminhadas à EMBRAPA Agrobiologia (RJ), para determinar o excesso de átomos de ^{15}N (TRIVELIN et al., 1973).

A quantidade de Npdu foi calculada conforme a equação:

$$N_{pdu} = R_p * QN_{ta} \quad [7]$$

onde: Npdu = N acumulado nas plantas derivado da uréia, em kg ha⁻¹; R_p = relação entre o percentual de átomos de ¹⁵N em excesso nas plantas do milho e o percentual de átomos de ¹⁵N em excesso na uréia e N_{ta} = N total acumulado nas plantas de milho, em kg ha⁻¹.

4.3.4. Recuperação do N derivado da uréia pelas plantas de milho

A percentagem de recuperação do N derivado da uréia pelas plantas de milho foi calculada pelo método da diluição isotópica e pelo método da diferença. No método da diluição isotópica, foi utilizada a equação:

$$R_{di} (\%) = (N_{pdu}/DNU) * 100 \quad [8]$$

onde: R_{di} (%) = percentual de recuperação do N derivado da uréia marcada; Npdu = N acumulado no milho derivado da uréia, em kg ha⁻¹ e DNU: dose de N-uréia aplicado, em kg ha⁻¹.

No método da diferença, foi utilizada a equação:

$$R_{df} (\%) = (N_aCN - N_aSN)/DNU \quad [9]$$

onde: R_{df} (%) = percentual de recuperação do N-uréia; N_aCN = N acumulado no milho com aplicação de N-uréia, em kg ha⁻¹; N_aSN = N acumulado no milho sem N-uréia, em kg ha⁻¹ e DNU = dose de N-uréia aplicado, em kg ha⁻¹.

4.3.5. Produção de grãos de milho

O rendimento de grãos de milho foi avaliado nas quatro linhas centrais das parcelas, desprezando-se 0,5 m em cada extremidade das mesmas. Para expressar os resultados, determinou-se a umidade de grãos, corrigindo-a para 13%.

4.4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.4.1. Acumulação de matéria seca e de N na parte aérea do milho

A presença de resíduos culturais diminuiu a acumulação de matéria seca e N na parte aérea das plantas de milho, em relação à ausência dos resíduos culturais (Figura 24), sendo que a diferença na quantidade de N acumulado, entre os tratamentos com e sem resíduos culturais, iniciou-se aproximadamente a partir do estágio de 7 a 8 folhas (Figura 24b). No florescimento do milho, a cultura acumulou cerca de 20 kg ha⁻¹ de N a mais, quando implantada na ausência dos resíduos culturais, independentemente ou não da aplicação do N-uréia. A partir do florescimento, aumentou a diferença na quantidade de N acumulado, em favor dos tratamentos sem resíduos culturais e com a aplicação de N-uréia, chegando a 27 kg ha⁻¹ de N no estágio de milho verde (Figura 24b).

A maior quantidade de N acumulado na parte aérea do milho, nos tratamentos sem resíduos culturais, não pode ser atribuída exclusivamente à imobilização de N provocada pelos microrganismos, no processo de decomposição dos resíduos culturais da aveia. Provavelmente, ela se deve também à maior quantidade de N mineral no solo, devido à ausência de plantas de aveia para absorver o N proveniente da mineralização da matéria orgânica no outono/inverno. Quando o milho

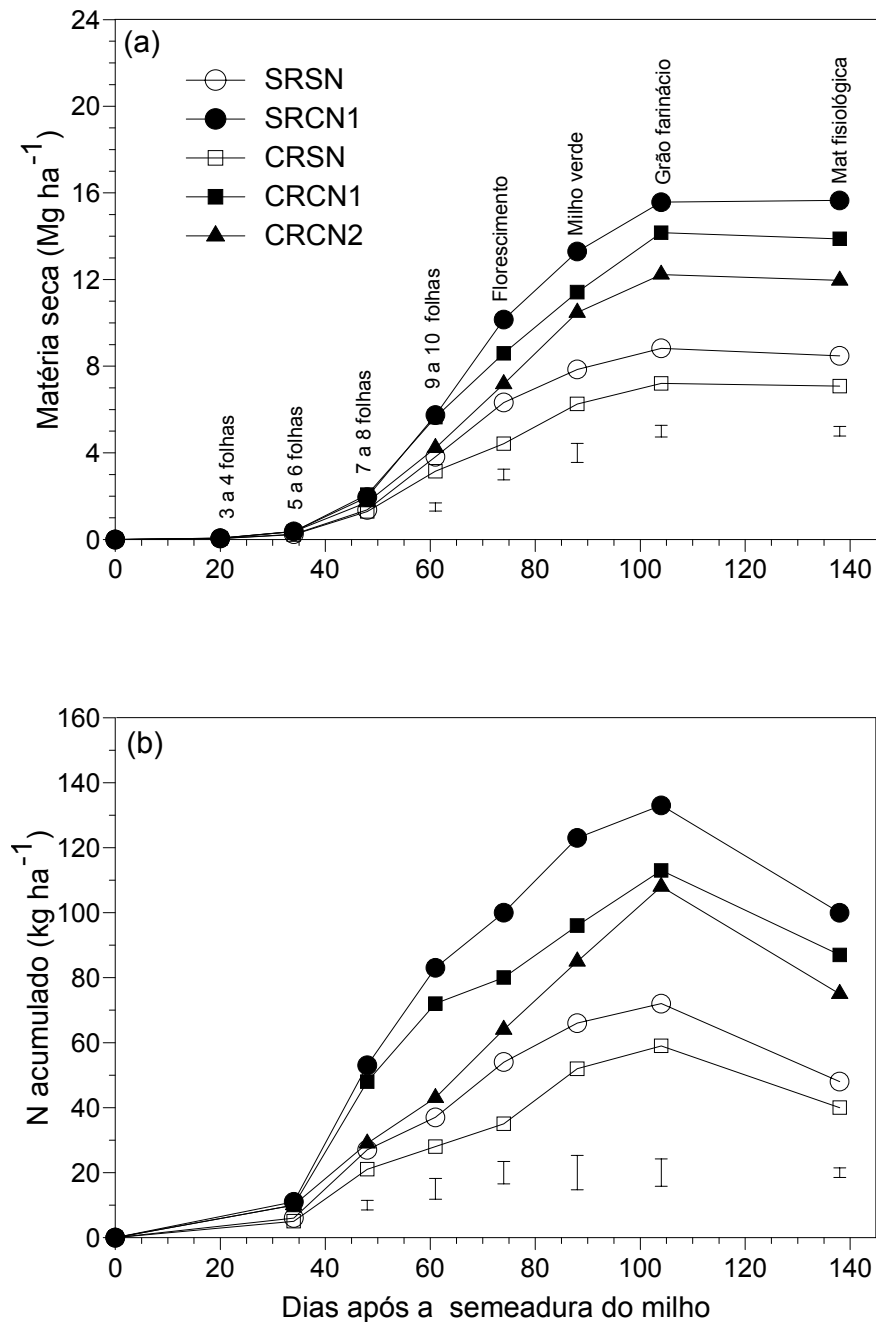


Figura 24. Curva de produção de matéria seca (a) e de N acumulado (b) pela parte aérea das plantas de milho, sem aplicação de N (SN) e com aplicação de N-uréia na semeadura e em cobertura (CN1), na pré-semeadura e na semeadura (CN2), na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais. As barras verticais indicam a diferença mínima significativa (Tukey 5%).

foi cultivado em sucessão à aveia, o N que foi acumulado nos resíduos culturais de aveia não foi mineralizado em quantidade suficiente para equivaler ao N mineral existente no solo nos tratamentos sem resíduos culturais. Alguns trabalhos mostram que as culturas cultivadas sobre resíduos culturais com alta relação C/N aproveitam muito pouco do N proveniente da sua mineralização (GAVA et al., 2003).

A antecipação da adubação nitrogenada de cobertura para a pré-semeadura do milho, na presença de resíduos culturais (CRCN2), diminuiu a acumulação de matéria seca e de N na parte aérea do milho, em relação à aplicação de N-uréia na semeadura e em cobertura (CRCN1) (Figura 24). Essa diminuição foi de 11 kg ha⁻¹ N, no estágio de 7 a 8 folhas e, de 29 kg ha⁻¹ de N, no estágio de 9 a 10 folhas.

A menor quantidade de N mineral no solo, a partir do estágio de 7 a 8 folhas, com a aplicação de N-uréia na pré-semeadura (CRCN2), em relação à utilização da mesma dose em cobertura (CRCN1), deve ter sido o fator determinante da menor acumulação de N pelas plantas de milho quando a uréia foi antecipada (Figura 24b). Isso está relacionado com a maior imobilização de N na fase inicial de decomposição dos resíduos culturais (Capítulo II).

A maior imobilização de N, na fase inicial de decomposição, é um fator positivo para a manutenção do nitrogênio nas camadas superficiais do solo. No entanto, a ausência de plantas de milho para absorver o N que não foi imobilizado, proveniente do N-uréia aplicado na pré-semeadura, favorece o seu deslocamento e pode contribuir para a contaminação do lençol freático com nitrato.

A justificativa de antecipação da adubação nitrogenada está embasada no fato de que o N imobilizado pelos microrganismos do solo, na fase inicial de decomposição dos resíduos culturais de aveia é, posteriormente, remineralizado, coincidindo com o estágio de maior demanda de N pelo milho (11 a 12 folhas) (SÁ, 1996).

Observa-se, na figura 24b, que a diferença de N acumulado entre os tratamentos CRCN1 e CRCN2 foi menor no estágio de milho verde do que nos estágios anteriores de desenvolvimento da cultura, indicando que o N remineralizado pode ter contribuído na nutrição do milho. No entanto, a quantidade de N remineralizado não foi suficiente para atender à demanda das plantas de milho, em comparação com a aplicação de N-uréia em cobertura (CRCN1), pois não houve equivalência na produção de matéria seca (Figura 24a) e N acumulado (Figura 24b) entre os tratamentos CRCN1 e CRCN2, na maturação fisiológica do milho. No Capítulo II, estimou-se que, até a maturação fisiológica do milho, foram remineralizados $8,5 \text{ kg ha}^{-1}$ de N, proveniente da aplicação de 50 kg ha^{-1} , na pré-semeadura. Talvez, uma maior dose de N-uréia na pré-semeadura aumentaria a imobilização e a remineralização (NIELSEN & JENSEN, 1986; ZAGAL & PERSSON, 1994), porém os riscos de perda de N por lixiviação, com esta prática, devem ser considerados.

Em anos de baixas precipitações pluviométricas, no período do manejo da aveia até a semeadura do milho, a aplicação de N na pré-semeadura pode aumentar ou não alterar a acumulação de N nas plantas de milho, em relação à aplicação em cobertura. A justificativa está embasada na menor imobilização de N no início do desenvolvimento do milho (BASSO & CERETTA, 2000), provavelmente devido à baixa umidade do solo, que reduz a decomposição dos resíduos culturais da aveia pelos microrganismos heterotróficos do solo.

A ocorrência de estiagens, na época de maior demanda de N pelas plantas de milho, também não altera a quantidade de N acumulada no milho, independente da época de aplicação de N-uréia, mesmo se a quantidade de N mineral no solo for maior nos estágios de maior demanda de N pela cultura (DA ROS et al., 2003).

Em anos com distribuição de chuvas acima da média, a aplicação de N na pré-semeadura diminui a acumulação de N pelas plantas de milho, em relação à aplicação em cobertura. A menor acumulação de N pela cultura do milho tem sido relacionada com a maior perda de N por

lixiviação (CANTARELLA et al., 2003). Todavia, os resultados do presente trabalho indicam que a menor acumulação de N pelo milho, na aplicação do N-uréia na pré-semeadura, foi determinada pela maior imobilização de N na fase inicial de decomposição dos resíduos culturais (Capítulo II) e não pela perda de N por lixiviação (Capítulo III).

