

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO**

**DINÂMICA DO NITROGÊNIO SOB SISTEMA PLANTIO
DIRETO E PARÂMETROS PARA O MANEJO DA
ADUBAÇÃO NITROGENADA NO MILHO**

TESE DE DOUTORADO

JOSÉ ALAN DE ALMEIDA ACOSTA

Santa Maria, RS, Brasil.

2009

**DINÂMICA DO NITROGÊNIO SOB SISTEMA PLANTIO
DIRETO E PARÂMETROS PARA O MANEJO DA
ADUBAÇÃO NITROGENADA NO MILHO**

por

JOSÉ ALAN DE ALMEIDA ACOSTA

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

Orientador: Prof. Telmo Jorge Carneiro Amado

Santa Maria, RS, Brasil.

2009

**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 NITROGÊNIO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO E
PARÂMETROS PARA O MANEJO DA ADUBAÇÃO NITROGENADA
NO MILHO**

elaborada por
JOSE ALAN DE ALMEIDA ACOSTA
Engenheiro Agrônomo

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


COMISSÃO EXAMINADORA:


Telmo Jorge Carneiro Amado, Dr.
(Presidente/Orientador)


Leandro Souza da Silva, Dr. (UFSM)


Sandro José Giacomini, Dr. (UFSM)


Jackson Ernani Fiorin, Dr. (FUNDACEP)


Antônio Luis Santi, Dr. (UNOCHAPECÓ)

Santa Maria, 27 de março de 2009.

AGRADECIMENTOS

Há muitas pessoas e instituições que preciso agradecer por ter alcançado o final desta Tese de Doutorado. Sem dúvida, seria impossível lembrar de todos que contribuíram durante esta longa jornada, mas como forma de reconhecimento a essas pessoas, muitas delas desconhecidas, fica aqui o compromisso de ajudar também outras pessoas, buscando tornar esta atitude um ciclo contínuo...

Primeiramente, eu gostaria de lembrar de meus orientadores, professor Telmo Jorge Carneiro Amado (UFSM, Brasil) e professor Andreas Neergaard (The Royal Veterinary and Agriculture, Dinamarca), pela influência direta em minha formação profissional e pelas “portas” abertas. Sem dúvida, graças a eles, estou levando não somente um grande conhecimento em minha “bagagem”, mas também o espírito pesquisador de ser. Algo que se perpetuará pelo resto de minha vida.

À Universidade Federal de Santa Maria, pelos 14 anos de estudos gratuitos e de qualidade, tendo agora um compromisso como profissional altamente qualificado, de manter esta instituição como um centro de ensino de referência.

Ao Departamento de Solos da UFSM pelas oportunidades e a FAPERGS pelo suporte financeiro como bolsista de iniciação científica durante 5 anos de graduação de Agronomia. Esta experiência como jovem pesquisador foi essencial no desempenho deste trabalho.

Ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, em especial ao seu coordenador durante meu Curso de Doutorado, professor Dr. Carlos Alberto Ceretta, pela compreensão e incentivos em momentos difíceis.

À CAPES, pela minha bolsa de Mestrado e Doutorado, mas também em protesto pela inflexibilidade e interrupção do suporte financeiro durante o meu Mestrado Sandwich fora do Brasil, mesmo sabendo que o projeto em desenvolvimento era de interesse de nosso País.

Ao Programa ALBAN (Programa Europeu de Bolsas de Alto Nível para América Latina) pela grande oportunidade de realizar parte de minha formação em um importante centro de estudos da Europa.

Aos professores Leandro Souza da Silva e Sandro José Giacomini, co-orientadores deste trabalho, por todas as sugestões, correções, paciência e atenção dispensada durante o curso, em especial na etapa final.

Aos estudantes de graduação (maioria futuros doutores) que me ajudaram muito nos trabalhos de campo e laboratório: Otávio Bagiotto Rossato, Mirla Weber, Olavo Gabriel Rossato Santi, Vitor Girardello, Guilherme Londero, Ruberlei Dondé e Tiago Hörbe.

A equipe da DRAKKAR SOLOS CONSULTORIA, pela compreensão e dedicação à Empresa, durante minha ausência para a conclusão desta Tese.

A todos os meus velhos amigos de Casa de Estudante, de Agronomia e de Pós-Graduação, cada um com sua particularidade, mas sempre com uma mão amiga disposta a ajudar.

Em especial a minha família, começando pelo único irmão, Luiz Alex, pelos puxões de orelha quando piá e pelas palavras de admiração profissional quando adulto. “*My brother*”, você faz parte desta conquista!

Ao meu pai José Luiz Acosta, pelo exemplo de vida e caráter a ser seguido. Uma pessoa que teve a infância difícil com onze irmãos, vendendo laranjas e pastéis desde jovem, sem tempo e dinheiro para estudar. Com o primeiro grau incompleto, virou um brasileiro assalariado, que nunca deixou seus filhos trabalharem quando jovens, de modo a estudarem. Hoje, seus filhos, dois engenheiros agrônomos bem sucedidos, são vistos como orgulho...Obrigado PAI, você é um brasileiro vencedor!

A minha mãe Teresinha de Jesus de Almeida Acosta, pela rigidez quando criança, pela dedicação quando jovem e pelo carinho quando adulto. Uma professora exemplar, com mais de 40 anos em sala de aula, tendo talvez a maior das responsabilidades de um professor. Ensinar a ler e escrever, primeiro passo para todos aqueles que sonham um dia ser um Doutor... Obrigada MÃE, você é uma guerreira!

A minha filha Júlia Gabriela, pela sua existência que me dá energia para continuar e também pela sua futura compreensão pelos momentos que me ausentei de sua infância em função de meus estudos.

E, finalmente a Juliana, mãe de minha filha e minha esposa, pelo amor, carinho e compreensão ao longo de nossa história, sempre me estimulando a estudar. A você, eu gostaria de dizer que esta Vitória não é minha, mas é Nossa.

José Alan de Almeida Acosta

27 de março de 2009

Santa Maria, RS, Brasil.

EPÍGRAFE

Na confusão, busca-se a simplicidade.

Na discórdia, busca-se a harmonia.

Na dificuldade, está a oportunidade.

Albert Einstein

RESUMO GERAL

Tese de Doutorado
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Universidade Federal de Santa Maria

DINÂMICA DO NITROGÊNIO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO E PARÂMETROS PARA O MANEJO DA ADUBAÇÃO NITROGENADA NO MILHO

AUTOR: JOSÉ ALAN DE ALMEIDA ACOSTA

ORIENTADOR: TELMO JORGE CARNEIRO AMADO

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 27 de março de 2009.

Entre os vários nutrientes essenciais na nutrição do milho, sem dúvida, o nitrogênio (N) é um dos mais importantes. No entanto, na maioria das vezes, a quantidade naturalmente disponível no solo é insuficiente para suprir a demanda por N, tornando a complementação com fertilizante nitrogenado no milho fundamental para obtenção de expressivas produtividades, além de representar uma parcela significativa dos custos de produção. Dessa forma, o uso racional de fertilizantes nitrogenados associado ao melhor aproveitamento do N liberado pelos resíduos culturais antecessores é um aspecto de extrema importância para a produção de milho dentro de um cenário agrícola que busca sustentabilidade econômica e que seja ecologicamente correto. Este trabalho teve como objetivo principal estudar a dinâmica de disponibilidade de N no solo influenciado pelo aporte de resíduos de culturas de cobertura antecessoras e avaliar o uso de novas tecnologias no manejo da adubação nitrogenada no milho em sistema plantio direto (SPD). Para tanto, estudos específicos e complementares foram conduzidos, buscando avaliar a dinâmica de decomposição de resíduos e liberação de N (Capítulo I); os efeitos sobre a disponibilidade de N no solo (Capítulo II); a absorção de N no florescimento e a produtividade milho em função da quantidade de resíduos aportados por diferentes culturas de cobertura, combinadas com doses de N em SPD (Capítulo III). Também se avaliou o valor fertilizante do N oriundo dos resíduos de ervilhaca através de técnicas isotópicas com ^{15}N (Capítulo IV) e o uso comparativo de parâmetros de solo e planta na recomendação da adubação nitrogenada a taxa variável no milho, buscando aumentar a eficiência do N aplicado (Capítulo V). As quantidades de resíduos adicionadas ao solo não influenciaram significativamente as taxas de decomposição, mas intensificaram os processos mineralização e imobilização de N. Já o aporte e a dinâmica de decomposição dos resíduos influenciaram diretamente a disponibilidade de N mineral no solo, quando comparado ao não aporte de resíduos. A influência na dinâmica de disponibilidade de N em função de aporte de resíduos ficou evidente nos resultados de acúmulo de N até o florescimento e na transformação deste N absorvido em produtividade de grãos. Os resultados obtidos mostraram que a produtividade milho foi diretamente proporcional à absorção de N e que o milho semeado em sucessão à ervilhaca apresentou maior capacidade produtiva em relação aos resíduos de aveia preta e nabo forrageiro, mesmo com adubação nitrogenada complementar. Produtividades de milho superiores a 9 Mg ha^{-1} de grãos somente foram possíveis com o acúmulo superior a 150 kg ha^{-1} de N até o florescimento, sendo que somente na sucessão ervilhaca/milho foi possível alcançar tal quantidade. Porém, apesar da reconhecida capacidade de fornecimento de N pelos resíduos de ervilhaca, associado à capacidade de fixação biológica desta cultura e do elevado aporte de N ao solo, a recuperação de N máxima obtida foi de 27% no primeiro ano e 5% no segundo ano. Assim, concluiu-se que a recuperação de N pelo milho após ervilhaca é baixa para ser totalmente responsável pelo aumento de produtividade, sugerindo que a ervilhaca possa ter efeitos positivos ao milho além do fornecimento de N. O conjunto de resultados sugere que a elevada disponibilidade de N na fase inicial de desenvolvimento do milho proporcionada pela rápida decomposição dos resíduos de ervilhaca, seja um fator essencial no aumento da produtividade normalmente observada na sucessão ervilhaca/milho. Verificou-se ainda que os parâmetros de plantas apresentaram o melhor desempenho no diagnóstico da demanda de N pelo milho em relação aos parâmetros de solo, melhorando o sincronismo entre disponibilidade e demanda, especialmente variável durante o desenvolvimento do milho.

Palavras-chave: nitrogênio; culturas de cobertura; sistema plantio direto; milho; ^{15}N ; taxa variável; adubação nitrogenada.

ABSTRACT

Tese de Doutorado
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Universidade Federal de Santa Maria

NITROGEN DYNAMIC IN NO-TILLAGE SYSTEM AND PARAMETERS FOR MANAGEMENT OF THE NITROGEN FERTILIZER IN THE MAIZE

**AUTHOR: JOSÉ ALAN DE ALMEIDA ACOSTA
ADVISER: TELMO JORGE CARNEIRO AMADO**

Place and date of the defense: Santa Maria, February 27, 2009.

Among the several essential nutrients in the nutrition of the maize, without a doubt, the nitrogen (N) is one of the most important. However, most of the time, the amount naturally available in the soil is insufficient to supply the demand for N, turning the complementation with nitrogen fertilization to maize essential for obtaining of expressive yields, besides to represent a significant part of the production costs. In that way, the rational use of nitrogen fertilization associated to the best use of the N released by residues cultural predecessors is an aspect of extreme importance for the maize production inside of scenery economically viable and correct ecologically. The main objective of this work was to study the N availability dynamics in the soil influenced by residues from cover crops predecessors and to evaluate the use of new technologies to nitrogen fertilizer management in the maize in no-tillage system (NT). For that, specifics and supplementary studies were carried out, looking to evaluate the residues decomposition dynamics and N release (Chapter I); the soil N availability effects (Chapter II); the N absorption until flower stage and maize yield in function of the amount of residues added by different combination of cover crops and N fertilizer levels in NT (Chapter III). Also the N fertilizer value was evaluated from hairy vetch residues to maize using ^{15}N -isotope techniques (Chapter IV) and the comparative use of soil and plants parameters to N fertilizer variable rate recommendation in the maize, looking to increase the efficiency of the N applied (Chapter V). The rates of decomposition were not significantly influenced by amounts of residues added in the soil, but the N mineralization and immobilization processes were intensified. Already the addition and residues decomposition dynamics influenced directly the mineral N availability in the soil when not compared to the addition of residues. The influence in the N availability dynamics in function of the addition of residues was evident in the results of N accumulation until flower stage and in the transformation of this N accumulated in yield grains. The results showed that maize yield was directly proportional to N absorption and that maize sowed in succession hairy vetch presented larger production capacity in relation to black oat and oil radish residues, even with N fertilizer supplementary. The yields upper to 9 Mg grains ha^{-1} only was possible with accumulated upper to 150 kg N ha^{-1} until flower stage, and only in the succession hairy vetch/maize was possible to reach such amount. However, in spite of the recognized capacity to N supply of the hairy vetch residues, associated the biologic nitrogen fixation capacity this cover crop and higher N addition to soil, the N maximum recovery was 27% the first year and 5% in the second year. Like this, it is concluded that the maize N recovery after hairy vetch is lower to be totally responsible for the yield increase, suggesting that the hairy vetch may have a positive effect besides of the N supply. The group of results suggests that the higher N availability in the initial phase of the maize development provided by fast hairy vetch decomposition is an essential factor in the increase of the yield usually observed in the succession hairy vetch/maize. Verified still the parameters of plants presented the best performance in the diagnosis of the demand of N for the maize in relation to the soil parameters, improving the synchronization between availability and demand, spatially variable during the maize development.

Key words: nitrogen; cover crops; no-tillage system; maize; ^{15}N ; nitrogen variable rate technology; nitrogen fertilization.

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – Quantidade de resíduo adicionado aos sacos de decomposição e o N acumulado em 2003 e 2004.....	53
TABELA 2 – Conteúdo de N e relação C/N dos resíduos das culturas de cobertura em 2003 e 2004.....	55
TABELA 3 – Proporção do compartimento de resíduo lábil (A), recalcitrante (B), constantes de decomposição (k_a e k_b), tempo de meia-vida ($t_{1/2}$) de cada compartimento e tempo necessário para decompor 50% ($t_{50\%}$) dos resíduos das culturas de cobertura dentro de cada nível de resíduo avaliado. Médias de 2003 e 2004.....	61
TABELA 4 – Matéria seca das culturas de cobertura, N total adicionado e relação C/N dos três níveis de resíduos culturais adicionados ao solo.....	69
TABELA 5 – Quantidade de N mineral ($N-NO_3^- + N-NH_4^+$) no solo durante o desenvolvimento da cultura do milho na safra 2004/05 em função dos níveis de resíduos das diferentes culturas de cobertura, sem aplicação de N. Camada de 0 a 20 cm.....	77
TABELA 6 – Produtividade de milho obtida em sucessão a 6 Mg ha^{-1} de matéria seca de diferentes culturas de cobertura de inverno. Médias de 2003 e 2004.....	78
TABELA 7 – Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre o conteúdo de N mineral do solo e a produtividade de grãos em três estádios fenológicos do milho.....	79
TABELA 8 – Produtividade de milho obtida em sucessão a diferentes níveis de resíduos de culturas de cobertura de inverno. Médias de 2003 e 2004.....	80
TABELA 9 – Estádios de desenvolvimento da cultura do milho e quantidades de N aplicadas.....	89

TABELA 10 – Produção de matéria seca, teor de nitrogênio, N acumulado e relação C/N dos resíduos das culturas cobertura em 2003 e 2004.	90
TABELA 11 – Efeito das culturas de cobertura, níveis de resíduos e as doses de N na produção de matéria seca, N acumulado no florescimento e produtividade de milho nas safras de 2003/04 e 2004/05.	92
TABELA 12 – Características dos resíduos de ervilhaca marcada com ¹⁵ N no primeiro e no segundo ano do experimento.	108
TABELA 13 – Fase de desenvolvimento do milho e quantidade de N fertilizante aplicado.	109
TABELA 14 – Capacidade de fixação biológica de nitrogênio da ervilhaca usando a técnica de abundância natural em 2003 e 2004.	111
TABELA 15 – Características de marcação isotópica de resíduos de milho no estágio de florescimento em função do aporte de resíduos de ervilhaca em 2004.	116
TABELA 16 – Produtividade de milho e características de marcação isotópica, em função do aporte de resíduos de ervilhaca em 2003 e 2004.	117
TABELA 17 – Características isotópicas dos resíduos de ervilhaca coletado em setembro de 2004 nas antigas microparcelas de milho marcadas com resíduos em 2003.	119
TABELA 18 – Produtividade de milho e características de marcação com 50 e 100% de resíduos nas antigas microparcelas de milho de 2003 em março de 2005.	120
TABELA 19 – Classificação dos parâmetros de aplicação de nitrogênio em relação às médias encontrada no experimento.	127
TABELA 20 – Matéria seca, teor de N, N acumulado até florescimento, eficiência de absorção de N, produtividade média e conversão de kg de N em kg de milho produzido nas diferentes alternativas de manejo da adubação nitrogenada.	129
TABELA 21 – Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre os parâmetros de planta avaliados: leituras do teor de clorofila, NDVI, N acumulado no florescimento e produtividade, considerando os dados amostrais das 12 unidades de trabalho dentro das 6 alternativas de manejo de N.	132
TABELA 22 – Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre diferentes parâmetros de solo: N mineral em diferentes épocas de amostragem, matéria orgânica do solo, capacidade	

produtiva do solo e produtividade, considerando os dados amostrais das 12 unidades de trabalho dentro das 6 alternativas de manejo de N. 132

TABELA 23 – Sugestão de parcelamento das doses de N na cultura do milho. 139

LISTA DE FIGURAS

- FIGURA 1 - Ciclo do nitrogênio dividido em três subciclos: o elementar (E), o autotrófico (A) e o heterotrófico (H). (Adaptado por Camargo et al. (1999) a partir de Jansson; Persson, 1982 e Hebert, 1982)..... 24
- FIGURA 2 – Ilustração comparativa da eficiência de absorção de N e da eficiência de utilização do N absorvido. Adaptado de Moose (2008)..... 36
- FIGURA 3 – Curvas de produção de matéria seca e de adubação de N, P e K pelo milho, em diferentes fases de desenvolvimento da planta. Adaptado de Muzilli, 1989. 37
- FIGURA 4 – Curvas de decomposição dos resíduos de aveia preta, nabo forrageiro e ervilhaca em função da quantidade de resíduos aportada ao solo. As barras verticais indicam a Diferença Mínima Significativa (DMS) pelo teste Tukey ($p < 0,05$)..... 57
- FIGURA 5 – Percentual mineralizado do N adicionado ao solo com resíduos culturais de aveia preta, nabo forrageiro e ervilhaca em função da quantidade aportada nos sacos de decomposição. 58
- FIGURA 6 – Quantidade de N mineralizada dos resíduos culturais de aveia preta, nabo forrageiro e ervilhaca em função da quantidade aportada nos sacos de decomposição. As barras verticais indicam a Diferença Mínima Significativa (DMS) pelo teste Tukey ($p < 0,05$). Datas sem DMS não apresentaram diferenças significativas..... 60
- FIGURA 7 – Relação entre o tamanho dos compartimentos de decomposição lábel e recalcitrante e a relação C/N dos resíduos culturais. 62
- FIGURA 8 – N mineral ($N-NO_3^- + N-NH_4^+$) no solo durante o ciclo do milho, na camada de 0 a 20 cm, em função das culturas de cobertura sem aplicação de N (a e b) e com aplicação de

120 kg ha ⁻¹ de N (c e d). As barras verticais indicam a Diferença Mínima Significativa (DMS) pelo teste Tukey (p<0,05).....	71
FIGURA 9 – Precipitação pluviométrica mensal e temperatura média mensal durante os anos de 2003 e 2004. Informações obtidas da Estação Meteorológica da UFSM, Santa Maria, RS.	72
FIGURA 10 – N mineral (N-NO ₃ ⁻ + N-NH ₄ ⁺) no perfil do solo (0 a 40 cm) durante o desenvolvimento da cultura de milho em função do aporte de diferentes resíduos de cultura de cobertura na safra 2003/04. Nas camadas em que as quantidades de N diferiram significativamente entre os tratamentos, as diferenças estão representadas por barras horizontais que indicam a Diferença Mínima Significativa (DMS) pelo teste de Tukey (p<0,05).....	75
FIGURA 11 – Acúmulo de N das diferentes culturas de cobertura em função das quantidades de resíduos manualmente aportados ao solo. Média de 2003 e 2004.	88
FIGURA 12 – N acumulado médio no florescimento de milho de cada cultura de cobertura dentro de cada nível de resíduo aportado ao solo na safra 2003/04 (a) e 2004/05 (b). Médias de todas as doses de N e as médias não seguidas pela mesma letra minúscula entre colunas de diferente cor diferem pelo teste de Tukey (p<0,05). ns = não significativo.	94
FIGURA 13 – Diferença do N acumulado até o florescimento no milho cultivado sob resíduos de culturas de cobertura em relação ao tratamento sem aporte de resíduos ao solo, associado a dose de N em cobertura. Médias dos níveis de resíduos em 2003 e 2004.	95
FIGURA 14 – Relação entre o N absorvido até o florescimento do milho e a relação C/N dos resíduos das culturas de cobertura antecessoras. Médias das doses de N.....	96
FIGURA 15 – Relação entre o N acumulado até o florescimento e a produtividade de milho. Média de 2003 e 2004, totalizando 80 observações.	97
FIGURA 16 – Efeitos do aporte de resíduos (a) e da quantidade de resíduo (b) na produtividade de milho. Médias das doses de N em 2003 e 2004. ns = não significativo.	99
FIGURA 17 – Curvas de resposta às doses de N na cultura do milho em função do tipo de resíduo antecessor na safra 2003/04 (a). Médias dos níveis de resíduos. AP = aveia preta, NF = nabo forrageiro, ER = ervilhaca e SR = sem resíduos. As barras verticais indicam a Diferença Mínima Significativa (DMS) pelo teste Tukey (p<0,05).....	100

FIGURA 18 – Desenho experimental de uma microparcela dentro da parcela principal e a distribuição dos volumes contendo resíduos de ervilhaca marcada para a criação dos níveis de resíduos marcados.....	108
FIGURA 19 – Taxa de decomposição e relação C/N (a) e a liberação de N com a proporção de N remanescente nos resíduos (b) após 98 dias de decomposição em 2003 e 2004.	113
FIGURA 20 – Recuperação de N com 50% (a,b) e 100% (c,d) dos resíduos em 2003 e 2004. DAE = Dias após a emergência. As barras verticais indicam a Diferença Mínima Significativa (DMS) pelo teste Tukey ($p < 0,05$). ns = não significativo.....	114
FIGURA 21 – Produtividade de grãos e %Ndf _r nos grãos com aumento da adubação mineral de N em 2003 e 2004.	118
FIGURA 22 – Localização do experimento sobre o mapa de matéria orgânica do solo (a) e sobre mapa de relevo (b) dentro do pivô de irrigação.	126
FIGURA 23 – Eficiência das alternativas de adubação nitrogenada na absorção de N e na produtividade de grãos em relação ao manejo tradicional com taxa fixa de N ao longo de 600 metros.....	130
FIGURA 24 – Curva de absorção de N em função dos resíduos culturais antecessores, sem e com N em cobertura, durante as fases de desenvolvimento do milho durante a safra 2003/04. As diferenças estão representadas por barras verticais que indicam a Diferença Mínima Significativa (DMS) pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).	138
FIGURA 25 – Esquema hipotético das oscilações de disponibilidade de N no solo em função da qualidade do resíduo e das variações das condições climáticas durante o desenvolvimento da cultura do milho em sistema plantio direto. *Considerando que a época de manejo dos resíduos e o desenvolvimento da cultura do milho sejam equivalentes nas três condições sugeridas.....	141
FIGURA 26 – Relação entre a necessidade de N recomendada pela CQFS-RS/SC (2004) e a quantidade estimada pelo modelo de recomendação sugerido pela Tese para produtividade entre 5 a 9 ton ha ⁻¹ de milho, em solos com diferentes teores de matéria orgânica e culturas antecessoras. n = 27 situações. Maiores informações no Apêndice 33.	144

LISTA DE APÊNDICES

APÊNDICE 1 – Precipitação mensal ocorrida nos anos de 2003, 2004 e 2005.	167
APÊNDICE 2 – Temperatura média mensal ocorrida nos anos de 2003, 2004 e 2005.	167
APÊNDICE 3 – Densidade aparente do solo em diferentes camadas na implantação do experimento em maio de 2003.....	168
APÊNDICE 4 – Quantidade de matéria seca aérea das culturas de cobertura adicionada manualmente ao solo em função dos níveis de resíduos.....	168
APÊNDICE 5 – Relação entre a produção de matéria verde e matéria seca produzido pelas culturas de cobertura em setembro de 2003.	169
APÊNDICE 6 – Variação percentual entre a produção real (MSr) e produção estimada (MSe) de matéria seca em 2004 em função do índice MV/MS obtido com as culturas de cobertura em 2003.	169
APÊNDICE 7 – Calendário das principais atividades desenvolvidas durante o experimento descrito no Capítulo I, II e III.	169
APÊNDICE 8 – Resultado das análises químicas do solo, em diferentes profundidades, antes da instalação do experimento em maio de 2003.....	170
APÊNDICE 9 – Croqui do experimento de campo (Estudos dos Capítulos I a IV).	171
APÊNDICE 10 – Distribuição do N mineral ($N-NO_3^- + N-NH_4^+$) no perfil do solo durante o desenvolvimento da cultura de milho em função do aporte de diferentes resíduos de cultura de cobertura e doses de N na safra 2003/04. DMS = Diferença Mínima Significativa.	173
APÊNDICE 11 – Curvas médias de resposta a doses de N em função dos níveis de resíduos (a) e curvas médias de resposta do experimento (b).....	174

APÊNDICE 12 – Relação entre o N acumulado no florescimento e a produtividade de grãos de milho nas safras 2003/4 (a) e 2004/05 (b).	175
APÊNDICE 13 – N acumulado no florescimento de acordo com o nível de resíduos e em função das doses de N.	176
APÊNDICE 14 – Efeito do aporte de resíduos na produção de grãos de milho em relação ao tratamento sem resíduos na safra 2003/04 (a) e 2004/05 (b). Médias das doses de N.	177
APÊNDICE 15 – Efeito da quantidade com o aporte de resíduos de 6 e 9 Mg MS ha ⁻¹ em relação ao aporte de 3 Mg ha ⁻¹ de MS na safra 2003/04 e 2004/05. Médias das doses de N.	178
APÊNDICE 16 – Curvas de resposta as doses de N na cultura de milho em função dos níveis de resíduos (0, 3, 6, 9 Mg ha ⁻¹ de MS) para cada cultura de cobertura na safra 2003/04 e 2004/05.	179
APÊNDICE 17 – Esquema seqüencial de marcação isotópica com ¹⁵ N dos resíduos de ervilhaca.	180
APÊNDICE 18 – Esquema experimental com a disposição dos tratamentos dentro do pivô, estrada de acesso ao centro do pivô e posição da torre de irrigação no momento da georeferência.	181
APÊNDICE 19 – Desenho do trabalho de campo: faixa de aplicação de N com o conjunto aplicador trator/amazone e das faixas de colheita com a automotriz MF38 equipada c/ sensor de rendimento (Sistema Fieldstar/AGCO/Massey Ferguson).	181
APÊNDICE 20 – Mapa de colheita de Soja 2005/06 (a), mapa de matéria orgânica do solo com grid de 1 hectare (b), 1º imageamento infravermelho aéreo do experimento (c) e mapa de vigor das plantas de milho elaborado pela empresa Vectis (d).	182
APÊNDICE 21 – Teores de matéria orgânica do solo médio encontrados em cada unidade de trabalho dentro da faixa de aplicação a taxa variável em função deste parâmetro.	183
APÊNDICE 22 – Produtividades médias de soja encontradas em cada unidade de trabalho dentro da faixa de aplicação a taxa variável em função do potencial produtivo do solo.	183
APÊNDICE 23 – Valores das leituras de clorofila encontrados em cada unidade de trabalho dentro da faixa de aplicação a taxa variável em função deste parâmetro.	184

APÊNDICE 24 – Valores de NDVI obtidos através das imagens aéreas multiespectrais encontradas em cada unidade de trabalho dentro da faixa de aplicação a taxa variável em função deste parâmetro.	184
APÊNDICE 25 – Quantidades de N fertilizante aplicadas em cada unidade de trabalho de acordo com os parâmetros estabelecidos em cada alternativa de manejo.....	185
APÊNDICE 26 – Metas e quantidades totais de N aplicadas no experimento.	186
APÊNDICE 27 – Leituras de clorofila em cada alternativa de manejo a taxa variável no estádio da 4ª e 7ª folha de milho.....	186
APÊNDICE 28 – Leituras de clorofila em cada alternativa de manejo a taxa variável no estádio da 12ª folha de milho e na folha oposta a espiga (florescimento).	186
APÊNDICE 29 – Relação entre o teor de matéria orgânica do solo e a altitude da área na seqüência de amostragens ao longo dos 600 metros do experimento.....	187
APÊNDICE 30 – Relação entre o peso estimado pelo computador de bordo da máquina (Data Vision) e peso real de balança. Média de 12 repetições.	187
APÊNDICE 31 – Relação entre as leituras do clorofilômetro no florescimento e a produtividade de milho.	189
APÊNDICE 32 – Curvas de resposta da adubação nitrogenada obtida para cada alternativa de manejo e média geral do experimento.	189
APÊNDICE 33 – Comparativo de doses de N no milho estimadas pela recomendação da CQFS-RS/SC (2004) e a estimativa proposta pelo conjunto de informações gerado por esta Tese de Doutorado.	190
APÊNDICE 34 - E-Mails Essenciais!.....	191

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO GERAL	21
2 REFERENCIAL TEÓRICO	23
2.1 DINÂMICA DO NITROGÊNIO NO AGROECOSSISTEMA SOLO-PLANTA	
ATMOSFERA.....	23
2.1.1 O ciclo do nitrogênio.....	23
2.1.2 Transformações microbianas de mineralização e imobilização de N.....	25
2.1.3 Dinâmica do N no solo.....	26
2.1.4 Dinâmica do N na planta.....	27
2.1.5 Interações no agroecossistema solo-planta-atmosfera.....	27
2.2 RESÍDUOS DE CULTURAS DE COBERTURA COMO FONTE DE NITROGÊNIO	
.....	28
2.2.1 Estudos com culturas de cobertura.....	28
2.2.2 Resíduos de leguminosas X resíduos de gramíneas.....	29
2.2.3 Decomposição e liberação de N por resíduos.....	31
2.3 ADUBAÇÃO NITROGENADA NA CULTURA DO MILHO	32
2.3.1 Necessidade de N pelo milho.....	32
2.3.2 Mecanismos de suprimento de N.....	33
2.3.2.1 O solo como fonte de N.....	33
2.3.2.2 Fontes externas de N.....	34
2.3.2.3 Modos de aplicação.....	34
2.3.2.4 Eficiência da adubação nitrogenada no milho.....	35