4.4.2. Produção de matéria seca e acumulação de N nas raízes do milho

A produção de matéria seca e a acumulação de N nas raízes, avaliada nos tratamentos com N-uréia, foram diferentes somente na camada superficial do solo (0-10 cm) (Figura 25), destacando-se o tratamento sem resíduos culturais (SRCN1). Nos tratamentos com resíduos culturais, a menor produção de matéria seca e de N acumulado ocorreu com a antecipação da adubação nitrogenada (CRCN2).

Na camada de zero a 10 cm, foram encontrados, em média, 79% do total de matéria seca e 74% do total de N acumulado pelo sistema radicular do milho. No sistema plantio direto, as raízes tendem a se concentrar na camada superficial do solo em relação ao preparo convencional (MERTEN & MIELNICZUK, 1991).

Apesar de haver maiores concentrações de raízes na camada superficial do solo, foram encontradas raízes até a profundidade máxima avaliada (120 cm), sendo que a mudança textural entre os horizontes do perfil do solo não impediu o crescimento das raízes do milho. Observou-se que, nas camadas subsuperficiais, com textura mais arenosa (60-70 cm), houve menor número de raízes, porém mais grossas, enquanto nas camadas com maior teor de argila, no horizonte B textural (abaixo de ±80 cm), houve predominância de raízes mais finas. Apesar da pequena produção de matéria seca de raízes, nas camadas subsuperficiais do solo,

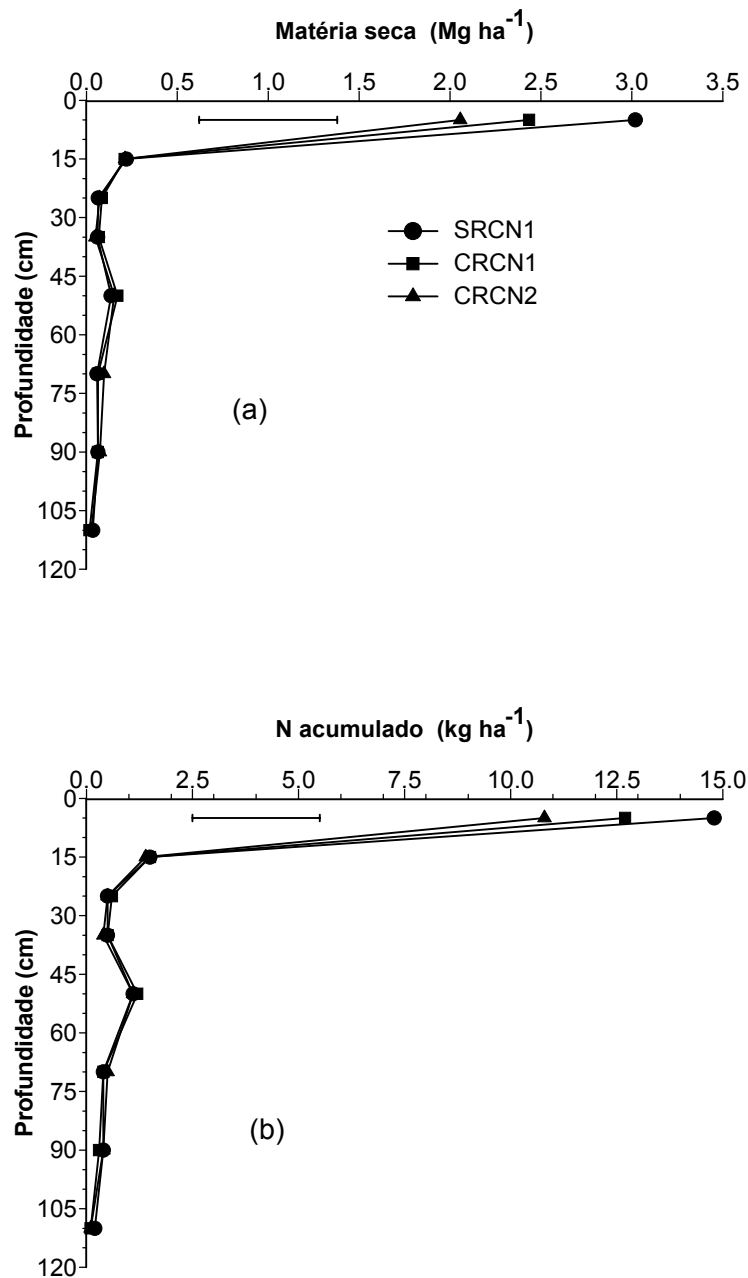


Figura 25. Produção de matéria seca (a) e N acumulado (b) nas raízes de milho (0–120 cm) com aplicação de N-uréia na semeadura e em cobertura do milho (CN1), na pré-semeadura e na semeadura (CN2), na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais de aveia na superfície do solo. As barras horizontais indicam a diferença mínima significativa (Tukey 5%).

elas são importantes na diminuição da percolação de nitrato no perfil do solo e, também, na absorção de água em períodos de déficit hídrico.

A produção total de matéria seca de raízes no perfil do solo (soma das camadas) foi de 3.660 kg ha⁻¹ no tratamento SRCN1 e de 3.114 e 2.743 kg ha⁻¹, nos tratamentos CRCN1 e CRCN2, respectivamente. Esses valores corresponderam a uma contribuição média de raízes de 19 %, em relação à quantidade total de matéria seca produzida pelo milho (parte aérea + raízes). A quantidade total de N acumulado pelas raízes, no perfil do solo (0-120cm), foi de 19 kg ha⁻¹ de N no tratamento SRCN1 e de 17 e 15 kg ha⁻¹ nos tratamentos CRCN1 e CRCN2, respectivamente, correspondendo, em média, a 16 % do total de N acumulado pelas plantas de milho (parte aérea e raízes).

4.4.3. Acumulação de N no milho derivado da uréia marcada com ¹⁵N

A quantidade de N acumulado, derivado do N-uréia marcado com ¹⁵N, na parte aérea (Figura 26) e nas raízes (Figura 27), na maturação fisiológica do milho, teve relação com a produção de matéria seca (Figuras 24 e 25).

Com a aplicação de 50 kg ha⁻¹ de N-uréia, na ausência de resíduos culturais, na semeadura do milho, a quantidade de N acumulado nas plantas de milho, derivado do N-uréia marcado com ¹⁵N (Npdu), foi superior em 18,8% em relação à presença dos resíduos culturais (Figura 26). Na presença de resíduos culturais, a maior quantidade de Npdu nas plantas de milho aconteceu com a aplicação de N-uréia em cobertura, seguida da semeadura e da pré-semeadura, tanto na palhada, como nos grãos e nas raízes.

A aplicação de 100 kg ha⁻¹ de N-uréia sobre os resíduos culturais, dividido em duas doses, de 50 kg ha⁻¹ de N-uréia, em cada época, proporcionou uma acumulação de 14,8 kg ha⁻¹ de Npdu nos tratamentos com N-uréia na pré-semeadura e semeadura (CRCN2) e de 22,2 kg ha⁻¹

de Npdu nos tratamentos com N-uréia na semeadura e em cobertura (CRCN1) (Figura 28). Como nesses tratamentos, as quantidades de N acumuladas pelas plantas de milho (palhada, grãos e raízes) foram de, respectivamente, 90,3 e 105,0 kg ha⁻¹ (Figura 24b), a contribuição do N-uréia foi de apenas 16,4 e 21,1% do total de N acumulado pelas plantas de milho.

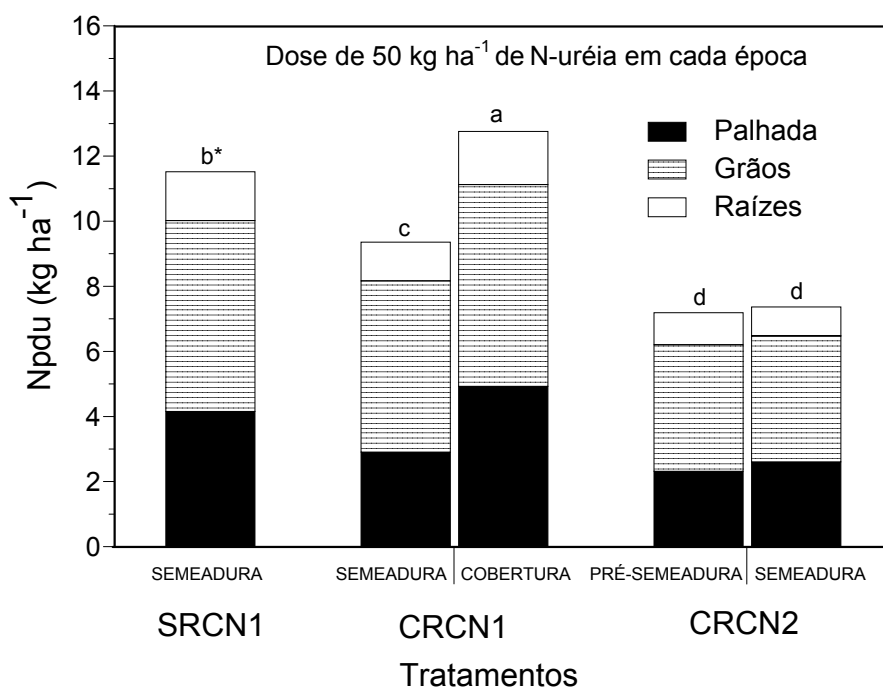


Figura 26. Quantidade de N acumulado na plantas de milho derivado do N-uréia marcado (Npdu), na maturação fisiológica, com aplicação de N-uréia na semeadura e em cobertura do milho (CN1), na pré-semeadura e na semeadura (CN2), na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais. * Tukey (p<0,05).

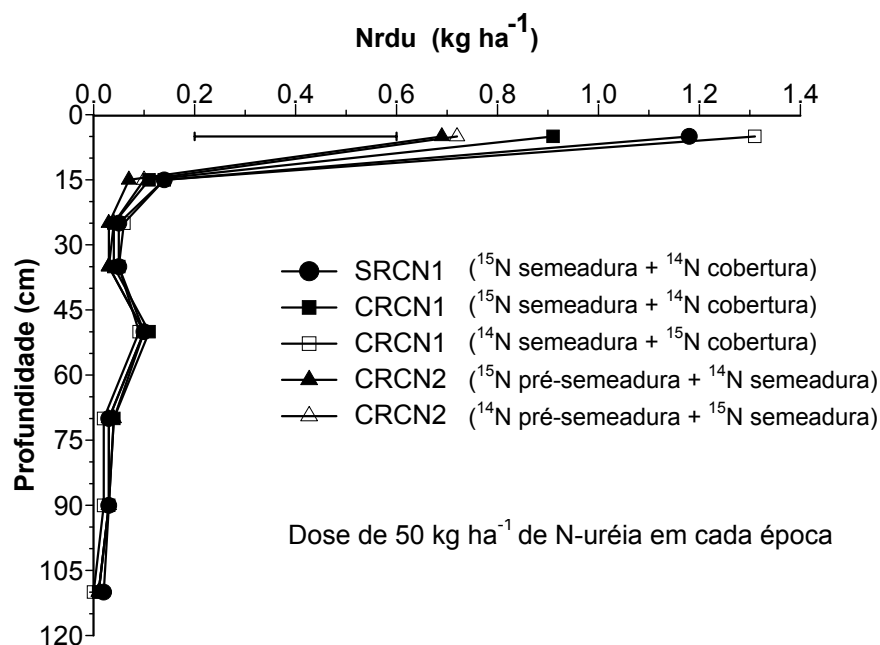


Figura 27. Distribuição do N nas raízes do milho derivado da uréia marcada com ¹⁵N (Nrdu) na camada de zero a 120 cm, na maturação fisiológica do milho, com aplicação individual de 50 kg ha⁻¹ de N-uréia na pré-semeadura, semeadura e em cobertura, na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais. A barra indica a diferença mínima significativa (Tukey 5%).