2.3.3 Dificuldades em estabelecer a recomendação adequada de N para a cultura do milho..	38
2.3.3.1 Sistema de cultivo: Plantio Direto x Plantio Convencional.....	39
2.3.3.2 O teor de matéria orgânica solo como principal indicador.....	41
2.3.3.3 A planta como um indicador.....	42
2.3.3.4 Estimativa da necessidade teórica de N.....	42
2.4 NOVAS TECNOLOGIAS NO MANEJO DA ADUBAÇÃO NITROGENADA.....	44
2.4.1 Uso de marcador com ¹⁵ N na liberação de N por resíduos culturais	44
2.4.2 Leituras instantâneas do teor de clorofila – Uso do clorofilômetro manual.....	45
2.4.3 Imageamento aéreo por infravermelho – Sensoriamento remoto	46
2.4.4 Tecnologia de aplicação nitrogenada a taxa variável.....	47
3 OBJETIVO GERAL.....	48
4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	48
5 CAPÍTULO I – DECOMPOSIÇÃO E LIBERAÇÃO DE NITROGÊNIO EM FUNÇÃO DA QUANTIDADE DE RESÍDUOS APORTADA AO SOLO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO.....	49
5.1 Resumo.....	49
5.2 Abstract	50
5.3 Introdução.....	51
5.4 Material e Métodos	52
5.5 Resultados e Discussão	55
5.5.1 Relação C/N e quantidade de N aportado pelos resíduos.....	55
5.5.2 Cinética de decomposição e liberação de N.....	56
5.5.3 Compartimento lábil e tempo de meia-vida	60
5.6 Conclusões.....	63
6 CAPÍTULO II – DISPONIBILIDADE DE NITROGÊNIO NO SOLO EM FUNÇÃO DA QUANTIDADE DE RESÍDUOS APORTADA AO SOLO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO.....	64
6.1 Resumo.....	64
6.2 Abstract	65
6.3 Introdução.....	66
6.4 Material e Métodos	68
6.5 Resultados e Discussão	70

6.5.1 Disponibilidade de N em função da qualidade de resíduos.....	70
6.5.2 Disponibilidade de N no perfil do solo	73
6.5.3 Disponibilidade de N em função da quantidade de resíduo	76
6.5.4 Produtividade de grãos de milho.....	77
6.6 Conclusões.....	81
7 CAPÍTULO III – ABSORÇÃO DE NITROGÊNIO E PRODUTIVIDADE DE MILHO EM FUNÇÃO DA QUANTIDADE DE RESÍDUOS APORTADOS AO SOLO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO	82
7.1 Resumo.....	82
7.2 Abstract	83
7.3 Introdução.....	84
7.4 Material e Métodos	86
7.4.1 Localização e caracterização da área experimental	86
7.4.2 Delineamento experimental e tratamentos	86
7.4.3 Detalhes experimentais.....	87
7.4.4 Avaliações realizadas	89
7.4.5 Análise estatística.....	89
7.5 Resultados e Discussão	90
7.5.1 Produção de matéria seca, N acumulado e relação C/N dos resíduos.....	90
7.5.2 Interações entre resíduos e as doses de N.....	91
7.5.3 Nitrogênio absorvido pelo milho	93
7.5.4 Produtividade de milho	98
7.6 Conclusões.....	101
8 CAPÍTULO IV – SINERGISMO ENTRE RESÍDUOS DE ERVILHACA E ADUBAÇÃO NITROGENADA MINERAL NO MILHO INVESTIGADO POR TÉCNICAS ISOTÓPICAS.....	102
8.1 Resumo.....	102
8.2 Abstract	103
8.3 Introdução.....	104
8.4 Material e Métodos	105
8.4.1 Local e solo.....	105
8.4.2 Avaliação da fixação biológica de N.....	106
8.4.3 Avaliação da decomposição da ervilhaca.....	106

8.4.4	Marcação isotópica da ervilhaca	106
8.4.5	Recuperação de ¹⁵ N-ervilhaca pelo milho	107
8.4.6	Re-marcação da ervilhaca em microparcelas de 2003	109
8.4.7	Cálculos: abundância natural e técnica diluição isotópica de ¹⁵ N	109
8.4.8	Análise estatística.....	110
8.5	Resultados e Discussão	110
8.5.1	Fixação biológica de nitrogênio.....	110
8.5.2	Decomposição de resíduos e N liberado	111
8.5.3	Nitrogênio derivado dos resíduos – Primeiro ano de recuperação	113
8.5.4	Produtividade e N recuperado nos grãos	116
8.5.5	Nitrogênio derivado dos resíduos – Segundo ano de recuperação	119
8.6	Conclusões.....	120
8.7	Agradecimentos	120
9 CAPÍTULO V – AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE USO DE PARÂMETROS DE SOLO E PLANTA NA ADUBAÇÃO NITROGENADA À TAXA VARIÁVEL NO MILHO.....		121
9.1	Resumo.....	121
9.2	Abstract	122
9.3	Introdução.....	123
9.4	Material e Métodos	124
9.5	Resultados e Discussão	128
9.6	Conclusões.....	133
9.7	Agradecimentos	134
10 CONSIDERAÇÕES FINAIS		135
10.1	Principais contribuições	135
10.2	Modelo de recomendação sugerida.....	142
10.3	Perspectivas futuras.....	145
11 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS		147
12 APÊNDICES		167

1 INTRODUÇÃO GERAL

Entre os vários nutrientes essenciais na nutrição do milho, sem dúvida, o nitrogênio (N) é um dos mais importantes. No entanto, na maioria das vezes, a quantidade naturalmente disponível no solo é insuficiente para suprir a demanda por N, tornando a complementação com fertilizante nitrogenado no milho fundamental para obtenção de expressivas produtividades, além de representar uma parcela significativa dos custos de produção. Dessa forma, o uso racional de fertilizantes nitrogenados associado ao melhor aproveitamento do N liberado pelos resíduos culturais antecessores é um aspecto de extrema importância para a produção de milho dentro de um panorama agrícola que busca sustentabilidade econômica e que seja ecologicamente correto.

O atual cenário agrícola do Sul do Brasil, pós-introdução e consolidação do Sistema Plantio Direto (SPD) como modelo predominante, tem configurado uma nova dinâmica de disponibilidade de nutrientes às plantas, principalmente do N. Com a redução das perdas de solo e acúmulo constante de resíduos orgânicos na superfície, tem ocorrido uma recuperação significativa dos teores de matéria orgânica (principal fonte de N), além de que, o aporte de diferentes tipos de resíduos ao solo proporciona efeitos diretos na disponibilidade de N às plantas. Assim, há a necessidade de se avaliar tais fatos, principalmente buscando novas tecnologias e sistemas de manejo que permitam aumentar a eficiência da utilização dos fertilizantes nitrogenados, principalmente na cultura do milho, extremamente responsivo a fontes complementares de N.

O milho é o cereal mais consumido no mundo e uma das plantas mais eficientes na conversão de energia solar em alimentos, além de participar como matéria-prima de mais de 3500 produtos. Recentemente, o maior destaque é seu uso para produção de álcool combustível, importante sob o ponto de vista energético, mas algo indesejável em termos de segurança alimentar. Nos últimos 32 anos, da safra 1974/75 à safra 2006/07, a área semeada de milho no mundo passou de 119 para 146 milhões de hectares, apresentando crescimento de 23%. A produtividade cresceu de 2520 para 4730 kg ha⁻¹ (aumento de 88%). A produção foi ampliada, aproximadamente, de 300 para quase 700 milhões de toneladas (incremento de 131%). O consumo saltou de 293 para 729 milhões de toneladas, um avanço de 149%. Para se ter uma idéia da magnitude desses números podemos dizer que são consumidos, aproximadamente, 2 milhões de toneladas de milho por dia.

Visto isso e sabendo que a produtividade de milho aumenta consideradamente quando fornecido N adicional, milhões de toneladas de N fertilizante são aplicados anualmente nesta cultura em todo o mundo. Esta fertilização não aumenta somente os custos, mas também aumenta negativamente os impactos ao meio ambiente e eleva o requerimento de energia na produção de grãos.

No intuito de aumentar a eficiência de N no Estado do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, o teor de matéria orgânica, a expectativa de produtividade de grãos e a contribuição da cultura antecedente têm sido os principais parâmetros para recomendação de adubação nitrogenada no milho. No entanto, considerando a complexidade do ciclo de N e todas as transformações que podem ocorrer com o N no solo durante o ciclo desta cultura, outros parâmetros técnicos podem ser úteis para auxiliar na decisão sobre o manejo da adubação nitrogenada, buscando, principalmente, sincronizar a adequada quantidade a ser aplicada com a disponibilidade de N do solo e a demanda das plantas de milho durante suas fases de desenvolvimento. Entretanto, um dos principais problemas do atual sistema de recomendação da adubação nitrogenada é que a determinação da quantidade de N a ser aplicada no milho é feita antes da semeadura, não ocorrendo o monitoramento deste elemento após a emergência. Sem dúvida, analisar apenas o teor de matéria orgânica tem sido uma limitação na avaliação da necessidade de se aplicar adubo nitrogenado. Neste sentido, o sistema vigente de recomendação pode estar sub ou superestimando a demanda nitrogenada do milho.

Assim, grande parte deste trabalho foi dedicada à avaliação do potencial de uso e dos efeitos da quantidade de resíduos aportados ao solo por diferentes culturas de cobertura de inverno (aveia preta, nabo forrageiro e ervilhaca) na absorção de N e na produtividade de milho. Nos capítulos I, II e III avaliou-se a relação entre o manejo de resíduos (qualidade e quantidade) com dinâmica de N mineral no solo e sua influência na disponibilidade de N ao milho. Já no capítulo IV, o estudo sobre os efeitos da sucessão ervilhaca/milho, que tem sido apontada como a melhor sucessão para o fornecimento de N ao milho, foi aprofundado, utilizando-se da marcação isotópica (^{15}N) para compreender melhor os benefícios advindos deste resíduo. Finalmente, no capítulo V, foram realizadas avaliações do uso de parâmetros de solo e planta no manejo da adubação nitrogenada à taxa variável na cultura do milho, considerando que as oscilações na disponibilidade de N encontradas nos estudos anteriores poderiam ser contrabalanceadas por técnicas que pudessem medir a variação espacial de N durante o desenvolvimento da cultura milho, buscando ajustar melhor a disponibilidade de N com a demanda da planta “in loco”.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 DINÂMICA DO NITROGÊNIO NO AGROECOSSISTEMA SOLO-PLANTA-ATMOSFERA

O nitrogênio é o nutriente que mais desperta interesse da comunidade científica das Ciências Agrárias, em função de sua complexidade de formas no ambiente e sua importância para a produtividade das culturas agrícolas. Por ser um elemento químico altamente dinâmico, está presente em todos os extratos do Planeta Terra, principalmente na litosfera, onde está contido nas rochas, no fundo dos oceanos e sedimentos. Na forma gasosa, a atmosfera terrestre é composta por 78% de N₂, fonte primária de N ao solo. Do total de N orgânico terrestre, 96% estão na matéria orgânica morta e apenas 4% nos organismos vivos (MOREIRA; SIQUEIRA, 2002). Neste contexto, segundo Hauck (1984), a estimativa da partição de N adicionado entre planta, solo, água e atmosfera pode ser a seguinte: 50% do N fertilizante aplicado pode ser absorvido pelas plantas, podendo este valor ser tão baixo quanto 25%, em solos com deficiente drenagem, ou tão alto quanto 80%, em pastagens com gramíneas crescendo em solos com baixa disponibilidade de N. Aproximadamente 25% podem ser perdidos do sistema solo-planta, podendo este valor normalmente variar entre <10% a >50% da quantidade aplicada ou podendo ser imobilizado pela biomassa microbiana, variando este valor na faixa de 15% a 45%. A questão que emerge da interpretação destas estimativas é como pode ser aumentada a quantidade de N absorvida pelas culturas e diminuída a quantidade perdida do sistema solo-planta, enquanto que a imobilizada pela biomassa do solo deve ser mantida em formas de imediata ou potencial disponibilidade para as plantas de modo a tornar, sob o ponto de vista de manejo de N, o sistema agrícola sustentável. A resposta para a questão é complexa, porém, só será alcançada com um detalhado conhecimento da dinâmica do N nos diferentes agroecossistemas empregados na produção agrícola (AMADO, 1997).

2.1.1 O ciclo do nitrogênio

A principal característica do ciclo do nitrogênio, operando no agroecossistema solo-planta-atmosfera, é a interação entre as atividades de organismos autotróficos e heterotróficos. Através da fotossíntese, os vegetais transformam a energia solar em biomassa. Quando incorporados ao solo, os resíduos vegetais são utilizados como fonte de carbono e energia

pelos microrganismos heterotróficos, ocorrendo transformação de N-orgânico para formas inorgânicas que são absorvidas pelas plantas (N-NO_3^- e N-NO_4^+). Tanto o N quanto os outros elementos essenciais são repetidamente utilizados pela circulação contínua entre as fases autotróficas e heterotróficas deste agroecossistema (PAUL; CLARK, 1996; CAMARGO et al., 1999).

Segundo o modelo adaptado por Camargo et al. (1999), montado a partir de trabalhos de Jansson; Persson (1982) e de Herbert (1982), o ciclo do N é constituído de três subciclos, que possuem uma ou mais vias comuns. Eles podem ser denominados como elementar (E), autotrófico (A) e heterotrófico (H), estando ilustrados esquematicamente na Figura 1.

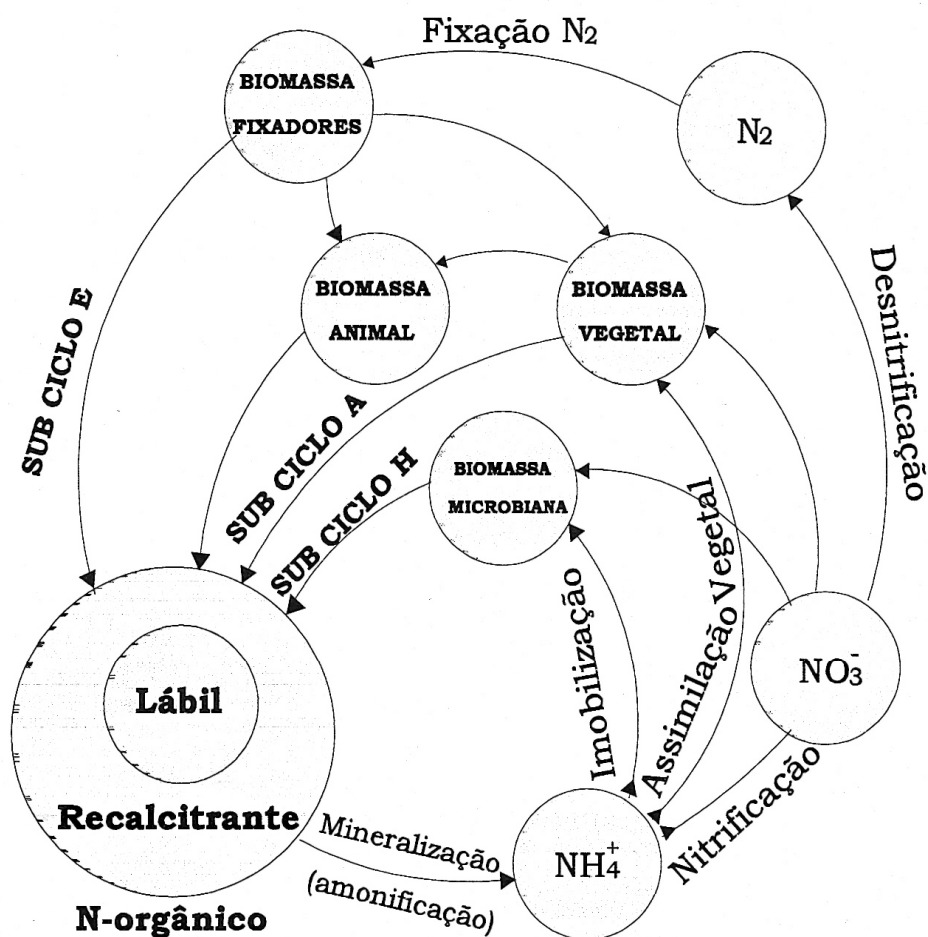


Figura 1 - Ciclo do nitrogênio dividido em três subciclos: o elementar (E), o autotrófico (A) e o heterotrófico (H). (Adaptado por Camargo et al. (1999) a partir de Jansson; Persson, 1982 e Hebert, 1982).

O subciclo E inclui a conexão da vida biológica ao compartimento dominante do N na terra, a atmosfera. Nesta via específica do N, ocorre a fixação biológica do N_2 por microrganismos procariontes e a nitrificação por microrganismos anaeróbicos facultativos. O subciclo A inclui a atividade dos vegetais e os produtos primários de substâncias orgânicas nitrogenadas. O subciclo H é constituído pela atividade de microrganismos heterotróficos. A caracterização ecológica específica deste subciclo é a mineralização com dissipação de energia da matéria orgânica, onde as substâncias orgânicas nitrogenadas são convertidas a $N-NH_3$ ou $N-NH_4^+$. O funcionamento dos três subciclos é dependente deste N mineralizado. Invariavelmente, parte do N mineralizado será imobilizado no subciclo heterotrófico, ou será absorvido pelas plantas no subciclo autotrófico, ou então será parcialmente nitrificado ou desnitrificado no subciclo elementar (ROY; SINGH, 1995).

O processo de mineralização desempenha um papel significativo no ciclo do N_2 , sendo responsável pela transformação do N-orgânico presente no tecido vegetal para formas inorgânicas simples. A fase heterotrófica conduzida pela mineralização é um fenômeno biológico multiplicativo, traduzido pelo crescimento, pelas mudanças e renovações que resultam na formação da matéria orgânica e biomassa microbiana (FRANZLUEBBERS et al., 1994). Dessa forma, em toda a atividade de mineralização existe um componente de imobilização, representado pela assimilação de nutrientes minerais responsáveis pela multiplicação, pelo crescimento e pela manutenção da microbiota.

2.1.2 Transformações microbianas de mineralização e imobilização de N

A mineralização e a imobilização são processos de transformação de N do solo de natureza bioquímica, sendo ambos conduzidos pela atividade enzimática da microbiota heterotrófica (CAMARGO et al., 1999). A *mineralização* é definida como a transformação do N de origem orgânica em formas inorgânicas, como o NH_4^+ ou NH_3 (amonificação). O processo é conduzido por organismos heterotróficos do solo que utilizam substâncias orgânicas nitrogenadas como fonte de C, N e energia. Já a *imobilização* é definida como a transformação do N-inorgânico (NH_4^+ , NH_3 , NO_3^- , NO_2^-) para formas orgânicas microbianas. A microbiota assimila os compostos inorgânicos nitrogenados, incorporando-os nos aminoácidos que irão participar da síntese de proteínas de suas células durante a formação de biomassa no solo (CAMARGO et al., 1999). Com a redução gradativa do carbono dos resíduos, inicia-se o processo de predação e morte dos microrganismos por falta de fonte de

energia. Nesta etapa, o N acumulado na biomassa microbiana começa a ser reciclado, ficando novamente disponível às plantas (BARTZ, 1998).

Desta forma, a mineralização e imobilização estão incluídas no subciclo heterotrófico, sendo ambas ligadas à produção heterotrófica de biomassa. Os dois processos funcionam em direções opostas, rompendo ou formando ligações entre compostos orgânicos. A taxa na qual o N-orgânico é convertida a amônio e a nitrato é definida como taxa de mineralização, sendo representada pela quantidade de N-inorgânico liberada pela ação da microbiota em um tempo determinado. O efeito resultante dos processos de mineralização e imobilização determinará o fornecimento do N para os outros dois subciclos, condicionando a produção vegetal em solos onde não tenha sido adicionado fertilizante (CAMARGO et al., 1999).

2.1.3 Dinâmica do N no solo

Mais de 95% do N do solo encontra-se complexado na forma orgânica (CERETTA, 1995; WIETHÖLTER, 1996; SCHULTEN; SCHNITZER, 1998), sendo somente uma pequena parte mineralizada pela microbiota do solo durante o ciclo de uma determinada cultura (STEVENSON, 1982b; CAMARGO et al., 1999a), a qual poderá ser diretamente disponível às plantas (KEENEY, 1982). Segundo Ceretta (1998), as quantidades de N mineralizadas no solo dependem da natureza química da matéria orgânica, mas fundamentalmente de sua proteção física em função de sua interação com partículas minerais coloidais e da intensidade de revolvimento do solo.

O aumento dos estoques totais de N no solo poderá ocorrer através da fixação biológica atmosférica, pelas chuvas ou pela adubação orgânica e mineral. Enquanto que as perdas podem ocorrer devido à exportação pelas culturas, lixiviação, erosão e volatilização (SCHULTEN; SCHNITZER, 1998).

Os solos, em sua maioria, não fornecem adequadamente quantidade de N durante certas fases de desenvolvimento das plantas, em parte devido a elevada demanda e também às transformações bioquímicas que o N está sujeito no solo e que podem alterar significativamente a sua disponibilidade (WIETHÖLTER, 1996). Uma característica importante da disponibilidade de N é a sua ampla flutuação no solo. Em um único ano agrícola, a concentração de N junto às raízes pode variar até 100 mil vezes (PURCINO et al., 2000).

2.1.4 Dinâmica do N na planta

O N também ocupa uma posição de destaque entre os elementos essenciais ao desenvolvimento das plantas. Apesar de apresentar-se na camada arável do solo, em alguns casos, quantidades relativamente elevadas (mais de 7.000 kg ha^{-1}), sua baixa disponibilidade, somada à grande necessidade pelos vegetais, faz com que seja um dos nutrientes mais limitantes à produtividade da maioria das culturas (CAMARGO, 1996).

Entre os nutrientes, geralmente o N é o que tem maior efeito no crescimento das plantas, sendo que sua disponibilidade estimula o desenvolvimento e a atividade radicular, incrementando a absorção, não somente de N, mas também de outros nutrientes (OLSON; KURTZ, 1982; YANAI et al., 1996). Ele atua na planta como constituinte de moléculas de proteínas, enzimas, coenzimas, ácidos nucléicos e citocromos, além de possuir importante função como integrante da molécula de clorofila (BÜLL, 1993).

Para conviver com grandes variações no suprimento de N, as plantas desenvolveram um sofisticado sistema de absorção deste nutriente. Segundo Purcino et al. (2000), a entrada do N para o interior das células acontece contra um gradiente de concentração, isto é, a concentração de N no interior da célula é maior que a concentração no solo. Em situações como esta, se diz que a absorção é ativa, pois a planta gasta energia para realizar este trabalho. Esta energia é derivada do processo respiratório que, por sua vez, consome parte dos fotoassimilados acumulados durante a fotossíntese. Portanto, para ser metabolicamente eficiente, uma determinada planta deve ser eficiente na partição de seus recursos energéticos (fotoassimilados) entre as atividades metabólicas que competem entre si por estes recursos.

2.1.5 Interações no agroecossistema solo-planta-atmosfera

Segundo estudo realizado por Paul; Clark (1996), a principal fonte de adição de N no sistema solo-planta é via fixação de N_2 pelos microorganismos, perfazendo 56% das adições totais, contribuindo com mais do dobro do que é aplicado via fertilização mineral (26%). No mesmo estudo os autores estimaram que as perdas por desnitrificação e lixiviação sejam os principais processos de perdas de N do solo e juntos contribuem com 72% desta. Os autores também estimaram valores para os principais fluxos de N, abrangendo os processos mais importantes de adição e perdas de N no solo: adição – fixação biológica de N de 50 a $500 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, mineralização de 2 a 5% do N-orgânico, reposição pelas chuvas de 5 a $20 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, erosão do solo de 40 a $150 \text{ kg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, extração pelas culturas de 10 a 300 kg ha^{-1}

ano⁻¹, volatilização/desnitrificação de 10 a 80% do N aplicado e imobilização do solo de 25 a 30% do N aplicado via fertilização.

2.2 RESÍDUOS DE CULTURAS DE COBERTURA COMO FONTE DE NITROGÊNIO

2.2.1 Estudos com culturas de cobertura

O uso de cultura de cobertura ou adubos verdes em sistemas de rotação visando melhorar a fertilidade do solo e aumentar a produtividade agrícola é uma prática muito antiga (REEVES, 1994). Durante a primeira metade do século XX, as leguminosas foram intensivamente utilizadas como fonte de N, mas após a Segunda Guerra Mundial, houve uma significativa redução no uso dessas espécies, devido ao aumento da disponibilidade de fertilizante mineral de origem industrial (CALEGARI et al., 1993).

No Sul do Brasil há vários estudos mostrando a eficiência do uso de cultura de cobertura e o incremento na produtividade da cultura do milho sob SPD (PÖTTKER; ROMAN, 1994; TEIXEIRA et al., 1994; AITA et al., 1994; DA ROS; AITA, 1996; SÁ, 1996; AMADO, 1997; HEINRICHS et al., 2001; AMADO, 2002; CERETTA et al., 2002). Estes estudos recomendam o uso de leguminosas, principalmente a cultura da ervilhaca, com fonte suplementar de N na produção de milho. Além de proporcionar a vantagem de outras culturas de cobertura, tal como o controle da erosão, a ervilhaca fornece elevadas quantidades de N para milho em sucessão e pode parcialmente (AITA et al., 1994) ou totalmente (DA ROS; AITA, 1996) substituir o uso de fertilizante mineral, motivo pelo qual é considerada um adubo verde.

Apesar da grande variação na quantidade de matéria seca (MS) produzida pelas plantas de cobertura do solo, as espécies não leguminosas de maneira geral se destacam na produção de MS, podendo chegar a 10 Mg ha⁻¹ no nabo forrageiro (*Raphanus sativus*) e 8,7 Mg ha⁻¹ na aveia preta (*Avena strigosa*) (MONEGAT, 1991). Porém, algumas leguminosas podem produzir quantidade de MS equivalente ou superior às espécies não leguminosas (DA ROS; AITA, 1996). Quanto a consorciação de gramíneas e leguminosas, Heinrichs et al. (2001), mostra que isso favorece a produção de MS. Neste mesmo trabalho, o autor não encontrou diferença significativa na MS total, nos tratamentos que continham aveia na mistura, mostrando que aveia preta, devido a seu rápido crescimento, predomina sobre a ervilhaca.

A adição de resíduos de culturas de cobertura na superfície do solo provoca significativas alterações na dinâmica do N no solo. Heinzmann (1985), em um Latossolo no Norte do Paraná com elevada capacidade de fornecimento de N, acompanhou a dinâmica deste nutriente, em nove datas, após o manejo de adubos verdes de inverno (aveia preta, nabo forrageiro, ervilhaca peluda, tremoço e trigo) e avaliou a influência destas sobre as culturas de verão (feijão, soja e milho). Observou que, no momento do manejo, haviam menores teores de nitrato no solo nas parcelas com aveia preta (cerca de 30 kg ha^{-1}) e os maiores no pousio. Porém 20 dias após o corte, os teores de NO_3^- elevaram-se sensivelmente, atingindo valores de 60, 90, e 110 kg ha^{-1} de N, nas parcelas com aveia preta, tremoço e nabo forrageiro, respectivamente. Aos 54 dias foram encontrados os maiores teores de NO_3^- no nabo forrageiro. Entretanto, na aveia preta ocorreram outros dois picos mais tardios, aos 120 e 160 dias após o corte. Com base nestes resultados observou-se que a liberação de N, a partir de leguminosas e do nabo forrageiro, ocorre nas primeiras semanas após o corte, enquanto que na aveia preta a mais lenta decomposição pode permitir a possibilidade de sincronismo entre a decomposição dos resíduos, a liberação de N e a demanda do milho na fase de florescimento e enchimento de grãos.

2.2.2 Resíduos de leguminosas X resíduos de gramíneas

Para benefício do SPD, as espécies de cobertura de solo no inverno devem proteger o solo e melhorar suas características físicas, químicas e biológicas para a cultura subsequente. Além disto, devem incrementar o suprimento de N e a produtividade de grãos. A aveia preta é a gramínea mais cultivada como cobertura de inverno no Sul do Brasil, antecedendo as culturas de milho e soja, em SPD (PÖTTKER; ROMAN, 1994). Estima-se que são cultivados anualmente dois milhões de hectares com esta espécie, apenas no Estado do Rio Grande do Sul (INDICAÇÕES..., 2006). Entre as causas determinantes do uso intenso da aveia preta destacam-se: elevado rendimento de massa seca, facilidade de aquisição de sementes e de implantação, rusticidade, rapidez de formação de cobertura e ciclo adequado (SANTI et al., 2003). Dentre os benefícios da aveia preta para o SPD podem ser citados: a melhoria das características físicas, químicas e biológicas do solo e a eficiente proteção do solo proporcionada por seus resíduos. No entanto, em milho cultivado em sucessão à aveia preta, geralmente ocorre redução na absorção de N e na produtividade de grãos, devido à elevada relação C/N de seus resíduos. A adição de quantidades elevadas de resíduos com alta relação C/N faz com que os organismos quimiorganotróficos que atuam na decomposição da matéria

orgânica se multipliquem gradativamente, produzindo CO₂ em grande quantidade (VICTORIA et al., 1992). Como consequência, o nitrato e o amônio presentes no solo ficam imobilizados. Além disto, a velocidade de liberação de N dos resíduos de aveia preta é lenta. Apenas 38% do N contido na planta de aveia preta é disponibilizado nas primeiras quatro semanas após seu manejo (AMADO et al., 2003). Isto promove uma assincronia entre a disponibilidade desse nutriente no solo e o desenvolvimento inicial das plantas de milho.