Tais resultados evidenciam que a contribuição do fertilizante nitrogenado à nutrição do milho apenas complementa a capacidade de suprimento de N total do solo, confirmando resultados de outros trabalhos no sistema plantio direto. Com a aplicação de 50 e 100 kg ha⁻¹ de N-uréia em cobertura, GAVA et al. (2002) verificaram que do total de N acumulado no milho, 15 e 30 %, respectivamente, foram provenientes da adubação nitrogenada. De modo semelhante, CANTARELLA et al. (2003) encontraram contribuição da adubação nitrogenada na nutrição do milho, cultivado em sucessão a resíduos culturais de aveia, de 19 e 28 %, com aplicação de 80 kg ha⁻¹ de N-uréia incorporado ao solo, na pré-semeadura

e em cobertura, respectivamente. Por sua vez, aplicando 80 kg ha^{-1} N-uréia em cobertura sobre resíduos culturais de milho, LARA CABEZAS et al. (2000) obtiveram 15 % de contribuição da adubação nitrogenada quando a uréia foi aplicada na superfície e 19 % quando a uréia foi incorporada ao solo.

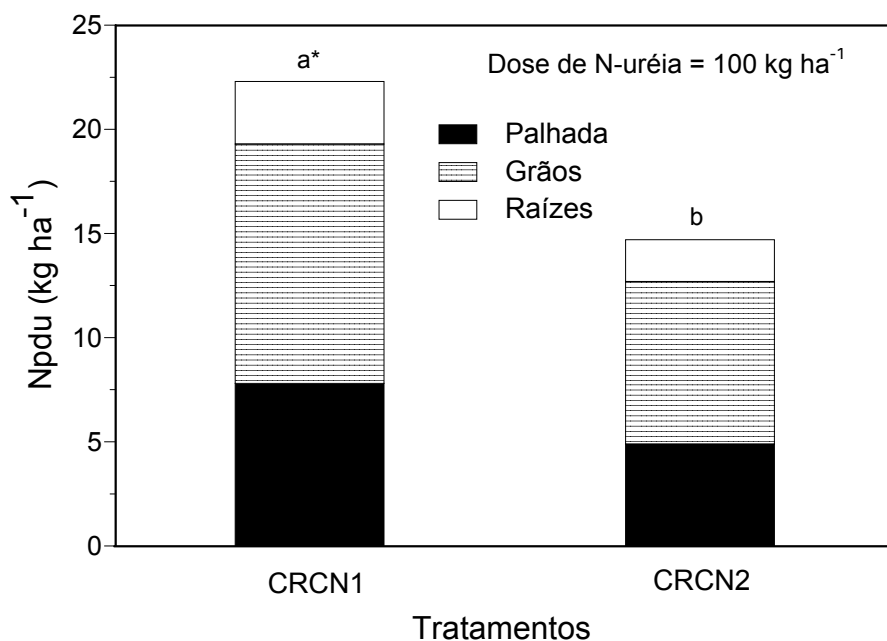


Figura 28. Quantidade de N acumulado nas plantas de milho, na maturação fisiológica, derivado da aplicação de 100 kg ha^{-1} de N-uréia marcado com ^{15}N (Npdu) sobre os resíduos culturais da aveia, dividido em duas épocas: semeadura e cobertura (CRCN1) e pré-semeadura e semeadura (CRCN2). * Tukey ($p < 0,05$).

Na região de Pernambuco, em 20 solos da zona Úmida e Semi-árida, SAMPAIO et al. (1995), estudando a contribuição da adubação nitrogenada na nutrição do sorgo, com amostras de solo indeformadas, em condições de casa de vegetação, verificaram que, apenas em dois solos, a contribuição da adubação nitrogenada foi maior que 50%. Nos demais solos, a contribuição variou de 14 a 41%. Na maioria dos solos do

Brasil, MALAVOLTA (1990) ressalta que o N nativo do solo supera o N do fertilizante na nutrição das culturas. Isso mostra a importância da matéria orgânica do solo na contribuição de N e, aparentemente, é a principal fornecedora de nitrogênio para as culturas.

Considerando os 2.373 kg ha^{-1} de C orgânico que foram mineralizados durante o ciclo do milho, provenientes da matéria orgânica do solo (Capítulo I) com relação C/N de 12, na camada de zero a 10 cm (Anexo 2), é possível estimar uma mineralização de 198 kg ha^{-1} de N ($2.373/12$). Observa-se que este valor equivale a praticamente o dobro do N fornecido via uréia (100 kg ha^{-1}), justificando, novamente, a maior contribuição do N da matéria orgânica do solo na nutrição do milho.

4.4.4. Recuperação do N derivado da uréia pelas plantas de milho

A recuperação do N derivado da uréia marcada com ^{15}N , pelas plantas de milho (palhada, grãos e raízes) (método da diluição isotópica), foi de 22 %, quando foram aplicados 100 kg ha^{-1} de N-uréia, sendo a metade na semeadura e o restante em cobertura (CRCN1) e de 15 %, quando aplicadas as mesmas doses na pré-semeadura e na semeadura (CRCN2) (Figura 29). Esses valores são inferiores aos encontrados por CANTARELLA et al. (2003), quando em dois anos de estudos, com a aplicação de 80 kg ha^{-1} de N-uréia incorporado ao lado da linha de semeadura, o milho recuperou na parte aérea 53% do N, quando a uréia foi aplicada na pré-semeadura e 65%, quando foi aplicada na pós-semeadura.

Os valores de recuperação do N aplicado como uréia na cultura do milho, pelo método da diluição isotópica, foram inferiores à maioria dos valores encontrados na literatura: 19 a 43% (GAVA et al., 2002); 20 a 29% (LARA CABEZAS et al., 2000); 30 a 36% (OLSON, 1980); 32% (CALVACHE et al. 1982); 36% (SCIVITTARO et al., 1997); 36 a 62% (KITUR et al., 1984); 40 a 71% (LARA CABEZAS, 2001); 43 a 57%

(REDDY & REDDY, 1993); 45 a 68 % (SANCHEZ & BLACKMER, 1988); 53 a 65% (CANTARELLA et al., 2003); 57% (COELHO et al., 1991). A variação no aproveitamento do N-uréia pelo milho deve estar ligada à forma, à época e ao modo de aplicação da adubação nitrogenada, às condições edafoclimáticas e ao manejo do solo empregado em cada estudo.

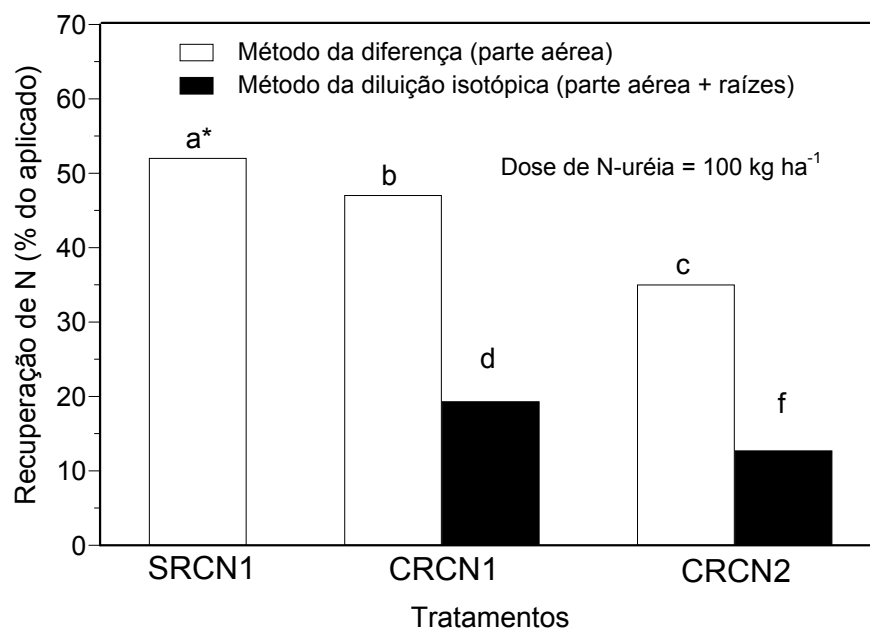


Figura 29. Recuperação percentual do N aplicado como uréia nas plantas de milho com aplicação de N-uréia na semeadura e em cobertura do milho (CN1), na pré-semeadura e na semeadura (CN2), na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais de aveia na superfície do solo. * Tukey ($p < 0,05$).

No sistema plantio direto, pode-se aumentar o aproveitamento do N com a incorporação da uréia ao solo, o que reduz as perdas de N por volatilização de amônia. Aumento de 20 para 29 % de recuperação de N pelo milho (parte aérea e raízes) foi obtido por LARA CABEZAS et al.

(2000), com a incorporação de 100 kg ha^{-1} de N-uréia. No presente trabalho, a baixa recuperação do N-uréia pelas plantas de milho não está associada às perdas de N por volatilização, mesmo com aplicação superficial da uréia e sem incorporação ao solo, pois aproximadamente 50% do N-uréia que foi aplicado ficaram retidos no solo até a colheita do milho e, em maior quantidade, na camada superficial do solo (Capítulo III).

A recuperação percentual do N-uréia, calculada por meio da diferença entre os tratamentos com e sem N-uréia, foi de 52, 47 e 35 % nos tratamentos SRCN1, CRCN1 e CRCN2, respectivamente, sendo estes valores maiores do que pelo método da diluição isotópica (Figura 29). De um modo geral, o método da diferença apresenta valores de recuperação mais elevados do que o método da diluição isotópica (VITTI, 1998). JENKINSON et al (1985) enfatiza que os dois métodos apresentam medidas inexatas, pois pode ocorrer superestimação pelo método da diferença e subestimação pelo método da diluição isotópica. As vantagens do método da diluição isotópica são o menor coeficiente de variação e os dados mais consistentes, comparados ao método da diferença (RAO et al., 1992).

O método da diferença pressupõe que a imobilização, a mineralização e outras transformações do N no solo, que ocorrem durante o experimento, são as mesmas nas parcelas com e sem N-uréia (HAUCK & BREMNER, 1976). Assim, a quantidade de N acumulado nas plantas de milho, derivado do solo (Npds), deve ser a mesma nos tratamentos com e sem N-uréia. No entanto, foi observado, através do uso do ^{15}N -uréia, que a quantidade de Npds nos tratamentos com N-uréia foi maior em relação ao tratamento sem N (Figura 30), com 28 kg ha^{-1} de Npds a mais no tratamento com N-uréia na semeadura e em cobertura (CRCN1) e de 22 kg ha^{-1} de Npds com N-uréia na pré-semeadura e na semeadura (CRCN2).

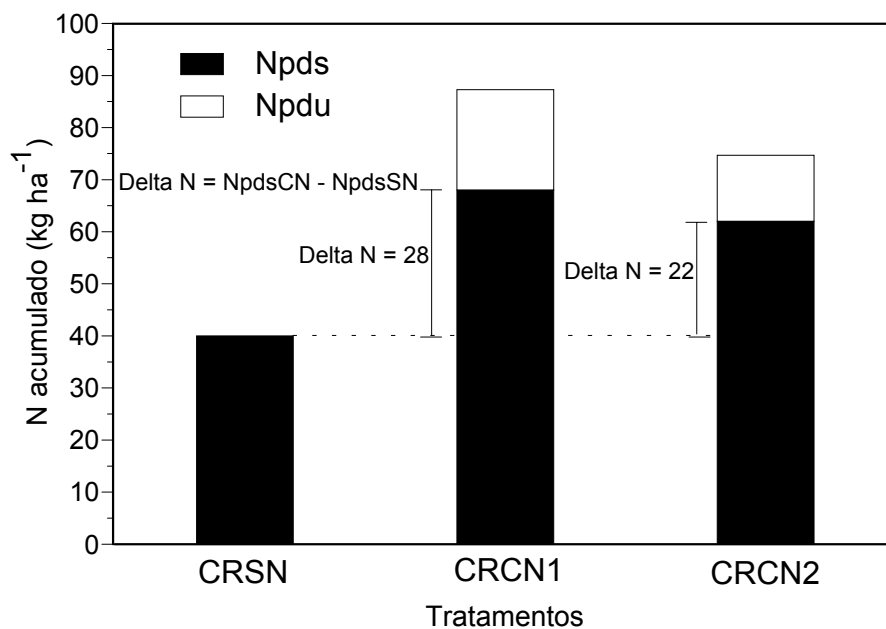


Figura 30. Diferença de N acumulado nas plantas de milho (palhada e grãos) na presença de resíduos culturais (CR) derivado do solo (Npds) nos tratamentos sem N (SN) e com N-uréia aplicado na semeadura e em cobertura (CN1), na pré-semeadura e na semeadura (CN2). Npds = N total acumulado no milho – N acumulado no milho derivado da uréia marcada com ¹⁵N (Npdu).

A maior quantidade de N acumulado no milho, derivado do solo, nos tratamentos que receberam a adubação nitrogenada, pode ser devido à estimulação da mineralização microbiana do N da matéria orgânica do solo ou dos resíduos culturais, aumentando a disponibilidade de N mineral no solo, referido como efeito “priming” verdadeiro (JENKINSON et al., 1985). Esse efeito normalmente ocorre em solos onde foram adicionadas grandes quantidades de resíduos orgânicos com alta relação C/N (JENKINSON et al., 1985) ou devido ao aumento do pH do solo com a adição de uréia na superfície de solos ácidos (SANGOI et al., 2003). Para ocorrer maior mineralização da matéria orgânica do solo com a aplicação de N-uréia, deveria ter aumentado a emissão de C-CO₂ para a atmosfera,

fato não observado no Capítulo I, mesmo com aplicação do N-uréia na superfície do solo com pH em água de 5,0.

Em experimentos com a utilização de ^{15}N é comum encontrar, nos tratamentos que receberam a adubação nitrogenada, maior acúmulo nas plantas do N derivado do solo do que nos tratamentos sem adubação (SAMPAIO et al., 1995; ALFAIA, 1997). Normalmente, a maior quantidade de N acumulado nas plantas, nos tratamentos que receberam a adubação nitrogenada, não é devido à maior mineralização da matéria orgânica do solo (efeito “priming” verdadeiro), mas ao efeito de interação do nitrogênio adicionado (Added Nitrogen Interaction – ANI), conduzindo a um efeito “priming” aparente (JENKINSON et al., 1985).

Quando o N marcado com ^{15}N , da adubação nitrogenada foi adicionado ao “pool” de N inorgânico não marcado do solo, com abundância natural do isótopo, houve efeito de interação do nitrogênio adicionado, e o ^{15}N tomou o lugar do N não marcado. Assim, devido à substituição do ^{15}N pelo N não marcado (“pool substitution”), quando foi realizada a adubação nitrogenada, menor foi a quantidade de N não marcado imobilizado pelos microrganismos do solo, resultando em uma maior quantidade de N não marcado disponível no solo em relação ao tratamento em que não foi realizada a adubação nitrogenada.

A maior quantidade de N acumulado nas plantas de milho, derivado do solo, também pode ter ocorrido devido à renovação da biomassa microbiana do solo, quando o N-uréia foi aplicado. O N da uréia foi assimilado pelos microrganismos, ao mesmo tempo que parte de seu N original, não marcado, foi liberado ao solo e absorvido pelas plantas de milho. O maior crescimento do sistema radicular do milho, quando o milho foi adubado com uréia, é outro fator que também pode ter aumentado a absorção de N não marcado do solo, em relação ao tratamento sem N (BULL, 1993; YAMADA, 1996).

4.4.5. Produção de grãos de milho

A máxima produção de grãos de milho foi obtida no tratamento sem resíduos culturais e com N-uréia na semeadura e em cobertura (SRCN1) (Figura 31). A presença de resíduos culturais (CRCN1) diminuiu a produção de grãos de milho em 15 %, em relação à ausência de resíduos culturais (SRCN1), provavelmente devido à menor disponibilidade de N mineral na presença de resíduos culturais.

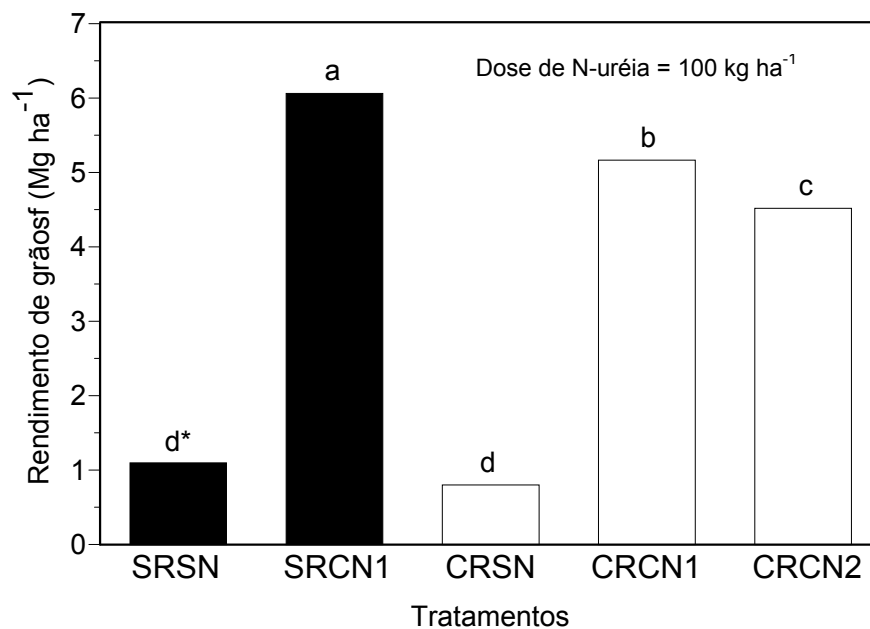


Figura 31. Rendimento de grãos de milho sem aplicação de N (SN) e com aplicação de N-uréia na semeadura e em cobertura do milho (CN1), na pré-semeadura e na semeadura (CN2), na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais.* Tukey ($p < 0,05$).

A antecipação da dose de N-uréia de cobertura para a pré-semeadura do milho, na presença de resíduos culturais de aveia (CRCN2), reduziu a produção de grãos em 13 %, em relação à aplicação tradicional (semeadura e em cobertura) (CRCN1). A maior disponibilidade

de N mineral no solo no estágio de 8 a 9 folhas, com a aplicação de N na semeadura e em cobertura (CRCN1), em relação à antecipação da dose de cobertura para a pré-semeadura (CRCN2) (Capítulo II), deve ter sido o fator determinante da maior produção de matéria seca e da acumulação de N na parte aérea (Figura 24) e nas raízes (Figura 25) e, também do maior rendimento de grãos de milho (Figura 31).

Em anos com distribuição de chuva próxima ou acima da média, no período da aplicação de N na pré-semeadura até os estádios iniciais de desenvolvimento da cultura do milho, a antecipação da dose de N de cobertura para a pré-semeadura reduz a produção de milho. Em anos com chuva abaixo da média ou com estiagem, a produção do milho não é alterada com a aplicação antecipada de N (BASSO & CERETTA (2000); PÖTKER & WIETHÖLTER (2000); CANTARELLA et al., 2003; DA ROS et al., 2003). A maioria dos autores enfatiza que a menor produção de milho, com a aplicação antecipada de N-uréia, em anos de elevada precipitação pluvial, é devida à lixiviação de N.

No Capítulo III, foi observado que a maior quantidade de N no solo, derivado do ^{15}N -uréia, ficou nos primeiros 20 cm de profundidade, mesmo ocorrendo precipitações elevadas em todo o ciclo da cultura do milho (Figura 1). Pouca quantidade de N, derivada da uréia marcada com ^{15}N , foi encontrada na camada de 100 a 120 cm de profundidade, indicando que a perda de N por lixiviação não foi a principal responsável pela menor produtividade de grãos de milho com a aplicação de N-uréia na pré-semeadura.

A maior imobilização de N na fase inicial de decomposição dos resíduos culturais de aveia (Capítulo II) e o maior deslocamento de nitrato na camada de 10 a 30 cm, associados ao pequeno volume de solo explorado pelo sistema radicular do milho no início do desenvolvimento, quando o N-uréia foi aplicado na pré-semeadura, devem ter diminuído a absorção de N pelas plantas de milho. Na aplicação de N-uréia em cobertura, o volume explorado pelo sistema radicular do milho é maior e o N disponibilizado pela adubação sofre menor competição com os

microrganismos atuantes no processo de decomposição dos resíduos culturais da aveia.

4.4.6. Balanço de N no sistema solo-planta

O percentual de N-uréia recuperado, no sistema solo-planta, não diferiu entre os tratamentos, variando de 81 a 91 % (Tabela 9), que são próximos aos valores encontrados por COELHO et al. (1991). A maior quantidade de N recuperado permaneceu retido no solo até a maturação fisiológica do milho, com valores médios de 58 % em relação ao total de N recuperado. Esse valor justifica a baixa recuperação do N-uréia pelas plantas de milho (Figura 29). Valores menores, de 13 % de N retido no solo na camada de zero a 45 cm em relação ao total de N recuperado foram obtidos por LARA CABEZAS et al. (2000) e de 28 % por COELHO et al. (1991), na camada de zero a 90 cm. Nesses estudos, foram encontrados maiores valores de N recuperado pela cultura do milho, em relação ao presente trabalho.

O N não recuperado no sistema solo-planta pode ter sido perdido, principalmente, por desnitrificação, pois as perdas de N por lixiviação foram baixas (Capítulo III). A quantidade de N não recuperado que pode ter sido perdida por escoamento superficial deve ser mínima, já que a área experimental foi localizada em um lugar de baixa declividade. O N que ficou retido nos resíduos culturais remanescentes também pode ter contribuído para o déficit encontrado no balanço de N no sistema solo-planta. LARA CABEZAS et al. (2000) encontraram $0,6 \text{ kg ha}^{-1}$ de N retido nos resíduos culturais com a aplicação de uréia superficial sobre os resíduos culturais.

Tabela 9. Balanço do N no sistema solo-planta, na maturação fisiológica do milho, proveniente da aplicação de 50 kg ha⁻¹ de N-uréia em cada época: semeadura e cobertura (CN1), pré-semeadura e semeadura (CN2), na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais

Destino do N (kg ha ⁻¹)	SRCN1	CRCN1		CRCN2	
	Semeadura	Semeadura	Cobertura	Pré- semeadura	Semeadura
Palhada	4,2 b ⁽¹⁾	2,9 c	4,9 a	2,3 d	2,6 cd
Grãos	5,9	5,3	6,2	3,9	3,9
Raízes (0-120 cm)	1,6 a	1,3 ab	1,7 a	1,0 b	1,1 b
Retido no solo (0 - 120 cm)	27,6 a	22,3 b	20,9 b	28,2 a	24,4 ab
Volatilizado	6,2	8,7	7,3	8,1	8,7
Total recuperado (planta + solo)	45,5	40,5	41,0	43,5	40,7
N não recuperado	4,5	9,5	9,0	6,5	9,3
N-uréia recuperado (%)	91,0	81,0	82,0	87,0	81,4

⁽¹⁾ Médias não seguidas pela mesma letra, na horizontal, diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

4.5. CONCLUSÕES

- A presença dos resíduos culturais de aveia reduziu a produção de matéria seca, acumulação de N e rendimento de grãos de milho.
- A antecipação da adubação nitrogenada de cobertura para a pré-semeadura diminuiu o aproveitamento de N e a produção de grãos de milho.