Já as espécies leguminosas de inverno têm capacidade de fixar N atmosférico através da simbiose com bactérias específicas (GILLER; WILSON, 1993). Isto eleva a disponibilidade desse nutriente no solo, tornando as plantas desta família adequadas para anteceder a cultura de milho. Estimativas indicam que 46 kg de N são acumulados por tonelada de massa seca de parte aérea da ervilhaca comum (*Vicia sativa*) e que a contribuição média de N da ervilhaca é de 120 kg ha⁻¹, variando de 50 a 200 kg ha⁻¹ (BOLLIGER et al., 2006). No entanto, devido à baixa relação C/N, a velocidade de liberação de N dos resíduos de leguminosas é muito rápida, quando comparada a outras espécies como as gramíneas.

Isto se deve ao fato de que 60% do N da fitomassa da ervilhaca é liberado durante os primeiros 30 dias após seu manejo (AMADO, 1997). Em decorrência disto, recomenda-se que a semeadura de milho ocorra num período de tempo não superior a uma semana após manejo (AITA, 1997). Outra vantagem do uso de leguminosas como cobertura de solo é a liberação mais lenta do N em relação aos adubos nitrogenados químicos, representando menor risco de poluição ao ambiente. Apesar dessas vantagens, a intensidade de uso de leguminosas como espécies antecessoras a milho no estado do Rio Grande do Sul é pequena, por apresentarem maior custo de implantação em relação às gramíneas, por terem menor rendimento de massa seca, lento desenvolvimento inicial e, principalmente, pela rápida decomposição de seus resíduos (INDICAÇÕES..., 2006). Além do lento crescimento inicial, o máximo acúmulo de massa seca nesta espécie nas condições do Sul do Brasil ocorre entre o final de setembro e o início de outubro. A semeadura de milho nesta época, especialmente em áreas com deficiência hídrica no seu período crítico (duas semanas antes a duas semanas após o florescimento) é de alto risco. A rápida decomposição dos resíduos das leguminosas faz com que o solo fique desprotegido logo no início do desenvolvimento de milho, especialmente no SPD, em fase inicial de implantação. Portanto, o desenvolvimento de práticas culturais que possibilitem maior tempo de permanência de resíduos de leguminosas na superfície do solo é importante para viabilizar o uso dessas espécies como cobertura de solo no inverno.

2.2.3 Decomposição e liberação de N por resíduos

A decomposição dos resíduos culturais aportados ao solo é realizada, essencialmente, pelos microrganismos heterotróficos que retiram elementos essenciais para a sua nutrição e carbono necessário à produção de energia e formação de tecidos microbianos (AITA, 1997). Porém, fatores bióticos e abióticos determinam a velocidade do processo de decomposição e definem a persistência desses resíduos na superfície do solo (ESPÍNOLA et al., 2006).

Há vários fatores que interferem na atividade microbiana, conseqüentemente, na taxa de decomposição dos resíduos. Entre eles está o contato solo/resíduo, semi-incorporado ou incorporado (SCHOMBERG et al., 1994; AMADO et al., 2000), o regime hídrico (PARTON et al., 2007), a adição de N inorgânico ao solo (WIETHÖLTER, 1996), a temperatura (KOENIG et al., 1994), a relação C/N (TIAN et al., 1992; JAMA; NAIR, 1996; JANSSEN, 1996; MARY et al., 1996) e lignina/N (BUCHANAN; KING, 1993), o teor de lignina e polifenóis (PALM; SANCHEZ, 1991; TIAN et al., 1992; KOENIG et al., 1994; JAMA; NAIR, 1996) e a concentração de N no tecido vegetal (MARY et al., 1996; PARTON et al., 2007).

Entre esses fatores, a relação C/N dos resíduos adicionados ao solo assume importante papel na decomposição e na relação entre mineralização/imobilização de N à solução do solo. Janssen (1996), analisando vários estudos relacionados à mineralização do N, mostra que a fração de N orgânico mineralizada está inversamente relacionada à relação C/N, de maneira idêntica à decomposição dos resíduos. Na literatura são encontrados diversos valores de relação C/N a partir dos quais ocorre imobilização líquida de N (KUMAR; GOH, 2003). Contudo, estes variam com o tipo de planta e o estágio de maturação que estas são adicionadas ao solo (MONTEIRO et al., 2002).

Geralmente se aceita que materiais com relação C/N = 25 causam equilíbrio entre os processos de imobilização e mineralização, valores superiores a este causam imobilização líquida, enquanto que valores inferiores a 25 promovem mineralização líquida de N ao solo (AITA, 1997). Kudeyarov (1999) demonstrou com base em Hart et al. (1986), que a imobilização ocorria no momento em que a relação C/N era > 25. Entretanto, a imobilização pode ocorrer em qualquer fase de decomposição dos resíduos. Jensen (1997), trabalhando com palha de lentilha, encontrou imobilização líquida nos períodos iniciais de decomposição quando a relação C/N era somente de 15.

Em condições de campo, resíduos com ampla relação C/N formam uma cobertura morta estável, que contribui para a estruturação do solo e fornece proteção ao impacto de

gotas de chuva e a radiação solar (COSTA et al., 1992), enquanto que estreita relação C/N favorece a mineralização de N, com reflexos positivos sobre o suprimento desse nutriente às espécies não-leguminosas em sucessão (DERPSCH et al., 1985; HEINZMANN, 1985; TEIXEIRA et al., 1994). No SPD, comparativamente ao plantio convencional, pode-se afirmar que a mineralização do N é mais lenta (SIDIRAS; PAVAN, 1985) devido, principalmente, ao não fracionamento físico dos resíduos e ao menor contato do material orgânico com o solo, evitando assim, a ação rápida de microrganismos (AMADO et al., 2000).

Em manejos conservacionistas preconiza-se a manutenção de resíduos protegendo a superfície do solo pelo maior período de tempo possível (MAI et al., 2003). Por outro lado, para a cultura de cobertura atender a demanda em N da cultura subsequente há a necessidade de que a decomposição dos resíduos ocorra em sincronismo com a demanda da cultura em sucessão (AMADO et al., 2000). Combinar estes dois objetivos tem sido um desafio para técnicos e agricultores, pois embora uma significativa quantidade de N possa existir na parte aérea das culturas de cobertura, a real quantidade de N que ficará disponível para a cultura sucessora irá depender da extensão da decomposição dos resíduos dentro da estação de crescimento da cultura econômica e da dinâmica de mineralização/imobilização de cada tipo e quantidade de resíduo aportado ao solo (AMADO, 1997). Assim, embora as plantas de cobertura possam acumular grande quantidade de N na parte aérea, após o manejo, a real quantidade de N que poderá estar disponível à cultura subsequente dependerá do sincronismo entre a taxa de decomposição da fitomassa e o crescimento da cultura em sucessão.

2.3 ADUBAÇÃO NITROGENADA NA CULTURA DO MILHO

2.3.1 Necessidade de N pelo milho

Sendo o nutriente mais exigido pelo milho, o N é responsável pelo desenvolvimento vegetativo e o verde intenso das folhas. Como constituinte essencial dos aminoácidos, é fundamental para a síntese de proteínas e, uma vez que a formação dos grãos depende do conteúdo de proteínas na planta, a produção de milho está diretamente relacionada com o suprimento de N (MUZILLI, 1983).

O suprimento inadequado de N é considerado um dos principais fatores limitantes a produtividade de grãos do milho, pois o N exerce importante função nos processos bioquímicos da planta, principalmente como constituinte de proteínas, enzimas, coenzimas,

ácidos nucleicos, fitocromos e da clorofila (CANTARELLA, 1993). Além disso, afeta as taxas de iniciação e expansão foliar, o tamanho final e a intensidade de senescência das folhas (UHART; ANDRADE, 1995).

O milho é uma cultura que remove grandes quantidades de N e usualmente requer o uso de adubação nitrogenada em cobertura para complementar a quantidade suprida pelo solo, quando se desejam produtividades elevadas. Estima-se que a necessidade de N para produção de uma tonelada de grãos varie entre 20 a 28 kg ha⁻¹ de N (CANTARELLA, 1993).

Resultados de experimentos conduzidos no Brasil, sob diversas condições de solo, clima e sistemas de cultivo, mostram resposta generalizada da cultura à adubação nitrogenada (GROVE et al.; 1980; CANTARELLA; RAIJ, 1986; FRANÇA et al., 1986; COELHO et al., 1992). Em geral, 70 a 90 % dos experimentos de campo realizados no Brasil, apresentaram respostas à aplicação de N na cultura do milho (COELHO et al., 2003).

Do ponto de vista econômico e ambiental, a dose de N a aplicar é, para muitos, a mais importante decisão no manejo do fertilizante (COELHO et al., 2003). A crescente adoção do SPD no Brasil e a necessidade de utilizar culturas de cobertura e rotação de culturas, visando a sustentabilidade desse sistema, são aspectos que devem ser considerados na otimização da adubação nitrogenada.

2.3.2 Mecanismos de suprimento de N

2.3.2.1 O solo como fonte de N

A maioria dos solos apresentam deficiência de N em relação a demanda das culturas, pelo menos durante certa fase de desenvolvimento das plantas (WIETHÖLTER, 1996). Devido às transformações biológicas e químicas que o N está sujeito no solo e que podem alterar significativamente a quantidade disponível deste elemento às plantas, o entendimento dos diversos processos que ocorrem é fundamental para tornar o manejo de N adequado em termos econômicos e ambientais.

A suposição de que 2 a 3% do N da matéria orgânica é mineralizado durante uma safra e estará disponível às plantas, deve ser encarada com atenção, pois o teor de matéria orgânica do solo (MOS) na maioria dos solos está num estado de quase de equilíbrio, ou seja, o seu conteúdo não varia significativamente de um ano para o ano. No estado contínuo, a quantidade de N liberada durante o ano é contrabalanceada pela imobilização de N de outras fontes na MOS recém formada. Desta forma, uma liberação líquida anual só ocorre quando o

teor de MO está “declinando”, uma condição que deve ser evitada, pois esta geralmente conduz a uma redução da capacidade produtiva do solo ao longo do tempo (STEVENSON, 1986).

Havendo carência no solo, a deficiência de N no milho se manifesta já na fase de crescimento intenso, coincidindo com os períodos de maior demanda pela cultura. Essa deficiência é reconhecida pela coloração verde-pálido das folhas novas e clorose típica nas folhas velhas, que se tornam amareladas no sentido do ápice para o centro, com o vértice voltado para a parte central da folha e as bordas podendo permanecer verdes (MUZILLI, 1989).

2.3.2.2 Fontes externas de N

As fertilizantes são fundamentais para alavancar a produção de alimentos no mundo e o Brasil ocupa a quarta colocação entre os maiores consumidores desses insumos, embora com participação de apenas 2% na produção mundial (STIPP; PROCHNOW, 2008). Considerando-se que aproximadamente 75% dos fertilizantes nitrogenados utilizados no Brasil são importados, torna-se ainda mais necessária a maximização da eficiência de seu uso.

As principais fontes são a uréia, o nitrato de amônia e o sulfato de amônia. Entretanto, o mais utilizado no mundo é a uréia, porque é mais concentrada (46% de N) e apresenta menor custo por unidade de nutriente, o que favorece também o menor custo de transporte (CQFS-RS/SC, 2004). Mas, para ser utilizada pelas plantas, a uréia precisa sofrer transformações (hidrólise) e, neste processo, o N pode ser perdido por volatilização na forma de NH_3 , principalmente, quando aplicado na superfície do solo.

Na avaliação do aproveitamento do N-fertilizante realizada em culturas de interesse econômico como arroz, cana-de-açúcar, feijão, milho, soja, trigo, citros e espécies forrageiras, observou-se que, na maioria das pesquisas, independentemente da cultura, o aproveitamento foi de 50% ou menos, permanecendo no solo, para efeito residual, 30% ou menos do N-fertilizante (STIPP; PROCHNOW, 2008).

2.3.2.3 Modos de aplicação

No Brasil, existe o conceito generalizado entre técnicos e produtores de que, aumentando-se o número de parcelamento da adubação nitrogenada, aumenta-se a eficiência do uso do N e reduzem-se as perdas, principalmente por lixiviação (COELHO et al, 2007).

Como consequência e devido às facilidades que os sistemas de irrigação oferecem para aplicação de fertilizantes via água, é comum o parcelamento do fertilizante nitrogenado em quatro ou até seis ou oito vezes durante o ciclo da cultura. Entretanto, experimentos conduzidos no Brasil evidenciaram que a aplicação parcelada de N em duas, três ou mais vezes para a cultura do milho, com doses variando de 60 a 120 kg ha⁻¹, em solos de textura média e argilosa, não refletiram em maiores produtividades em relação a uma única aplicação na fase inicial de maior exigência da cultura, ou seja, 30 a 35 dias após a semeadura, conforme mostram os resultados obtidos por Novais et al. (1974), Neptune (1977), Grove et al. (1980) e Cruz et al. (2008). É importante salientar que as informações apresentadas anteriormente foram obtidas em solos de textura argilosa a média, com teores de argila variando de 30 a 60 %, não sendo, portanto, válidas para solos arenosos (80 a 90 % de areia), cujo manejo do N irá necessariamente requerer cuidados especiais (COELHO, 2003).

Para as condições do Brasil, de acordo com as informações disponíveis, Coelho et al. (1991a) mencionam que, em geral, deve-se usar maior número de parcelamento sob as condições: a) altas doses de N (120 a 200 kg ha⁻¹), b) solos de textura arenosa; c) áreas sujeitas a chuvas de alta intensidade. Uma única aplicação pode ser feita sob as seguintes condições: a) doses baixas ou médias de N (60 a 120 kg ha⁻¹); b) solos de textura média e/ou argilosa; c) plantio intensivo, sem o uso de irrigação, em que a distribuição do fertilizante é feita mecanicamente.

A alternativa de aplicar todo o N a lanço ou em sulcos, na pré-semeadura do milho, tem despertado grande interesse, porque apresenta algumas vantagens operacionais, como maior flexibilidade no período de execução da adubação, racionalização do uso de máquinas e mão-de-obra (SÁ, 1996; BASSO; CERETTA, 2000). Entretanto, devido à extrema complexidade da dinâmica do N no solo, a qual é fortemente influenciada pelas variáveis ambientais, os resultados de experimentos de campo não são consistentes o bastante para que se possa generalizar a recomendação dessa prática (COELHO et al., 2003). Por outro lado, a aplicação de N em cobertura quase sempre assegura incrementos significativos na produtividade de milho, independente de a precipitação pluvial ser normal ou excessiva, principalmente no período inicial de desenvolvimento da cultura.

2.3.2.4 Eficiência da adubação nitrogenada no milho

Em cereais, a eficiência de uso de nitrogênio (EUN) pode ser definida como a quantidade de grãos produzida por kg de N aplicado. Ela tem dois componentes importantes:

o primeiro é a eficiência de absorção e o segundo a eficiência de utilização (Figura 2). A absorção se refere à passagem do N do solo para o interior das células das raízes, enquanto a utilização se refere à capacidade da planta em transformar o N absorvido em grãos (PURCINO et al., 2000).

A eficiência mundial estimada de uso do N em cereais é de apenas 33%. Considerando os 67% de N que não são aproveitados, tem-se uma perda anual de 15,9 bilhões de dólares em fertilização nitrogenada (RAUN; JOHNSON, 1999), além dos prováveis impactos negativos ao ambiente. Uma das alternativas para aumentar a EUN seria a sincronização da época de aplicação de N com a necessidade da planta (RAMBO et. al., 2007).