CONCLUSÕES GERAIS

- A dinâmica do C e do N no solo, no sistema plantio direto, foi afetada pela presença de resíduos culturais de aveia e pela época de aplicação da adubação nitrogenada. A maior imobilização de N, na presença dos resíduos culturais, diminuiu a acumulação de N e a produção de milho e teve influência positiva na retenção de N na camada superficial do solo, evitando o seu deslocamento em profundidade, em relação ao solo descoberto.
- A antecipação da adubação nitrogenada na pré-semeadura do milho, com o objetivo de aumentar o aproveitamento do N pela cultura, mostrou-se uma prática não recomendada.
- A volatilização de amônia foi influenciada pela presença dos resíduos culturais na superfície do solo. Quando eles proporcionam maior umidade do solo, no momento da aplicação da uréia, houve diminuição da volatilização de amônia em relação ao solo descoberto.
- A quantidade de N, derivado da adubação nitrogenada, deslocada na camada de 100 a 120 cm de profundidade foi pequena, indicando um baixo potencial de lixiviação de N, mesmo em solo arenoso e com alta precipitação pluviométrica.

SUGESTÕES PARA FUTURAS PESQUISAS

O estudo de alguns aspectos que envolvem a dinâmica do C e do N no solo devem ser priorizados, com vistas à validação e consolidação dos resultados alcançados neste trabalho. Entre esses, podem-se destacar:

- Estudar a relação entre a mineralização do C orgânico dos resíduos culturais e a imobilização de N no solo, em condições de campo, no sistema plantio direto, com quantidades diferenciadas de resíduos culturais e doses de N, para poder estimar a quantidade de N imobilizado, a partir da quantidade de C orgânico mineralizado na forma de C-CO₂.
- Quantificar a volatilização de amônia, em condições de campo, com aplicação de uréia na superfície do solo, sobre diferentes quantidades de resíduos culturais e teores de umidade do solo.
- Avaliar a lixiviação de nitrato, preferencialmente com o uso de ¹⁵N, em solos argilosos (Latosolos) e sem a presença do horizonte Bt.
- Adaptar a metodologia de determinação do C e N na biomassa microbiana pelo método de irradiação/extração, para diferentes tipos de solos.
- Avançar nos estudos, em condições de campo, sobre o potencial de fornecimento de N, proveniente do solo, para a cultura do milho, a fim de recomendar doses de N que possibilitem o máximo de retorno econômico, sem riscos de contaminação ambiental.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AITA, C. **Couplage des cycles du carbone et de l'azote dans les sols cultivés: étude, au champ, des processus de décomposition après apport de matière organique fraîche.** Paris, Univ. Paris VI, 196 p. Thèse de Docteur, 1996.

AJWA, H.A. & TABATABAI, M.A. Decomposition of different organic materials in soils. **Biol. Fertil. Soils**, 18:175-182, 1994.

ALEXANDER, M. **Introduction to soil microbiology.** New York, J. Wiley. 1977. 467p.

ALFAIA, S.S. Destinos de adubos nitrogenados marcados com ^{15}N em amostras de dois solos da Amazônia Central. **R. bras. Ci. Solo**, Viçosa, 21:379-385, 1997.

AL-KANANI, T.; MACKENZIE, A.F. & BARTHAKUR, N.N. Soil water and ammonia volatilization relationships with surface-applied nitrogen fertilizer solutions. **Soil Sci. Am. J.**, Madison, 55:1761-1766, 1991.

AMADO, T.J.C.; SANTI, A. & ACOSTA, J.A.A. Adubação nitrogenada na aveia preta. II – Influência na decomposição de resíduos, liberação de nitrogênio e rendimento de milho sob sistema plantio direto. **R. bras. Ci. Solo**, Viçosa, 27:1085-1096, 2003.

BASSO, C.J. & CERETTA, C.A. Manejo do nitrogênio em sucessão a plantas de cobertura de solo, sob plantio direto. **R. bras. Ci. Solo**, Viçosa, 24:905-915, 2000.

BLAGODATSKIY, S.A.; LARIONOVA, A.A. & YEVDOKIMOV, I.V. Effect of mineral nitrogen on the respiration rate and growth efficiency of soil microorganisms. **Eurasian Soil Science**, 25:85-95, 1993.

BRAGAGNOLO, N. & MIELNICZUK, J. Cobertura do solo por resíduos de oito seqüências de culturas e seu relacionamento com a temperatura e umidade do solo, germinação e crescimento inicial do milho. **R. bras. Ci. Solo**, 14:91-98, 1990.

BRASIL. Ministério da Agricultura. Departamento Nacional de Pesquisa Agropecuária. Divisão de Pesquisas Pedológicas. **Levantamento de Reconhecimento dos Solos do Estado do Rio Grande do Sul**. Recife. 1973. 431p. (Boletim Técnico, 30).

BREMMER, E., van HOUTUM, W. & van KESSEL, C. Carbon dioxide evolution from wheat and lentil residues as affected by grinding, added nitrogen, and the absence of soil. **Biol. Fertil. Soils**, 11:221-227, 1991.

BRISTOW, A.W.; RYDEN, J.C. & WHITEHEAD, D.C. The fate at several time intervals of ^{15}N -labelled ammonium nitrate applied to an established grass sward. **J. Soil Sci.**, 38:245-254, 1987.

BROOKES, P.C.; LANDMAN, A.; PRUDEN, G. & JENKINSON, D.S. Chloroform fumigation and the release of soil nitrogen: a rapid direct extraction method to measure microbial biomass nitrogen in soil. **Soil Biol. Biochem.**, Oxford, 17:837-842, 1985.

BÜLL, L.T. Nutrição mineral do milho. In: **Cultura do milho: fatores que afetam a produtividade**. Piracicaba: PATAFOS, 1993. p.63-145.

BURFORD, J.R.; DOWDELL, R.J. & CREES, R. Emissions of nitrous oxide to the atmosphere from direct-drilled and ploughed clay soils. **J. Sci. Food Agric.**, 32:219-223, 1981.

CALVACHE, M.; LIBARDI, P.L.; REICHARDT, K.; VITÓRIA, R.; SILVA, J.C.A. & URQUIAGA, S. Absorção e redistribuição do nitrogênio proveniente do fertilizante $\text{CO}(\text{}^{15}\text{NH}_2)_2$, por dois híbridos de milho. **Pesq. agropec. bras.**, 17:1547:1557, 1982.

CAMPBELL, C.A.; BIEDERBECK, V.O. & ZENTNER, R.P. Effect of crop rotations and cultural practices on soil organic matter, microbial biomass and respiration in a thin Black Chernozem. **Can. J. Soil Sci.**, Ottawa, 71:363-376, 1991.

CANTARELLA, H.; LERA, F.L.; BOLONHEZ, D; LARA CABEZAS, W.A.R. & TRIVELIN, P.C.O. Antecipação de N em milho em sistema de plantio direto usando ^{15}N -uréia. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 29, 2003, Ribeirão Preto. **Anais** (CD ROM - resumo expandido). Ribeirão Preto: SBCS, 2003.

CERETTA, C.A. Manejo da adubação nitrogenada na sucessão aveia-milho, no sistema plantio direto. In: FRIES, M. R.; DALMOLIN, R. S. D. **Atualização em recomendação de adubação e calagem: ênfase em plantio direto**. Santa Maria: Pallotti, 1997. Cap. 5. p.112-124.

CERETTA, C.A.; BASSO, C.J.; FLECHA, A.M.T.; PAVINATO, P.S.; VIEIRA, F.C.B. & MAI, M.E.M. Manejo da adubação nitrogenada na sucessão aveia preta/milho, no sistema plantio direto. **R. bras. Ci. Solo**. Viçosa, 26:163-171, 2002a.

CERETTA, C.A.; BASSO, C.J.; HERBES, M.G.; POLETTO, N. & SILVEIRA, M.J. Produção e decomposição de fitomassa de plantas invernais de cobertura de solo e milho, sob diferentes manejos da adubação nitrogenada. **Ciência Rural**, 32:49-54, 2002b.

CERRI, C.C. & JENKINSON, D.S. Formation of microbial biomass during the decomposition of ^{14}C labelled ryegrass in soil. **J. Soil Sci.**, Oxford, 32:619-626, 1981.

CHANTIGNY, M.H.; ROCHETTE, P. & ANGERS, D.A. Short-term C and N dynamics in a soil amended with pig slurry and barley straw: a field experiment. **Can. J. Soil Sci.**, Ottawa, 131-137, 2001.

CHIAPINOTTO, I.C. **Decomposição de palha de aveia preta e dejetos de suínos em solo sob plantio direto**. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 62p. Dissertação de Mestrado, 2003.

CHIMNER, R.A. & COOPER, D.J. Influence of water levels on CO₂ emissions in a Colorado subalpine fen: an in situ microcosm study. **Soil Biol. Biochem.**, Oxford, 35:345-351, 2003.

CHIN, W. & KROOTJE, W. Ureia hidrólisis and subsequent loss of ammonia. **Soil Sci. Soc. Am. Proc.**, Madison, 27:316-318, 1963.

COELHO, A.M.; FRANÇA, G.E.; BAHIA, A.F.C. & GUEDES, G.A.A. Balanço de nitrogênio (¹⁵N) em um latossolo vermelho-escuro, sob vegetação de cerrado, cultivado com milho. **R. bras. Ci. Solo**. Campinas, 15:187-193, 1991.

COLLINS, H.P.; ELLIOTT, L.F. & PAPENDICK, R.I. Wheat straw decomposition and changes in decomposability during field exposure. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, 54:1013-1016, 1990.

COMISSÃO DE FERTILIDADE DO SOLO-RS/SC. **Recomendações de adubações e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**. 3. ed. Passo Fundo:SBSC-Núcleo Regional Sul. 1995. 224p.

CORBEELS, M.; HOFMAN, G. & VAN CLEEMPUT, O. Nitrogen cycling associated with the decomposition of sunflower stalks and wheat straw in a Vertisol. **Plant and Soil**, The Hague, 218:71-72, 2000.

COSTA, M.C.G.; VITTI, G.C. & CANTARELLA, H. Volatilização de N-NH₃ de fontes nitrogenadas em cana-de-açúcar colhida sem despalha a fogo. **R. bras. Ci. Solo**, Viçosa, 27:631-637, 2003.

DA ROS, C.O. **Plantas de cobertura do solo e fornecimento de nitrogênio para o milho em plantio direto**. UFSM, Santa Maria, 85p. Dissertação de Mestrado, 1993.

DA ROS, C.O.; SALET, R.L.; PORN, R.L. & MACHADO, J.N.C. Disponibilidade de nitrogênio e produtividade de milho e trigo com diferentes estratégias de adubação nitrogenada no sistema plantio direto. **Ciência Rural**, 33:799-804, 2003.

DIEKOW, J. **Antecipação da adubação nitrogenada em milho cultivado no sistema plantio direto, em sucessão à aveia preta**. Porto Alegre, Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 74 p. Dissertação de Mestrado, 2000.

ECKERT, D.J.; DICK, W.A. & JOHNSON, J.W. Response of no-tillage grown in corn and soybean residues to several nitrogen fertilizer sources. **Agron. J.**, Madison, 78:231-235, 1986.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília, 1999. 412p.

FERREIRA, A.S.; CAMARGO, F.A.O. & VIDOR, C. Utilização de microondas na avaliação da biomassa microbiana do solo. **R. bras. Ci. Solo**, 23:991-996, 1999.

FRANK, A.B. Carbon dioxide fluxes over a grazed prairie and seeded pasture in the Northern Great Plains. **Environmental Pollution**, 116:397-403, 2002.

GARCIA, F.O. & RICE, C. W. Microbial biomass dynamics in tallgrass prairie. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, 58:816-823, 1994.

GAVA, G.J.C.; TRIVELIN, P.C.O.; VITTI, A.C. & OLIVEIRA, M.W. Recuperação do nitrogênio (^{15}N) da uréia e da palhada por soqueira de cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*). **R. bras. Ci. Solo**, Viçosa, 27:621-630, 2003.

GAVA, G.J.C.; TRIVILIN, P.C.O.; VITTI, A.C.; TEIXEIRA, G.M. & GIOVANNINI, J.G. Produção de fitomassa e acúmulo de nitrogênio no

milho submetido à diferentes doses de uréia (15N) em plantio direto. In: FERTBIO, 2002, Rio de Janeiro. **Anais** (CD ROM - resumo expandido). Rio de Janeiro: SBCS, 2002.

GIACOMINI, S.J. **Consortiação de plantas de cobertura no outono/inverno e fornecimento de nitrogênio ao milho em sistema plantio direto**. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 117p. Dissertação de Mestrado, 2001.

HAUCK, R.D.; BREMNER, J.M. Use of tracers for soil and fertilizer nitrogen research. **Adv. Agron.**, New Work, 28:219-266, 1976.

ISLAM, K.R. & WEIL, R.R. A rapid microwave digestion method for colorimetric measurement of soil organic carbon. **Commun. Soil. Sci. Plant Anal.**, 29:2269-2284, 1998a.

ISLAM, K.R. & WEIL, R.R. Microwave irradiation of soil for routine measurement of microbial biomass carbon. **Biol. Fertil. Soils**, 27:408-416, 1998b.

JENKINSON, D.S.; FOX, R.H. & RAYNER, J.H. Interactions between fertilizer nitrogen and soil nitrogen – the so-called “priming” effect. **J. Soil Sci.**, 36:425-444, 1985.

JENSEN, L.S.; MUELLER, T.; TATE, K.R.; ROSS, D.J. MAGID, J. & NIELSEN, N.E. Soil surface CO₂ flux as an index of soil respiration in situ: a comparison of two chamber methods. **Soil Biol. Biochem.**, Oxford, 28:1297-1306, 1996.

KITUR, B.K.; SMITH, M.S.; BLEVINS, R.L. & FRYE, W.W. Fate of ¹⁵N-depleted ammonium nitrat applied to no-tillage and conventional tillage corn. **Agron. J.**, Madison, 76:240-243, 1984.

KOWALENKO, C.G.; WATSON, K.C. & CAMERON, D.R. Effect of moisture content, temperature and nitrogen fertilization on carbon dioxide evolution from field soils. **Soil Biol. Biochem.**, Oxford, 10:417-423, 1978.

LARA CABEZA, W.A.R.; KORNDORFER, G.H. & MOTTA, S.A. Volatilização de N-NH₃ na cultura de milho: I. Efeito da irrigação e substituição parcial da uréia por sulfato de amônio. **R. bras. Ci. Solo**, Viçosa, 21:481-487, 1997a.

LARA CABEZA, W.A.R.; KORNDORFER, G.H. & MOTTA, S.A. Volatilização de NNH₃ na cultura de milho: II. Avaliação de fontes sólidas e fluídas em sistema de plantio direto e convencional. **R. bras. Ci. Solo**, Viçosa, 21:489-496, 1997b.

LARA CABEZAS, W.A. R. Imobilização do nitrogênio na cultura do milho após a aplicação em pré e pós-semeadura da uréia e sulfato de amônio. **Revista Plantio Direto**. Passo Fundo, Set/Out:14-20, 2001.

LARA CABEZAS, W.A.R. & TRIVELIN, P.C.O. Eficiência de um coletor semi-aberto estático na quantificação e N-NH₃ volatilizado da uréia aplicada ao solo. **R. bras. Ci. Solo**, 14: 345-352, 1990.

LARA CABEZAS, W.A.R.; KORNDÖRFER, G.H. & PEREIRA, S. Balanço da adubação nitrogenada sólida e fluída de cobertura na cultura de milho, em sistema de plantio direto no triângulo mineiro. **R. bras. Ci. Solo**, Viçosa, 24:363-376, 2000.

LIAO, C.F.H. Devarda's alloy method for total nitrogen determination. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 45:852-855, 1981.

MALAVOLTA, E. Pesquisa com nitrogênio no Brasil – passado, presente e perspectivas. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE NITROGÊNIO EM PLANTAS. Itaguaí, 1990. **Anais**. Itaguaí, Sociedade Brasileira de Fisiologia Vegetal, 1990. p.3-26.

MARQUES, T.C.L.L.M.; VASCONCELLOS, C.A.; FILHO, I.P.; FRANÇA, G.E. & CRUZ, J.C. Envolvimento de dióxido de carbono e mineralização de nitrogênio em latossolo vermelho-escuro com diferentes manejos. **Pesq. agropec. bras.**, Brasília, 35:581-589, 2000.

MARY, B.; RECOUS, S.; DARWIS, D. & ROBIN, D. Interactions between decomposition of plant residues and nitrogen cycling in soil. **Plant and Soil**, The Hague, 181:71-82, 1996.

McINNES, K.J., FERGUSON, R.B.; KUSSEL, D.E. & KANEMASU, E.T. Ammonia los fron applications of urea-ammonium nitrate solution to straw residue. **Soil Sci. Am. J.**, Madison, 50:969-974, 1986.

MEIRELLES, N.M.F.; LIBARDI, P.L. & REICHARDT, K.. Absorção e lixiviação de nitrogênio em cultura de feijão (*Phaseolus vulgaris* L.). **R. bras. Ci. Solo**. Campinas, 4:83-88,1980.

MELLO, F.A.F. **Uréia fertilizante**. Campinas. Fundação Cargil. 1987. 192p.

MENGEL, D. **Manejo de nutrientes na cultura do milho de alta produtividade**. Piracicaba: Patafós, 1986. 16p. (Informações Agronômicas, 73)

MERTEN, G.H. & MIELNICZUK, J. Distribuição do sistema radicular e dos nutrientes em latossolo roxo sob dois sistemas de preparo de solo. **R. bras. Ci. Solo**, Campinas, 15:369-374, 1991.

MINHONI, M.T.A & CERRI, C.C. Decomposição de vinhaça em solo sob diferentes níveis de umidade: liberação de CO₂, formação de biomassa microbiana e imobilização do nitrogênio adicionado. **R. bras. Ci. Solo**, Campinas, 11:25-30, 1987.

MINHONI, M.T.A.; EIRA, A.F. & CARDOSO, E.J.B.N. Efeito da adição de N e P sobre a decomposição de diferentes tipos de material orgânico no solo. **R. bras. Ci. Solo**, Campinas, 14:297-304, 1990.

MOAL, J.F.; MARTINEZ, J.; GUIZIOU, F. & COSTE, C.M. A. Ammonia volatilization following surface-applied pig and cattle slurry in France. **J. of Agricultural Science**, Madison, 25:245-252, 1995.

MOREIRA, F.M.S. & SIQUEIRA, J.O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras, UFLA, 2002. 626p.

MUNEVAR, F. & WOLLUM. A.G. Effects of the addition of phosphorus and inorganic nitrogen on carbon and nitrogen mineralization in Andepts from Colombia. **Sci. Soc. Am. J.**, 41:540-545, 1977.

MUZILLI, O. Influência do sistema de plantio direto, comparado ao convencional, sobre a fertilidade da camada arável do solo. **R. bras. Ci. Solo**. Campinas, 7:95-102,1983.

NELSON, K.E.; TURGEON, A.J. & STREET, R.J. Thatch influence on mobility and transformation of nitrogen carries applied to turf. **Agron. J.**, Madison, 72:487-492, 1980.

NIELSEN, N.E. & JENSEN, H.E. The course of nitrogen uptake spring barley from soil and fertilizer nitrogen. **Plant and Soil**, The Hague, 91:391-395,1986.

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

NORMAND, B.; RECOUS, S.; VACHAUD, G.; KENGNI, L. & GARINO, B. Nitrogen-15 tracers combined with tensio-neutronic method to estimate the nitrogen valance of irrigated maize. **Soil Sci. Am. J.**, Madison, 61:1508-1518, 1997.

OLIVEIRA, P.P.A.; TRIVELIN, P.C.O. & OLIVEIRA, W.S. Eficiência da fertilização nitrogenada com uréia (^{15}N) em *Brachiaria brizantha* cv. Marandu associada ao parcelamento de superfosfato simples e cloreto de potássio. **R. bras. Ci. Solo**. Viçosa, 27:613-620, 2003.

OLSON, R.V. Fate of tagged nitrogen fertilizer applied to irrigated corn. **Soil Sci. Am. J.**, Madison, 44:514-517, 1980.

PAUL, E.A. & CLARK, F.E. **Soil microbiology and biochemistry**. 2. ed. Califórnia: Academic press, 1996. Cap. 7, p. 158-179.

PORT, O.; AITA, C. & GIACOMINI, S.J. Perdas de nitrogênio por volatilização de amônia com uso de dejetos de suínos em plantio direto. **Pesq. agrop. bras.**, Brasília, 38:857-865, 2003.

PÖTTKER, D. & WIETHÖLTER, S. Antecipação da aplicação de nitrogênio em milho. In: FERTBIO, 2000, Santa Maria. **Anais** (CD ROM - resumo expandido). Santa Maria: SBCS, 2000.

RAO, A.C.S.; SMITH, J.F.; PARR, J.F. & PAPENDICK, R.I. Considerations in estimating nitrogen recovery efficiency by the difference and isotopic methods. **Fertilizer Research**. 33:209-217, 1992.

RECOUS, S. & MACHET, J.M. Short-term immobilization and crop uptake of fertilizer nitrogen applied to winter wheat: effect of date of application in spring. **Plant and Soil**. 206:137-149, 1999.

RECOUS, S.; AITA, C. & MARY, B. In situ changes in gross N transformations in bare soil after addition of straw. **Soil Biol. Biochem.**, Oxford, 31:119-133, 1999.

RECOUS, S.; FRESNEAU, C.; FAURIE, G. & MARY, B. The fate of labeled ^{15}N urea and ammonium nitrate applied to a winter wheat crop. I. Nitrogen transformations in the soil. **Plant and Soil**, 112:205-214, 1988.

RECOUS, S.; MACHET, J.M. & MARY, B. The partitioning of fertilizer-N between soil and crop: comparison of ammonium and nitrate applications. **Plant and Soil**, 144:101-111, 1992.

RECOUS, S.; ROBIN, D.; DARWIS, D. & MARY, B. Soil inorganic N availability: effect maize residue decomposition. **Soil Biol. Biochem.**, Oxford, 27:1529-1538,1995.

REDDY, G.B. & REDDY, K.R. Fate of ¹⁵nitrogen enriched ammonium nitrate applied to corn. **Soil Sci. Am. J.**, Madison, 57:111-115, 1993.

REICHARDT, K.; LIBRDI, P.L.; VICTORIA, R.L. & VIEGAS, G.P. Dinâmica do nitrogênio num solo cultivado com milho. **R. bras. Ci. Solo**. Campinas, 3:17-20,1979.

REINERTSEN, S.A. ELLIOTT, L.F.; COCHRAN, V.L. & CAMPBELL, G.S. Role of available carbon and nitrogen in determining the rate of wheat straw decomposition. **Soil Biol. Biochem.**, Oxford, 16: 459-464, 1984.

RODRIGUES, M.B. & KIEHL, J.C. Volatilização de amônia após emprego de uréia em diferentes doses e modo de aplicação. **R. bras. Ci. Solo**, Campinas, 10:37-43, 1986.

ROZAS, H.R.S.; ECHEVERRIA, H.E. & PICONE, L.I. Denitrification in maize under no-tillage: Effect of nitrogen rate and application time. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 65:1314-1323, 2001.

SÁ, J.C.M. **Manejo do nitrogênio na cultura do milho no sistema plantio direto**. ed. Aldeia Norte Editora. Passo Fundo - RS, 1996. 24p.

SALET, R.L. **Dinâmica de íons na solução de um solo submetido ao sistema plantio direto**. Porto Alegre, Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 110p. Dissertação de Mestrado, 1994.