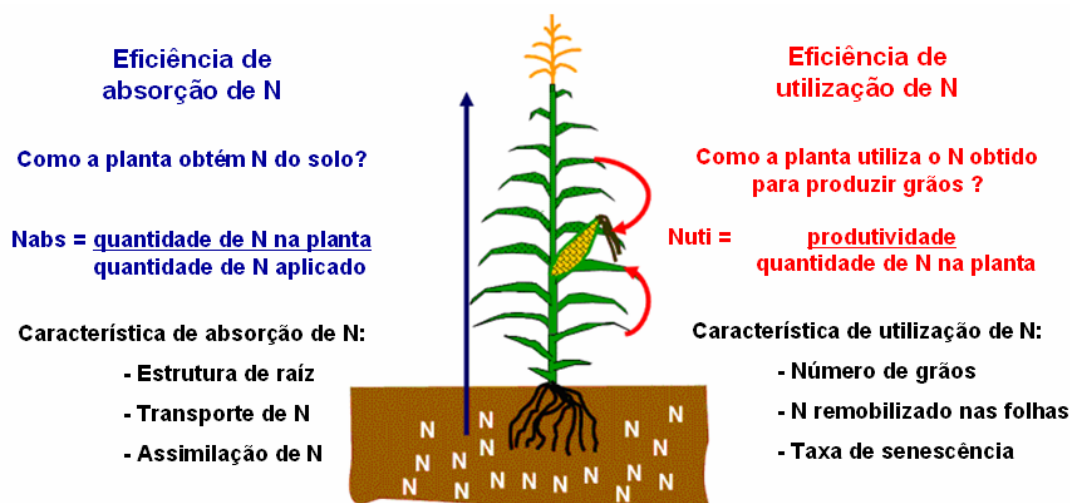


Figura 2 – Ilustração comparativa da eficiência de absorção de N e da eficiência de utilização do N absorvido. Adaptado de Moose (2008).

Para o nitrogênio e o fósforo, o milho apresenta dois períodos de máxima absorção, durante as fases de desenvolvimento vegetativo e reprodutivo ou formação da espiga, e menores taxas de absorção no período compreendido entre a emissão do pendão e o início da formação da espiga (COELHO et al., 2003). Segundo Muzilli (1989), a partir do florescimento o crescimento diminui e passa a predominar a translocação dos compostos acumulados na parte vegetativa para os grãos em formação (Figura 3).

A absorção de N é mais acentuada no período de crescimento vegetativo (entre os 25 a 45 dias), quando a planta chega a acumular cerca de 43% do que necessita. Entre as fases de crescimento vegetativo pleno (8 a 10 folhas ao florescimento), a planta ainda irá absorver mais de 31% de suas necessidades totais, o que mostra a importância de uma adequada

disponibilidade do N no solo até que seja atingido o período de florescimento (MUZILLI, 1989).

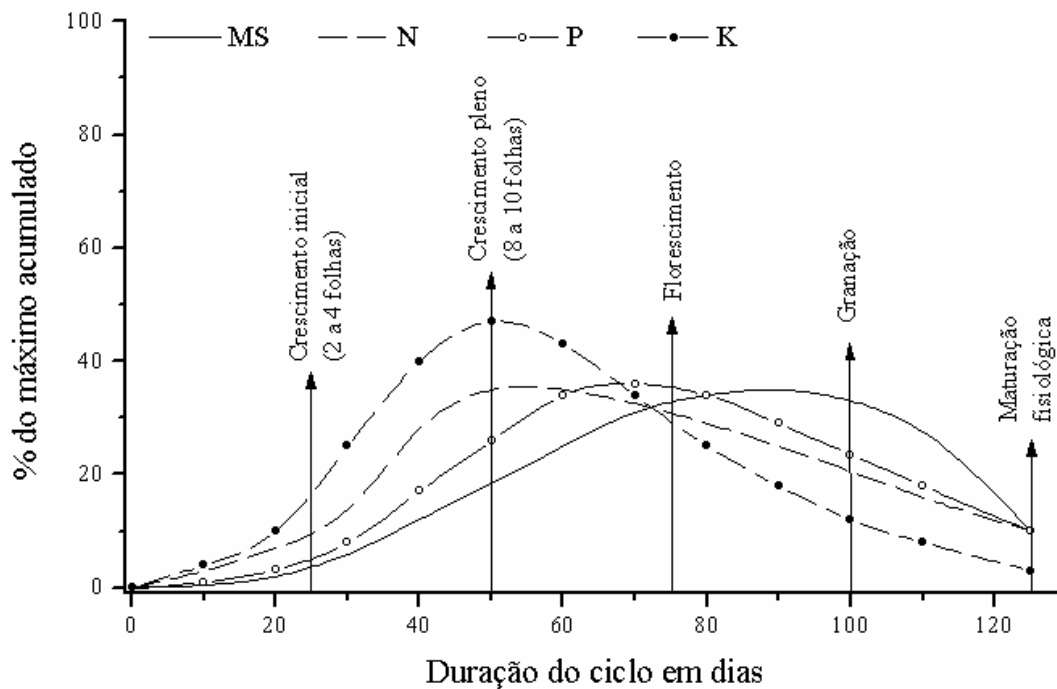


Figura 3 – Curvas de produção de matéria seca e de adubação de N, P e K pelo milho, em diferentes fases de desenvolvimento da planta. Adaptado de Muzilli, 1989.

Existem diversos caminhos possíveis para aumentar a EUN. Um dos mais simples é a diminuição nas doses de adubos para níveis que sejam produtivos e seguros (FERNÁNDEZ et al., 1998). Outra possibilidade é o melhoramento genético, que já está gerando milhos produtivos para solos pobres em N (MACHADO, 1997; SANTOS et al., 1998; BUCHER, 2007). A maior eficiência do uso de N, em plantas, poderia permitir a produção sob baixo nível de fertilização nitrogenada. Para que este objetivo seja alcançado é necessário o melhor entendimento do controle fisiológico, bioquímico e molecular da absorção de N-NO_3^- (HARRISON et al., 2004). A redução do uso de fertilizantes nitrogenados pode ser alcançada através de técnicas eficientes de cultivo (BUCHER, 2007). Segundo Purcino (2000), já se sabe que os estímulos ambientais como luz, seca e a disponibilidade de nutrientes (principalmente o N e o P) ou a toxidez de alumínio tem influência na regulação da atividade das enzimas de assimilação de C e N pela fosforilação reversível destas proteínas.

Estudando as bases genéticas e bioquímicas da eficiência de uso de N em milho, Hirel et al. (2001) encontraram correlações significativas entre características fisiológicas (atividade das enzimas nitrato redutase; glutamina sintetase e teores de nitrato na parte aérea de plântulas

de milho) e características agronômicas (produção e peso de grãos). Em continuidade a este trabalho, Gallais e Hirel (2004) enfatizaram que estas correlações foram dependentes do nível de fertilização nitrogenada. Estes autores descrevem que sob alto nível de N, a EUN foi explicada pela variação da capacidade de absorção de N, enquanto sob baixo nível de fertilização, esta foi atribuída a variação da eficiência na utilização de N.

Avaliando a expressão dos genes que codificam enzimas de assimilação de N em variedades de arroz, Bucher (2007), descreve que a formação de reservas de $N-NO_3^-$ nos vacúolos é um fenômeno controlado geneticamente e, além de outros fatores, é dependente de uma baixa atividade da enzima nitrato redutase e de alta atividade da glutamina sintetase na fase vegetativa, sendo fatores essenciais no acúmulo de nitrato. Segundo o mesmo autor, é essencial o acúmulo desse nutriente, especialmente nas gramíneas, pois será de fundamental importância nas etapas posteriores de assimilação de N e produção de grãos.

O $N-NO_3^-$ é considerado a mais importante fonte de N mineral para o crescimento de plantas em solos aeróbicos. As plantas adquirem $N-NO_3^-$ da solução do solo, absorvendo-o através de transportadores específicos localizados na membrana plasmática das células da epiderme e do córtex da raiz. A capacidade de rápida absorção e acúmulo de $N-NO_3^-$, na fase inicial de crescimento, pode propiciar um maior estoque de N disponível para o metabolismo das plantas nas fases posteriores de seu ciclo, principalmente no enchimento dos grãos, e podem ser a razão do alto acúmulo de N nos grãos (BUCHER, 2007). Desse modo, a maior eficiência de aquisição de $N-NO_3^-$, a partir de baixas concentrações na solução externa, pode ser uma indicação de adaptação às condições de estresse nutricional (fluxos instáveis de N), como decorrente da disponibilidade sazonal de $N-NO_3^-$ em regiões tropicais.

2.3.3 Dificuldades em estabelecer a recomendação adequada de N para a cultura do milho

As principais formas de N disponíveis para as plantas são amônio ($N-NH_4^+$) e nitrato ($N-NO_3^-$), as quais representam menos de 2% do N total do solo (COELHO; FRANÇA, 1995). A variabilidade das condições meteorológicas e de solo, associada aos múltiplos processos que interferem na complexa dinâmica do N no solo (lixiviação, volatilização, imobilização-mobilização, nitrificação, desnitrificação, mineralização) e na sua relação com a planta, podem ocasionar grandes modificações na disponibilidade e na necessidade deste nutriente durante a ontogenia da planta (RAMBO et al., 2004).

Considerando-se que quase todo o N do solo se faz presente na forma orgânica, é importante considerar também o N que seria mineralizado durante o ciclo da cultura. Assim, um dos principais problemas do atual sistema de recomendação da adubação nitrogenada é que a determinação da quantidade de N a ser aplicada no milho é feita antes da semeadura, não ocorrendo o monitoramento deste elemento após a emergência. Sem dúvida, analisar apenas o teor de matéria orgânica tem sido uma limitação na avaliação da necessidade de se aplicar adubo nitrogenado.

Assim, o sistema vigente de recomendação pode estar sub ou superestimando a demanda nitrogenada do milho. No primeiro caso, haveria limitação ao potencial produtivo da cultura. No segundo, ocorreria redução nos lucros do produtor, pelo gasto desnecessário na compra de adubo nitrogenado, além de prejuízos ao ambiente, devido à contaminação de águas superficiais e subterrâneas pela lixiviação de nitrato.

A grande instabilidade nas formas de N mineral do solo e a baixa relação entre a fração do N orgânico e índices químicos de disponibilidade de N, dificultam a utilização de métodos analíticos de solo que possam prever a necessidade de adubação nitrogenada (MUZILLI, 1983). Aliadas a essas dificuldades, surgem ainda outras: as respostas do milho à adubação nitrogenada estão diretamente relacionadas com as condições climáticas (principalmente a ocorrência e distribuição de chuvas), uso e manejo do solo, tipo de sistema de cultivo, características inerentes aos cultivares (eficiência de resposta) e condições de manejo da cultura (população de plantas, época de semeadura, controle de ervas daninhas, entre outras).

2.3.3.1 Sistema de cultivo: Plantio Direto x Plantio Convencional

Considerando que no SPD os resíduos das culturas são mantidos na superfície do solo e são muito pouco misturados com o mesmo, a taxa de decomposição destes resíduos é menor do que se fossem incorporados, como no sistema convencional de preparo do solo (AMADO, 2000). A adoção do plantio direto criou novas perspectivas à melhoria da qualidade do solo e, do ponto de vista de fertilidade, aumento na disponibilidade de nutrientes, motivado principalmente pelo controle da erosão, reciclagem de nutrientes, atividade biológica e manejo de resíduos culturais. Neste novo ambiente proporcionado pelo plantio direto, a imobilização de N pode influenciar a disponibilidade de N, e dependendo dos sistemas de culturas, os solos podem apresentar deficiência de N nas fases iniciais de desenvolvimento do milho, especialmente quando o milho for cultivado em sucessão a gramíneas (BASSO, 1999).

A absorção de N pelas plantas nos dois sistemas pode ser considerada equivalente por unidade de produto colhido, ou seja, a eficiência de utilização de N pelas plantas é similar (WIETHÖLTER, 1996). Entretanto, a disponibilidade, sem dúvida, é diferenciada. Como a taxa de decomposição dos resíduos é menor no SPD, pelo menos nos períodos iniciais de implantação do sistema, a demanda de N é maior em relação ao sistema convencional (SÁ, 1996). Segundo Phillips; Young (1973), a demanda no SPD é de 20 a 25% superior, ou até maior se a cultura anterior for uma gramínea e a quantidade de resíduo for elevada.

Por esse motivo, em áreas onde o SPD tem menos de quatro anos (fase de implantação), recomenda-se aumentar o aporte de N na semeadura do milho, visando compensar parte do efeito negativo do aporte de resíduos culturais de alta relação C/N (SÁ, 1996). Segundo esse autor, após essa fase inicial de alta imobilização de N e, portanto, de menor disponibilidade às plantas, inicia-se, lentamente, o restabelecimento do equilíbrio entre imobilização e mineralização, à medida que o aporte de resíduos culturais proporcionar acúmulo de N orgânico na camada superficial do solo e, uma vez tendo atingido um novo equilíbrio de formação e de decomposição de MO, as demandas nos dois sistemas devem tornar-se equivalentes ou menores para o SPD.

Inúmeros resultados indicam a superioridade do SPD, em relação ao Sistema de Cultivo Convencional (SCC), na maioria das propriedades físicas, químicas e biológicas e no maior retorno econômico (BASSO, 1999). Sua expansão em grande parte do território brasileiro tem gerado intenso questionamento na área de Ciência do Solo, principalmente quanto aos processos básicos de transformação da MOS e da ciclagem de nutrientes (OLIVEIRA et al., 2002). Apesar do entendimento ainda incipiente desses processos, corretivos e fertilizantes têm sido recomendados com base em critérios adotados para SCC, insatisfatórios, em muitos casos (SÁ, 1996). Autores têm relatado que sistemas de manejo conservacionistas criam um ambiente no solo diferente do verificado no sistema convencional, com acúmulo superficial de matéria orgânica e de fertilizantes (SCHULTE; BUNDY, 1985) que devem ser melhor investigados.

A deficiência de N mais acentuada no milho em SPD do que em plantio convencional já era constatada quando o esquema de rotação de culturas era inadequado (MUZILLI, 1981b). A deficiência foi notada não apenas pelos teores de nutriente contidos nas folhas; com o decorrer do tempo, a cultura em SPD passou a apresentar colmos mais finos e menores tamanhos de espigas, que se refletiu em maior índice de quebramento de colmos e em menor produtividade de grãos. Segundo o autor, o problema está diretamente associado à taxa de mineralização de matéria orgânica e conseqüente liberação do N no solo.

Neste sentido, quando ocorre um aumento do teor de MO no solo no SPD pode-se esperar um aumento da disponibilidade de N a médio/longo prazo. Mas, por outro lado, um aumento do teor de MO também significa uma aumento de N imobilizado no solo (WIETHÖLTER, 1996). Por essa razão, durante os primeiros anos de estabelecimento do plantio direto, pode-se verificar um demanda um pouco maior de N (CANTARELLA, 1993) e, algum tempo após, quando o solo atingiu um novo patamar de MO (e de N), a demanda de N se estabiliza novamente, a não ser que os tetos de produtividade e de exportação de N do sistema tenham sido alterados significativamente (THOMAS; FRYE, 1984). Assim, com o aumento dos teores de MO que vem ocorrendo nos solos do Rio Grande do Sul nos últimos anos, conforme relatado por Rheinheimer et al. (2001), há de se esperar maior disponibilidade de N e menores respostas de N nos próximos anos.