SAMPAIO, E.V.S.B. & SALCEDO, I.H. Efeito da adição de nitrogênio e palha – (^{14}C) na liberação de CO_2 e formação de biomassa microbiana em latossolo vermelho-amarelo. **R. bras. Ci. Solo**, Campinas, 6:177-181, 1982.

SAMPAIO, E.V.S.B.; SALCEDO, I.H.; SILVA, V.M. & ALVES, G.D. Capacidade de suprimento de N e resposta à fertilização de 20 solos de Pernambuco. **R. Bras. Ci. Solo**, Campinas, 20:269-279, 1995.

SANCHEZ, C.A. & BLACKMER, A.M. Recovery of anhydrous ammonia-derived nitrogen-15 during three years of corn production in Iowa. **Agron. J.**, Madison, 80:102-108, 1988.

SANGOI, L.; ERNANI, P.R.; LECH, V.A. & RAMPAZZO, C. Volatilização de N-NH_3 em decorrência da forma de aplicação de uréia, manejo de resíduos e tipo de solo, em laboratório. **Ciência Rural**, 33:687-692, 2003.

SCIVITTARO, W.B.; MURAOKA, T., BOARETTO, E. & TRIVELIN, P.C.O. Utilização do nitrogênio (^{15}N) de adubos verdes e mineral pelo milho. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26, Rio de Janeiro. **Anais** (CD-ROM) Rio de Janeiro, SBCS, 1997.

SENGIK, E. & KIEHL, J.C. Efeito de resíduos orgânicos e do fosfato monocálcico na volatilização de amônia em terra tratada com uréia. **R. bras. Ci. Solo**, Campinas, 19:321-326, 1995a.

SENGIK, E. & KIEHL, J.C. Controle da volatilização de amônia em terra tratada com uréia e turfa pelo emprego de sais inorgânicos. **R. bras. Ci. Solo**, Campinas, 19:455-461, 1995b.

SILVA, A.J. da; LIMA JÚNIOR, M.A.; FERREIRA, N. C.M. & FRAGA, V. da S. Perdas de amônia por volatilização proveniente da uréia aplicada a solos dos trópicos úmidos. **R. bras. Ci. Solo**, Campinas, 19:141-144, 1995.

SPARLING, G.P & WEST, A.W. A direct extraction method to estimate soil microbial C: Calibration in situ using microbial respiration and ^{14}C labeled cells. **Soil Biol. Biochem.**, 20:337-343, 1988.

STOTZKY, G. Microbial respiration. In: Black, C.A. Eds. Methods of soil analysis. Part 2. Madison, **American Society of Agronomy**, 1956. p.1550-1572.

TEDESCO, M.J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C.A .; BOHNEN, H. & VOLKWEISS, S.J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre, UFRGS, Faculdade de Agronomia, 1995. 174p (Boletim Técnico de Solos, 5)

TRINSOUTROT, S.; RECOUS, S.; BENTZ.; LINÈRES, D.; CHÈNEBY, D. & NICOLARDOT, B. Biochemical quality of crop residues and carbon and nitrogen mineralization kinetics under nonlimiting nitrogen conditions. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, Madison, 64:918-926, 2000a.

TRINSOUTROT, S.; RECOUS, S.; MARY, B. & NICOLARDOT, B. C e N fluxes of decomposing ^{13}C and ^{15}N *Brassica napus* L.: effects of residue composition and N content. **Soil Biol. Biochem.**, Oxford, 32:1717-1730, 2000b.

TRIVELIN, P.C.O.; SALATI, E. & MATSUI, E. **Preparo de amostras para análise de ^{15}N por espectrometria de massas**. CENA, Piracicaba, 1973. 41p. (Boletim Técnico, 2)

URQUIAGA, S. BODDEY, R. M. & ALVES, B.J.R. Dinâmica do N no solo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE NITROGÊNIO EM PLANTAS, I. Itaguaí, 1990. **Anais**. Texto da palestra apresentada. 1990. 71p.

USA. United Department of Agriculture. **Key to soil taxonomy**. Soil Conservation Service. Sixth Edition. 1994. 305p.

VANCE, E.D.; BROOKES, P.C. & JENKINSON, D.S. An extraction method for measuring soil microbial biomass C. **Soil Biol. Biochem.**, Oxford, 19:703-707, 1987.

VARGAS, L.K. **Composição da comunidade microbiana e suas relações com a disponibilidade de nitrogênio para a cultura do milho.** Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 104p. Tese de Doutorado, 2002.

VITTI, A.C. **Utilização pela cana-de-açúcar (cana planta) do nitrogênio da uréia (^{15}N) e do mineralizado no solo em sistemas de manejo com e sem a queima.** São Paulo. Universidade de São Paulo, 93p. Dissertação de Mestrado, 1998.

VOS, G.J.M.; DUQUET, B.; VEDY, J.C. & NEYROUD, J.A. The course of ^{15}N -ammonium nitrate in a spring barley cropping system. **Plant and Soil**, 150:167-175, 1993.

WANG, F.F. & ALVA, A.K. Ammonium adsorption and desorption in sandy soils. **Soil Sci. Am. J.**, Madison, 64:1669-1674, 2000.

WANG, W.; DALAL, R.C. & MOODY, P.W. Evaluation of the microwave irradiation method for measuring soil microbial biomass. **Soil Sci. Soc. Am. J.**, 65:1696-1703, 2001.

YAMADA, T. & ABDALLA, S.R.S. **Como melhorar a eficiência da adubação nitrogenada no milho?** Piracicaba: Patafós, 2000. p.1-5. (Informações Agronômicas, 91)

YAMADA, T. **Adubação nitrogenada no milho. Quanto, como e quando aplicar?** Piracicaba: Patafós, 1996. p.1-5. (Informações Agronômicas, 74)

ZAGAL, E. & PERSSON, J. Immobilization and remineralization of nitrate during glucose decomposition at four rates of nitrogen addition. **Soil Biol. Biochem.**, Oxford, 26:1313-1321, 1994.

Anexo 1. Valores de densidade aparente do solo (Ds), em diferentes camadas, utilizados para os cálculos do N retido no solo e N imobilizado derivado da uréia marcada com ^{15}N , C e N na biomassa microbiana, N total e N mineral no solo

Camada (cm)	Ds	Camada (cm)	Ds
0 a 10	1,66	80 a 100	1,45
10 a 20	1,69	100 a 120	1,33
20 a 30	1,65		
30 a 40	1,64	10 a 30	1,67
40 a 60	1,64	30 a 60	1,64
60 a 80	1,65	60 a 90	1,60

Anexo 2. Quantidade de C orgânico e N total nos resíduos culturais remanescente (RC) e no solo no final do experimento e a quantidade média de C e N na biomassa microbiana (BM) durante o ciclo da cultura do milho

Caracterização	C orgânico	N total	Relação C/N	Fração solúvel em água (21°C)		
				C orgânico	N total	N mineral
----- kg ha ⁻¹ -----				----- kg ha ⁻¹ -----		
Resíduos culturais remanescentes ⁽¹⁾	706	36,8	19,3	45,6	7,4	1,5
Solo (0-10cm) ⁽²⁾	15.300	1.265	12,1	nd ⁽³⁾	nd	nd
BM (0-10cm) ⁽²⁾	234	26	9,0	nd	nd	nd

⁽¹⁾ Média dos tratamentos com e sem N-uréia. ⁽²⁾ Média de todos os tratamentos. ⁽³⁾ Não determinado

Apêndice 1. Umidade gravimétrica (%) na presença e na ausência de resíduos culturais na superfície do solo. Medias dos tratamentos com e sem aplicação de N-uréia

Tratamentos	Dias após o manejo da aveia									
	8	17	24	30	42	58	64	85	157	
	Dias após semeadura do milho									
			0	6	18	34	40	61	133	
	Dias após N em cobertura									
						0	6	27	99	
	----- 0 – 10 cm -----									
Sem resíduos culturais	10,03	18,30	14,29	12,37	nd	12,80	9,71	11,76	nd	
Com resíduos culturais	17,18	19,29	17,47	14,60	nd	14,81	9,96	13,12	nd	

nd: não determinado

Apêndice 2. Carbono na biomassa microbiana nos primeiros 85 dias do manejo da aveia, sem aplicação de N (SN), com aplicação de N-uréia na semeadura e em cobertura do milho (CN1), na pré-semeadura e na semeadura (CN2), na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais

Tratamentos	Dias após o manejo da aveia						
	8	17	24	30	42	64	85
	Dias após a semeadura do milho						
			0	6	18	40	61
	Dias após aplicação de N em cobertura						
					0	6	27
	-----kg ha ⁻¹ -----						
SRSN	233	240 a ⁽¹⁾	268	256 a	243	211	210 bc
SRCN1				197 b	199	206	152 c
CRSN	239	210 b	274	229 ab	220	276	295 a
CRCN1				228 ab	237	260	228 b
CRCN2	221	195 b	250	270 a	244	246	252 ab
C.V. (%)	17,9	25,4	14,6	7,1	8,5	24,8	10,0

⁽¹⁾ Médias não seguidas pela mesma letra diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Apêndice 3. Nitrogênio na biomassa microbiana nos primeiros 85 dias do manejo da aveia, sem aplicação de N (SN), com aplicação de N-uréia na semeadura e em cobertura do milho (CN1), na pré-semeadura e na semeadura (CN2), na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais

Tratamentos	Dias após o manejo da aveia						
	8	17	24	30	42	64	85
				Dias após a semeadura do milho			
				0	6	18	40
					Dias após aplicação de N em cobertura		
					0	6	27
-----kg kg ⁻¹ -----							
SRSN	22,0 b ⁽¹⁾	25,1 b	24,7	25,2 b	24,9	14,9	18,1
SRCN1				20,2 b	24,0	20,0	20,7
CRSN	23,6 ab	23,1 b	25,0	23,6 b	36,1	29,8	31,5
CRCN1				26,1 b	28,4	32,6	24,7
CRCN2	30,0 a	30,0 a	27,7	35,4 a	32,1	29,1	23,3
C.V. (%)	16,1	25,1	28,6	10,6	15,3	27,6	19,9

⁽¹⁾ Médias não seguidas pela mesma letra diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Apêndice 4. Quantidade de N imobilizado na fração orgânica do solo derivado da uréia marcada com ^{15}N (Nudf), durante o ciclo do milho, com aplicação de N-uréia marcada nas microparcels A e B, na semeadura e em cobertura (CN1), na pré-semeadura e na semeadura (CN2), na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais

Tratamentos		Dias após o manejo da aveia											
Micro-parcela	Época de aplicação de ^{15}N na microparcela			8	17	24	Dias após semeadura do milho						
	P ⁽¹⁾	S	C	0	6	18	34	40	61	133	Dias após N em cobertura		
							0	6	27	99			
----- kg ha ⁻¹ -----													
Individual – por microparcels - dose de 50 kg ha⁻¹ de ^{15}N-uréia													
SRCN1 – A	---	^{15}N	N	---	---	---	6,4 b ⁽²⁾	6,4	6,5	6,0 b	5,3	5,0 a	
CRCN1 – A	---	^{15}N	N	---	---	---	9,1 a	9,3	7,7	7,4 ab	7,1	5,4 a	
CRCN1 – B	---	N	^{15}N	---	---	---	---	---	---	7,9 ab	7,5	5,0 ab	
CRCN2 – A	^{15}N	N	---	11,1	11,3	11,3	10,3 a	9,8	7,8	8,0 a	5,2	3,8 b	
CRCN2 – B	N	^{15}N	---	---	---	---	8,3 ab	7,3	6,3	6,6 ab	4,8	3,2 b	
Total – Micro A + Micro B													
	CRCN1				---	---	---	9,1 b	9,3 b	7,7 b	15,3	14,6	10,4
	CRCN2				11,1	11,3	11,3	18,6 a	17,1 a	14,1 a	14,6	10,0	7,0

⁽¹⁾ Épocas de aplicação de ^{15}N -uréia nas microparcels: P: pré-semeadura; S: semeadura; C: cobertura. As doses de N-uréia foram de 50 kg ha⁻¹, em cada época, totalizando 100 kg ha⁻¹ para cada tratamento. ⁽²⁾ Médias não seguidas pela mesma letra diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro, nas doses individuais de N e na soma das duas épocas de aplicação de N-uréia.

Apêndice 5. Nitrogênio total no solo, delta ^{15}N e N solo derivado da uréia marcada com ^{15}N (Nsdu), por camada de solo, na maturação fisiológica do milho, com aplicação de N-uréia na semeadura e em cobertura do milho (CN1), na pré-semeadura e na semeadura (CN2), na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais

Microparcelas	Épocas ⁽¹⁾			Camada de solo (cm)							Total 0 - 120	
	P	S	C	0 - 10	10 - 20	20 - 30	30 - 40	40 - 60	60 - 80	80 - 100		100 - 120
N total no solo (kg ha⁻¹)												
SRCN1 - A		^{15}N	^{14}N	1.284	928	819	657	959	666	1.103	1.361	7.777
CRCN1 - A		^{15}N	^{14}N	1.270	930	927	718	958	743	1.122	1.394	8.062
CRCN1 - B			^{14}N	1.171	832	829	662	898	928	1.256	1.429	8.005
CRCN2 - A		^{15}N	^{14}N	1.411	897	883	681	948	783	1.242	1.440	8.284
CRCN2 - B		^{14}N	^{15}N	1.192	880	881	704	941	911	1.274	1.567	8.350
		Média		1.265	893	868	684	941	806	1.199	1.438	8.095
Delta ^{15}N												
SRCN1 - A		^{15}N	^{14}N	68,45 b ⁽¹⁾	97,20 a	8,30	8,01 a	5,52	3,23 b	4,96	5,52 a	---
CRCN1 - A		^{15}N	^{14}N	63,65 b	66,44 b	7,14	5,95 a	5,20	5,43 ab	6,26	0,94 b	---
CRCN1 - B			^{14}N	64,02 b	74,80 ab	6,51	5,25 b	3,54	2,34 b	6,23	0,00 b	---
CRCN2 - A		^{15}N	^{14}N	94,75 a	84,84 ab	7,82	6,21 ab	5,01	8,09 a	3,27	0,88 b	---
CRCN2 - B		^{14}N	^{15}N	71,98 ab	67,64 b	6,41	6,02 b	4,37	5,82 ab	3,52	0,44 b	---
Nsdu (kg ha⁻¹)												
SRCN1 - A		^{15}N	^{14}N	11,50 abc	11,75 a	0,89	0,70	0,70	0,29 cb	0,73	0,95 a	27,55 a
CRCN1 - A		^{15}N	^{14}N	10,50 bc	8,11 b	0,86	0,66	0,66	0,52 abc	0,90	0,17 b	22,27 b
CRCN1 - B			^{14}N	9,81 c	8,10 b	0,71	0,47	0,47	0,31 bc	1,04	0,00 b	20,93 b
CRCN2 - A		^{15}N	^{14}N	14,80 a	9,75 ab	0,91	0,64	0,64	0,83 a	0,50	0,16 b	28,14 a
CRCN2 - B		^{14}N	^{15}N	13,30 ab	7,95 b	0,74	0,54	0,54	0,70 ab	0,55	0,09 b	24,94 ab
Total de Nsdu (A + B) (kg ha⁻¹)												
Total CRCN1				20,31 b	15,60	1,57	1,02	1,13	0,83	1,94	0,17	42,57 b
Total CRCN2				28,10 a	17,70	1,65	1,12	1,18	1,53	1,05	0,25	52,58 a

⁽¹⁾ Épocas de aplicação de N-uréia nas microparcelas: P: pré-semeadura; S: semeadura; C: cobertura. Doses de 50 kg ha⁻¹ de N-uréia, em cada época. ⁽²⁾ Médias não seguidas pela mesma letra diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Apêndice 6. Produção de matéria seca e N acumulado nas raízes de milho, por camada de solo, na maturação fisiológica do milho, com aplicação de N-uréia na semeadura e em cobertura (CN1), na pré-semeadura e na semeadura (CN2), na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais

Tratamentos ⁽¹⁾	Camada de solo (cm)								Total 0 – 120 cm
	0 – 10	10 – 20	20 - 30	30 - 40	40 - 60	60 – 80	80 - 100	100 - 120	
----- kg ha ⁻¹ -----									
Materia seca									
SRCN1	3.020 a ⁽¹⁾	220	66	62	136	58	64	35	3.661 a
CRCN1	2.435 ab	211	85	68	171	64	63	17	3.114 ab
CRCN2	2.057 b	213	73	50	153	97	74	27	2.744 b
N acumulado									
SRCN1	14,8 a	1,5	0,5	0,5	1,1	0,4	0,4	0,2	19,4 a
CRCN1	12,7 ab	1,5	0,6	0,5	1,2	0,4	0,3	0,1	17,3 ab
CRCN2	10,8 b	1,4	0,5	0,4	1,1	0,5	0,4	0,1	15,2 b

⁽¹⁾ Médias não seguidas pela mesma letra diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Apêndice 7. Átomos ^{15}N em excesso e N acumulado nas raízes derivada da uréia marcada com ^{15}N (Nrdu), por camada de solo, na maturação fisiológica do milho com aplicação de N-uréia na semeadura e em cobertura (CN1), na pré-semeadura e na semeadura (CN2), na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais

Microparcelas	Épocas ⁽¹⁾			Camada de solo (cm)							Total	
	P	S	C	0 – 10	10 – 20	20 - 30	30 - 40	40 - 60	60 – 80	80 - 100	100 - 120	0 - 120
Átomos ^{15}N em excesso (%)												
SRCN1 - A		^{15}N	^{14}N	0,2254	0,2520	0,2453	0,2762	0,2504	0,2057	0,2274	0,2282	
CRCN1 - A		^{15}N	^{14}N	0,1958	0,1914	0,1907	0,2152	0,2649	0,3057	0,2484	0,2283	
CRCN1 - B			^{14}N	0,2987	0,2893	0,2831	0,2455	0,1995	0,1416	0,1612	0,1171	
CRCN2 - A	^{15}N	^{14}N		0,1631	0,1510	0,1654	0,1611	0,2420	0,2750	0,2287	0,2046	
CRCN2 - B	^{14}N	^{15}N		0,2064	0,1996	0,2226	0,2100	0,2634	0,2112	0,2176	0,2325	
Nrdu (kg ha⁻¹)												
SRCN1 - A		^{15}N	^{14}N	1,18	0,14	0,05	0,05	0,10	0,03	0,03	0,02	1,59 a⁽²⁾
CRCN1 - A		^{15}N	^{14}N	0,91	0,11	0,04	0,04	0,11	0,04	0,03	0,01	1,29 ab
CRCN1 - B			^{14}N	1,31	0,14	0,06	0,05	0,09	0,02	0,02	0,00	1,70 a
CRCN2 - A	^{15}N	^{14}N		0,69	0,07	0,03	0,03	0,10	0,04	0,03	0,01	1,00 b
CRCN2 - B	^{14}N	^{15}N		0,72	0,10	0,04	0,03	0,10	0,03	0,03	0,01	1,06 b
Total (A+B) (kg ha⁻¹)												
Total CRCN1				2,22	0,25	0,10	0,09	0,20	0,06	0,05	0,02	2,99
Total CRCN2				1,41	0,18	0,07	0,05	0,20	0,08	0,06	0,02	2,06

⁽¹⁾ Épocas de aplicação de N-uréia nas microparcelas: P: pré-semeadura; S: semeadura; C: cobertura. Doses de 50 kg ha⁻¹ de N-uréia, em cada época. ⁽²⁾ Médias não seguidas pela mesma letra diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.

Apêndice 8. Produção de matéria seca e N acumulado na maturação fisiológica do milho e N derivado da uréia marcada com ^{15}N (Npdu) na palhada, grãos e raízes, com aplicação de N-uréia na semeadura e em cobertura (CN1), na pré-semeadura e na semeadura (CN2), na presença (CR) e na ausência (SR) de resíduos culturais

Microparcela	Tratamentos			Matéria seca ----- kg ha ⁻¹ -----	N acumulado -----	Átomos ^{15}N em excesso (%)	Npdu (kg ha ⁻¹)	N-uréia recuperada (%)
	Épocas ⁽¹⁾							
	^{15}N e ^{14}N	P	S					
Palhada								
SRSN	---	---	---	7.499 c ⁽²⁾	34,9 ab	---	---	---
CRSN	---	---	---	6.391 c	31,3 b	---	---	---
SRCN1-A	---	^{15}N	^{14}N	10.242 a	39,7 a	0,2946	4,2 b	8,3 b
CRCN1-A	---	^{15}N	^{14}N	9.290 ab	34,9 ab	0,2335	2,9 c	5,8 c
CRCN1-B	---	^{14}N	^{15}N	9.290 ab	34,9 ab	0,3967	4,9 a	9,9 a
CRCN2-A	^{15}N	^{14}N	---	7.945 bc	29,7 b	0,2183	2,3 d	4,6 d
CRCN2-B	^{14}N	^{15}N	---	7.945 bc	29,7 b	0,2453	2,6 cd	5,2 cd
Grãos								
SRSN	---	---	---	981 d	12,9 c	---	---	---
CRSN	---	---	---	687 d	8,9 c	---	---	---
SRCN1-A	---	^{15}N	^{14}N	5.412 a	59,7 a	0,2944	5,9 a	11,7 a
CRCN1-A	---	^{15}N	^{14}N	4.591 b	52,4 ab	0,2840	5,3 ab	10,5 ab
CRCN1-B	---	^{14}N	^{15}N	4.591 b	52,4 ab	0,3302	6,2 a	12,4 a
CRCN2-A	^{15}N	^{14}N	---	4.014 c	45,4 b	0,2406	3,9 b	7,8 b
CRCN2-B	^{14}N	^{15}N	---	4.014 c	45,4 b	0,2379	3,9 b	7,7 b
Raízes (0 – 120 cm)								
SRCN1-A	---	^{15}N	^{14}N	3.660 a	19,4 a	---	1,6 ab	3,1 ab
CRCN1-A	---	^{15}N	^{14}N	3.114 ab	17,3 ab	---	1,3 ab	2,5 ab
CRCN1-B	---	^{14}N	^{15}N	3.114 ab	17,3 ab	---	1,7 a	3,4 a
CRCN2-A	^{15}N	^{14}N	---	2.743 b	15,2 b	---	1,0 b	1,9 b
CRCN2-B	^{14}N	^{15}N	---	2.743 b	15,2 b	---	1,1 b	2,0 b
Total (palhada + grãos + raízes)								
SRCN1-A	---	^{15}N	^{14}N	19.314 a	118,8 a	---	11,7 ab	23,1 ab
CRCN1-A	---	^{15}N	^{14}N	16.995 b	105,0 b	---	9,4 bc	18,8 bc
CRCN1-B	---	^{14}N	^{15}N	16.995 b	105,0 b	---	12,8 a	25,6 a
CRCN2-A	^{15}N	^{14}N	---	14.703 c	90,3 c	---	7,2 c	14,3 c
CRCN2-B	^{14}N	^{15}N	---	14.703 c	90,3 c	---	7,6 c	15,0 c
Total das microparcelas (A + B)								
Total CRCN1 (A + B)	---	---	---	---	---	---	22,2 a	22,2 a
Total CRCN2 (A + B)	---	---	---	---	---	---	14,8 b	14,8 b

⁽¹⁾ Épocas de aplicação de N-uréia nas microparcelas: P: pré-semeadura; S: semeadura; C: cobertura (50 kg ha⁻¹ de N-uréia, em cada época). ⁽²⁾ Médias não seguidas pela mesma letra diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade de erro.