2.3.3.2 O teor de matéria orgânica solo como principal indicador

No Sul do Brasil, mais especificamente nos estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina, o teor de matéria orgânica do solo tem sido utilizado como principal parâmetro indicativo da disponibilidade de N do solo durante a estação de cultivo (RAMBO et al., 2008), sendo a principal referência nas recomendações de adubação nitrogenada, seguido de informações sobre a expectativa de produtividade e da cultura anterior (CQFS-RS/SC, 2004). O teor de MOS é dividido em três classes: menor que 2,5%, entre 2,5 a 5% e maior que 5,0%. Quanto maior o teor de MOS de um solo, menor a quantidade de fertilizantes nitrogenados a ser adicionado às culturas.

O conteúdo de MOS é um atributo físico-químico (e biológico) normalmente associado ao histórico de manejo que é dado ao solo. Práticas de manejo do solo inadequadas são responsáveis pela diminuição da MOS, alterando suas propriedades, facilitando a erosão com conseqüente decréscimo da produção das culturas e promovendo a degradação ambiental (MARTINAZZO, 2006). Comparando-se os resultados de levantamentos da fertilidade do solo no Estado do Rio Grande do Sul, em função das práticas de manejo adotadas, obtidos em 1981 com os de 1988 (DRESCHER, 1991), observa-se uma significativa diminuição (19,7 para 5,9%) no percentual de solos enquadrados na classe alta e aumento (27,1 para 40,5%) no percentual da classe baixa. Os resultados são atribuídos à mobilização do solo no sistema de cultivo convencional, à erosão da camada superficial e ao aumento na utilização de áreas de solos com baixos teores originais de MOS. Comparando-se o levantamento feito em 1988 com o de 2000 (RHEINHEIMER et al., 2001), observa-se uma reversão de tendências, ou

diminuição no percentual de amostras enquadradas nas classes com baixos teores e aumento no percentual de amostras com teores médios e altos. Segundo os autores, boa parte dos solos que teve um manejo inadequado no período de 1981 a 1988 está recuperando os seus teores de MOS. Como a recomendação nitrogenada está baseada neste parâmetro, é provável que a dinâmica do N tenha sido alterado neste novo cenário agrícola. Essa conclusão corrobora com Sá (1996) e Fiorin (2007) e outros autores que mencionam que os primeiros 5 anos do SPD o mesmo seria um dreno de N (imobilização) e somente após esse equilíbrio passaria ser uma fonte (mineralização). Entretanto, este período pode ser variável e não possível de ser determinado apenas pelo teor de MOS, principalmente porque esse teor não evidencia em que estágio de transformação se encontram os compostos nitrogenados (WIETHÖLTER, 1996).

Deve-se destacar ainda que estes levantamentos não fazem distinção entre grupos de solos e os dados assim sumarizados não consideram os teores de argila do solo, que têm forte relação com o teor de MOS, por isso a inclusão de solos mais arenosos na agricultura também podem ter contribuído para acentuar diferenças entre 1981 e 1988.

2.3.3.3 A planta como um indicador

Uma das alternativas para avaliar a disponibilidade de N no solo é através da resposta da planta. Os parâmetros mais estudados no intuito de indicar o nível de N na planta para prever a necessidade de adubação de cobertura são o teor de nitrato no colmo, o teor e o acúmulo de N na folha e/ou planta e o teor relativo de clorofila na folha (RAMBO et al., 2004).

Todavia, somente é possível diagnosticar visualmente a deficiência de N na planta quando esta ocorre de forma aguda, quando, provavelmente, parte significativa da produção já estiver comprometida (FONTES, 2001). De forma geral, são necessários ajustes nas recomendações de N nas seguintes situações: a) quando uma mineralização intensa é esperada; b) quando há uma grande quantidade de resíduos; c) quando a cultura anterior foi uma leguminosa; d) quando foi aplicado fertilizante orgânico; e) quando o SPD é iniciado, ou f) quando é realizado um pastejo.

2.3.3.4 Estimativa da necessidade teórica de N

O desenvolvimento de procedimentos para estimar a necessidade de adubação do solo com P e K está bem mais avançado do que para N (WIETHÖLTER, 1996). Nas regiões

úmidas em especial há muita dificuldade para a obtenção de métodos de análise de solo para N cujos valores analíticos tenham uma correlação satisfatória com o desenvolvimento das plantas. Desta forma, as recomendações da adubação nitrogenada são baseadas em diversos critérios indiretos, incluindo por exemplo: expectativa de produtividade, histórico de uso anterior do solo, inferência de taxas de mineralização de N de adubos orgânicos e de resíduos, teor de matéria orgânica e análises de $N\text{-NO}_3^-$ e de $N\text{-NH}_4^+$ do solo, etc (CFS-RS/SC, 1995; RAIJ, 1995).

No Brasil, como já exposto, o teor de MOS é utilizado como parâmetro para o estabelecimento da adubação nitrogenada somente nos estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina (MIELNICZUK, 1982; ANGHINONI, 1986; WIETHÖLTER, 1993; CQFS-RS/SC, 1995; CQFS-RS/SC, 2004), pois nesta região constatou-se uma associação significativa entre o teor de matéria orgânica do solo e a resposta das culturas a N. Nos Estados Unidos (WELLS; THOMPSON, 1992; KLAPWYK; KETTERINGS, 2006) está sendo dada muita importância a análise de $N\text{-NO}_3^-$ do solo. De qualquer maneira, há uma grande necessidade para procedimentos que permitam mensurar as transformações de N no solo, envolvendo mineralização, desnitrificação, imobilização, fixação de N por organismos livres e simbióticos (ANGHINONI, 1986; DORAN; SMITH, 1987).

As recomendações paulistas para a adubação nitrogenada em cobertura são realizadas com base em curvas de resposta, histórico da área e produtividade esperada. A recomendação da adubação nitrogenada em cobertura para a cultura do milho de sequeiro, de modo geral, varia de 40 a 80 kg ha⁻¹ de N. Em agricultura irrigada, em que prevalece o uso de alta tecnologia, para a obtenção de elevadas produtividades, essa recomendação seria insuficiente. Nessas condições, doses de N variando de 100 a 150 kg ha⁻¹ podem ser necessárias para a obtenção de elevadas produtividades (COELHO; FRANÇA, 1995).

Dentre as principais informações requeridas para otimizar essa recomendação, incluem-se: a) a estimativa do potencial de mineralização do N do solo; b) a quantidade de N mineralizado ou imobilizado pela cultura de antecessora; c) o requerimento do N pela cultura, para atingir a expectativa de produção; d) a expectativa da eficiência de recuperação do N disponível das diferentes fontes (solo, resíduo de cultura, fertilizante mineral).

Na tomada de decisão sobre a necessidade de adubação nitrogenada, alguns fatores devem ser considerados, tais como: condições edafoclimáticas, sistema de cultivo (plantio direto e convencional), época de semeadura (época normal e safrinha), responsividade do material genético, rotação de culturas, época e modo de aplicação, fontes de N, aspectos

econômicos e operacionais. Isso enfatiza a regra de que as recomendações de N devem ser cada vez mais específicas e não generalizadas.

2.4 NOVAS TECNOLOGIAS NO MANEJO DA ADUBAÇÃO NITROGENADA

2.4.1 Uso de marcador com ^{15}N na liberação de N por resíduos culturais

Nos estudos dos diversos processos da dinâmica de nutrientes, os métodos baseados no emprego de isótopos são de grande importância e contribuem de forma significativa para aumento da produção mundial de alimentos. Uma das grandes vantagens do uso de isótopos é que de um único experimento podem-se retirar muitas informações de ordem quantitativa e qualitativa sobre certo elemento, ou processo, no sistema solo-planta-atmosfera (ALVES et al., 1999).

Em relação ao N, pode-se dizer que qualquer material existente na natureza que possui N em sua constituição apresentará uma proporção de 0,3663% de átomos de ^{15}N em relação ao total de átomos de N, que, em sua maioria, é composto do isótopo ^{14}N (GILLER; WILSON, 1993). Este valor é conhecido com abundância natural de ^{15}N . Através de técnicas que empregam resinas de troca iônica, é possível obter substâncias nitrogenadas com uma proporção de ^{15}N maior do que a encontrada na natureza (ex.: com 1% de átomos de ^{15}N em relação ao total). De fato, a grande maioria das metodologias que empregam o isótopo ^{15}N utilizam substâncias enriquecidas em ^{15}N . Quando se trabalha com substâncias enriquecidas, é comum utilizar-se o resultado de enriquecimento em excesso, ou seja, o valor de enriquecimento de átomos de ^{15}N acima da abundância natural. Em termos práticos, desconta-se o valor 0,3663% do resultado da análise de enriquecimento de átomos de ^{15}N da amostra. Assim, o ar atmosférico, que apresenta 0,3663% de átomos de ^{15}N (abundância natural), teria 0 % de átomos de ^{15}N em excesso.

O isótopo ^{15}N tem grande aplicação para se estudar a contribuição do N oriundo da decomposição de resíduos orgânicos para a nutrição das plantas, o que pode ser feito através da marcação do solo ou planta que vai gerar o resíduo, como, por exemplo, um adubo verde. Neste caso, o resíduo de interesse é marcado através da adição de um fertilizante marcado com ^{15}N durante o crescimento da planta. No caso de resíduos de culturas de cobertura (ex.: ervilhaca) é comum o interesse em medir a transferência do N existente nos resíduos para a cultura sucessora (ex.: milho). Neste caso, a espécie utilizada com cultura de cobertura é fertilizada com ^{15}N . A planta cresce em um meio onde a fonte de N está enriquecida com ^{15}N

e, conseqüentemente os tecidos dessa planta apresentam excesso de ^{15}N . Em experimentos de campo, uma área é delimitada (microparcela) e o material existente é substituído, na mesma proporção, pelo resíduo marcado (ver Anexo 17).

No entanto, antes de se iniciar um trabalho com isótopos estáveis, é fundamental que se disponha de um espectrômetro de massas, que, dependendo da situação, deverá ser calibrado para análises próximas à abundância natural.

2.4.2 Leituras instantâneas do teor de clorofila – Uso do clorofilômetro manual

Dentre os parâmetros de planta, o teor relativo de clorofila na folha é o que tem sido mais estudado nos últimos anos (RAMBO et al., 2004). A clorofila é um pigmento que reflete a cor verde nas plantas e está diretamente associado com o potencial da atividade fotossintética, assim como o estado nutricional das plantas, geralmente, está associado com a quantidade e qualidade de clorofila (ZOTARELLI et al., 2003). O método fundamenta-se na correlação positiva existente entre o teor de clorofila e o teor de N na planta (BLACKMER; SCHEPERS, 1994; ARGENTA et al., 2001). Esta relação se deve ao fato de que 50 a 70% do N total das folhas ser integrante de enzimas que estão associadas aos cloroplastos (CHAPMAN; BARRETO, 1997).

Os métodos laboratoriais de determinação de clorofila na folha são destrutivos, muito trabalhosos e demorados. O desenvolvimento de um medidor portátil, como o Minolta SPAD-502[®], denominado clorofilômetro, permitiu a obtenção de valores indiretos do teor de clorofila presente na folha de modo não destrutivo, rápido e simples. Esse equipamento possui diodos que emitem luz a 650 nm (vermelho) e a 940 nm (infravermelho). A luz em 650 nm situa-se próxima dos dois comprimentos primários de onda associados à atividade da clorofila (645 e 663 nm). O comprimento de onda de 940 nm serve como referência interna para compensar as diferenças na espessura ou no conteúdo de água da folha ou devidas a outros fatores (WASKOM et al., 1996). A luz que passa através da amostra da folha atinge um receptor (fotodiodo de silicone) que converte a luz transmitida em sinais elétricos analógicos. Esses sinais são convertidos em sinais digitais por meio do conversor A/D (MINOLTA, 1989) e são usados por um microprocessador para calcular os valores SPAD ("Soil Plant Analysis Development"), que são mostrados num visor. Os valores obtidos são proporcionais ao teor de clorofila presente na folha, conforme estudos realizados na cultura do milho (ARGENTA et al., 2002).

Segundo revisão bibliográfica realizada por Rambo et al. (2004), a utilização do clorofilômetro no manejo da adubação nitrogenada do milho vem sendo estudada sob duas abordagens: uso de valores críticos do teor relativo de clorofila e uso de um índice de suficiência do N. A utilização de valores críticos pressupõe que, para cada fase de desenvolvimento, haja um valor mínimo do teor relativo de clorofila (nível crítico) que a planta deve apresentar, em função da leitura com o clorofilômetro, que corresponde ao nível mínimo de clorofila necessário naquela fase da ontogenia para maximizar a produtividade de grãos. Leituras abaixo deste nível indicam necessidade de suplementação de N através de adubação, enquanto acima do valor crítico não se recomenda a fertilização. Alguns estudos têm determinado valores críticos para a cultura do milho durante a sua ontogenia. Neste sentido, Argenta (2001) obteve os valores de 45,4 e 52,1 SPAD para as fases de três a quatro folhas e seis a sete folhas, respectivamente.

Segundo Rambo et al. (2004), ainda não existem critérios estabelecidos na literatura para definição da quantidade e época de aplicação da dose de N a ser aplicada na faixa de referência. Assim, se estas faixas não forem manejadas corretamente, a necessidade de aplicação de N em cobertura pode ser sub ou superestimada, causando redução na produtividade de grãos ou contaminação ambiental por excesso de N aplicado (SUNDERMAN et al., 1997).

2.4.3 Imageamento aéreo por infravermelho – Sensoriamento remoto

Conceitualmente, sensoriamento remoto é o processo de aquisição de informações sobre objetos de uma plataforma remota tal como torres, aviões ou satélites. Segundo o Conselho Nacional de Pesquisa dos Estados Unidos - NRC (1997), o sensoriamento remoto é uma fonte de dados potencialmente importante para o manejo localizado de plantas, possibilitando a obtenção de informações espaciais e temporais.

Por mais de 30 anos, o sensoriamento remoto tem sido apontado como uma fonte de informações para o manejo de plantas. Segundo Shanahan et al. (2001), a pesquisa pioneira de Colwell (1956) mostrou que a fotografia aérea infravermelha poderia ser utilizada para detectar baixos vigores de lavouras de trigo com doenças. Técnicas de sensoriamento remoto, em particular, imagens multiespectrais e refletância infravermelha, podem prover um instantâneo e não destrutivo método para avaliar quantitativamente a capacidade das plantas em realizar fotossíntese (MA et al., 1996).

As imagens multiespectrais utilizam a interação entre a radiação eletromagnética, o dossel de plantas, os espectros visíveis e o infravermelho. Permitem, assim, qualificar a biomassa em termos de vigor, e ainda captar alterações na fisiologia das plantas como doenças, pragas, desnutrição ou qualquer outro tipo de estresse. A tecnologia multiespectral permite a separação de faixas do espectro da luz refletida pelas plantas (verde, vermelho, azul e infravermelho próximo), o que possibilita a geração de índice de vegetação que expressam o vigor da planta.

2.4.4 Tecnologia de aplicação nitrogenada a taxa variável

A crescente expansão agrícola no Brasil vem fazendo com que novas áreas sejam incorporadas ao sistema produtivo, permitindo o aumento horizontal da produtividade. Entretanto, em muitas áreas e, em especial no Sul do Brasil, o esgotamento da fronteira agrícola vem demandando a necessidade de aumentos verticais, tanto na produtividade como na rentabilidade das lavouras. Essa busca está despertando nos agricultores inovadores um crescente interesse no uso de novas tecnologias que potencializem a produtividade das áreas agrícolas. São exemplos de transformações do sistema produtivo de grãos no Sul do Brasil, nas duas últimas décadas, a adoção do SPD, o uso da biotecnologia, a manutenção do solo permanentemente coberto com culturas de cobertura de inverno, o crescente uso de safra/safrinha, a mudança do espaçamento do milho e o uso de irrigação com pivô central e técnicas de agricultura de precisão (LEMANSKI, 2007).

Há alguns anos, pesquisas têm sinalizado e/ou considerado a variabilidade existente (as variações ocorridas) dentro da unidade de cultivo, buscando minimizar as variações através do gerenciamento localizado. Isso tem sido possível graças aos avanços das tecnologias, que possibilitaram o estudo da variabilidade espacial das propriedades do solo e a geração de mapas de produtividade georeferenciados. O conjunto dessas técnicas de georeferenciamento da produtividade vem sendo chamado de “Agricultura de Precisão”, na qual se preconiza aplicar no local correto, no momento adequado, as quantidades de insumos requeridas para áreas cada vez menores e mais homogêneas, tanto quanto a tecnologia disponível e os custos envolvidos o permitam (DOBERMANN; PING, 2004).

3 OBJETIVO GERAL

Estudar a dinâmica de nitrogênio no solo com o uso de culturas de cobertura de inverno e avaliar o uso de novas tecnologias que possam melhorar a eficiência do manejo da adubação nitrogenada na cultura do milho em sistema plantio direto.

4 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

Capítulo I: avaliar a dinâmica de decomposição e liberação de N em função da quantidade de resíduos aportados ao solo por diferentes culturas de cobertura de inverno sob sistema plantio direto.

Capítulo II: avaliar a disponibilidade de N mineral no solo em função da quantidade de resíduos aportados por diferentes culturas de cobertura de inverno sob sistema plantio direto, associadas ou não à aplicação de fertilizante nitrogenado.

Capítulo III: avaliar a absorção de N e a produtividade de milho em função da quantidade de resíduos aportados por diferentes culturas de cobertura de inverno sob sistema plantio direto, combinados com doses de N.

Capítulo IV: avaliar o valor fertilizante do N oriundo dos resíduos de ervilhaca para o milho sob sistema plantio direto através de técnicas isotópicas com ^{15}N .

Capítulo V: avaliar o uso de parâmetros de solo e planta na recomendação de adubação nitrogenada à taxa variável no milho, como forma de aumentar a eficiência do N aplicado.

5 CAPÍTULO I – DECOMPOSIÇÃO E LIBERAÇÃO DE NITROGÊNIO EM FUNÇÃO DA QUANTIDADE DE RESÍDUOS APORTADA AO SOLO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO

5.1 Resumo

A qualificação do sistema plantio direto requer elevada adição de diferentes tipos de resíduos ao solo, cada um com específica cinética de decomposição, determinante na dinâmica de mineralização e imobilização de nitrogênio (N) no solo. Este trabalho teve como objetivo avaliar o processo de decomposição e a liberação de N dos resíduos culturais de plantas de cobertura de inverno quando diferentes quantidades foram aportadas ao solo. O experimento foi realizado na área experimental do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), RS, sendo conduzido em delineamento experimental de blocos ao acaso, com 3 repetições, durante as safras de 2003/04 e 2004/05. Avaliou-se a decomposição e liberação de N dos resíduos de aveia preta, nabo forrageiro e ervilhaca através de sacos de decomposição contendo quantidades equivalentes a 3, 6 e 9 Mg ha⁻¹ de matéria seca. As coletas foram realizadas aos 7, 14, 28, 42, 63, 84, 113 e 141 dias após o manejo das culturas cobertura. As diferentes quantidades de resíduos aportadas não influenciaram significativamente nas taxas de decomposição. Entretanto, os processos de mineralização e imobilização foram intensificados de acordo com a composição bioquímica de cada tipo de resíduo, especialmente a relação C/N. Os resíduos de ervilhaca liberaram até 50% da quantidade acumulada de N nos primeiros 30 dias após o manejo, promovendo, possivelmente, elevada disponibilidade de N ao solo neste período. Os resíduos de aveia preta apresentaram menor taxa de decomposição, imobilizando temporariamente parte do N e liberando-o 2 a 3 meses após ao manejo.

Palavras-chave: decomposição; culturas de cobertura; nitrogênio; mineralização de N; tempo de meia-vida.

5.2 Abstract

DECOMPOSITION AND NITROGEN RELEASE IN FUNCTION OF THE AMOUNT OF RESIDUES ADDED TO SOIL UNDER NO-TILLAGE SYSTEM

The qualification of the no-tillage system requests higher addition of different types of residues to the soil, each one with specific decomposition kinetics, decisive in the mineralization and immobilization dynamics of the nitrogen (N) in the soil. This work had as an objective to evaluate the decomposition process and N released from residues by winter cover crops when different amounts that were added to the soil. The experiment was carried out in the experimental area of the Soil Department at Federal University of Santa Maria, RS, in random complete block design, with three repetitions, during 04/2003 and 05/2004. Evaluated was the decomposition and the N released from black oat, oil radish and hairy vetch residues through litterbags of decomposition containing amounts equivalents to 3, 6 and 9 Mg dry matter ha⁻¹. The samples were accomplished to the 7, 14, 28, 42, 63, 84, 113 and 141 days after cover crops management. The different amounts of residues added did not influence significantly the decomposition rates. However, the mineralization and immobilization processes were intensified with the biochemical composition of each residue type, especially the C/N relationship. The hairy vetch residues released up to 50% of the accumulated amount of N in the first 30 days after the management, promoting, possibly, high N availability to the soil in this period. The black oat residues presented smaller decomposition rates, immobilizing part of N temporarily and released this 2 to 3 months after the management.

Key-words: decomposition; cover crops; nitrogen; N mineralization; half-life time.

5.3 Introdução

A decomposição dos resíduos culturais aportados ao solo é realizada, essencialmente, pelos microrganismos heterotróficos que retiram elementos essenciais para a sua nutrição e carbono necessário à produção de energia e formação de tecidos microbianos (AITA, 1997). Porém, fatores bióticos e abióticos determinam a velocidade do processo de decomposição e definem a persistência desses resíduos na superfície do solo (ESPÍNOLA et al., 2006).

Há vários fatores que interferem na atividade microbiana e, conseqüentemente, na taxa de decomposição dos resíduos. Entre eles está o contato solo/resíduo, semi-incorporado ou incorporado (SCHOMBERG et al., 1994; AMADO et al., 2000), o regime hídrico (PARTON et al., 2007), a adição de N inorgânico ao solo (WIETHÖLTER, 1996), a temperatura (KOENIG et al., 1994), a relação C/N (TIAN et al., 1992; JAMA; NAIR, 1996; JANSSEN, 1996; MARY et al., 1996) e lignina/N (BUCHANAN; KING, 1993), o teor de lignina e polifenóis (PALM; SANCHEZ, 1991; TIAN et al., 1992; KOENIG et al., 1994; JAMA; NAIR, 1996) e a concentração de N no tecido vegetal (MARY et al., 1996; PARTON et al., 2007).

Entre esses fatores, a relação C/N dos resíduos adicionados ao solo assume importante papel na decomposição e na relação entre mineralização e imobilização de N à solução do solo. Janssen (1996), analisando vários estudos relacionados à mineralização do N, mostra que a fração de N orgânico mineralizada está inversamente relacionada à relação C/N, de maneira idêntica à decomposição dos resíduos. Na literatura, são encontrados diversos valores de relação C/N, a partir dos quais ocorre imobilização líquida de N (KUMAR; GOH, 2003). Contudo, estes variam com o tipo de planta e o estágio de maturação que estas são adicionadas ao solo (MONTEIRO et al., 2002).

Geralmente se aceita que materiais com relação C/N = 25 causam equilíbrio entre os processos de imobilização e mineralização. Valores superiores a este causam imobilização líquida, enquanto que valores inferiores a 25 promovem mineralização líquida de N ao solo (AITA, 1997). Kudeyarov (1999) demonstrou com base em Hart et al. (1986), que a imobilização ocorria no momento em que a relação C/N era > 25. Entretanto, a imobilização pode ocorrer em qualquer fase da decomposição dos resíduos. Jensen (1997), trabalhando com palha de lentilha, encontrou imobilização líquida nos períodos iniciais de decomposição, quando a relação C/N era somente de 15.

Em condições de campo, resíduos com maior relação C/N formam uma cobertura morta estável, que contribui para a estruturação do solo e fornece proteção ao impacto de

gotas de chuva e a radiação solar (COSTA et al., 1992), enquanto que resíduos com menor relação C/N favorece a mineralização de N, com reflexos positivos sobre o suprimento desse nutriente às espécies não-leguminosas em sucessão (DERPSCH et al., 1985; HEINZMANN, 1985; TEIXEIRA et al., 1994). No sistema plantio direto, em comparação ao plantio convencional, pode-se afirmar que a mineralização do N é mais lenta (SIDIRAS; PAVAN, 1985) devido, principalmente, ao não fracionamento físico dos resíduos e ao menor contato do material orgânico com o solo, evitando assim, a ação rápida de microrganismos (AMADO et al., 2000).

Em manejos conservacionistas, preconiza-se a manutenção de resíduos, a fim de proteger a superfície do solo pelo maior período de tempo possível (MAI et al., 2003). Por outro lado, para a cultura de cobertura atender a demanda em N da cultura subsequente, há a necessidade de que a liberação de N dos resíduos ocorra em sincronismo com a demanda da cultura em sucessão (AMADO et al., 2000). Combinar estes dois objetivos tem sido um desafio para técnicos e agricultores, pois, embora uma significativa quantidade de N possa existir na parte aérea das culturas de cobertura, a real quantidade de N que ficará disponível para a cultura sucessora irá depender da extensão da decomposição dos resíduos dentro da estação de crescimento da cultura econômica e da dinâmica de mineralização e imobilização de cada tipo e quantidade de resíduo aportado ao solo (AMADO, 1997). Assim, a previsão de sincronismo entre a demanda da cultura e a disponibilização de N somente será possível com o pleno conhecimento do processo de decomposição em condições de campo e seus principais fatores determinantes. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar a dinâmica de decomposição e liberação de N em função da quantidade de resíduos aportado ao solo por diferentes culturas de cobertura de inverno sob sistema plantio direto.

5.4 Material e Métodos

O experimento foi realizado na área experimental do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), RS, em um ARGISSOLO VERMELHO Distrófico arênico (EMBRAPA, 2006). O trabalho foi conduzido com delineamento em blocos ao acaso, com 3 repetições, durante as safras 2003/04 e 2004/05. O clima da região é do tipo “Cfa2” (subtropical úmido), de acordo com a classificação climática de Köppen, com precipitação média anual de 1.686 mm e temperatura média anual de 19,3° C, variando mensalmente entre 9,3 e 31,5° C.

Avaliou-se a dinâmica de decomposição e liberação de N de resíduos culturais de aveia preta (*Avena strigosa* Schreb), ervilhaca peluda (*Vicia villosa* Roth) e nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.) através de sacos de decomposição confeccionados em náilon, com malha de 0,5 mm e dimensões externas de 18 x 19 cm.

Os resíduos culturais foram coletados e fracionados de modo a se adequarem ao tamanho dos sacos de decomposição. Os sacos foram preenchidos com quantidades equivalentes a 3, 6 e 9 Mg ha⁻¹ de matéria seca (MS). Para isso, utilizaram-se coeficientes de relação entre matéria verde e MS, obtidos uma semana antes do início do manejo das culturas de cobertura. Assim, para cada cultura de cobertura foi estabelecida a quantidade proporcional de resíduos frescos a serem acondicionados nos sacos de decomposição para atingir os níveis propostos, sendo que para a aveia preta foi levada em consideração a proporcionalidade de panículas e para o nabo forrageiro a proporcionalidade de folhas, talos e síliquas. Na Tabela 1 é apresentada a MS equivalente em kg ha⁻¹ de cada nível pretendido, sendo que o N acumulado foi proporcional ao tipo e à quantidade de resíduo aportado dentro dos sacos de decomposição. Apenas não foi possível obter os níveis pré-estabelecidos (3, 6 e 9 Mg ha⁻¹ de MS) com resíduos de ervilhaca, sendo que o maior aporte (9 Mg ha⁻¹ de MS) não ultrapassou 6 Mg ha⁻¹ de MS.

Tabela 1 – Quantidade de resíduo adicionado aos sacos de decomposição e o N acumulado em 2003 e 2004.

Culturas de cobertura	NR ¹	Matéria seca (x) (kg ha ⁻¹)		N acumulado (y) (kg ha ⁻¹)	
		2003	2004	2003	2004
Aveia preta	3	3409 ^{±149}	2910 ^{±117}	37,8 ^{±2,1}	31,3 ^{±4,2}
	6	6348 ^{±43}	6571 ^{±84}	68,0 ^{±2,1}	69,3 ^{±4,1}
	9	10516 ^{±312}	9601 ^{±228}	84,1 ^{±2,1}	112,0 ^{±7,5}
		Equação média ³ (r ² = 0,85)		y = 0,009 x + 9,0	
Nabo forrageiro	3	2889 ^{±320}	3546 ^{±84}	48,6 ^{±18,1}	51,2 ^{±7,8}
	6	5884 ^{±146}	7378 ^{±484}	65,6 ^{±7,6}	115,8 ^{±21,8}
	9	8450 ^{±437}	9378 ^{±925}	111,6 ^{±10,0}	148,1 ^{±48,0}
		Equação média (r ² = 0,82)		y = 0,018 x - 18,4	
Ervilhaca	3	2017 ^{±171}	1693 ^{±95}	86,3 ^{±9,0}	52,0 ^{±5,2}
	6	3649 ^{±300}	4047 ^{±200}	149,7 ^{±18,1}	101,7 ^{±9,4}
	9	5015 ^{±282}	5959 ^{±772}	167,1 ^{±10,1}	152,5 ^{±19,3}
		Equação média (r ² = 0,73)		y = 0,023 x + 31,5	

¹ NR = Nível de resíduos pretendido (kg ha⁻¹ de matéria seca).

² ± = Desvio padrão.

³ Média de 2003 e 2004.

Imediatamente após o manejo das culturas de inverno (07/10/2003 e 23/09/2004), os sacos de decomposição foram colocados a campo, visando similaridade das condições climáticas. Cada nível de resíduo recebeu 24 sacos de decomposição, distribuídos paralelamente às linhas de milho. As coletas foram realizadas aos 7, 14, 28, 42, 63, 84, 113 e 141 dias após sua colocação no campo em ambos os anos avaliados, com 3 repetições por data de coleta.

Após cada coleta, os resíduos culturais remanescentes nos sacos de decomposição foram secos em estufa a 65 °C até peso constante, para a determinação da MS e o N remanescente no tecido. A decomposição dos resíduos de aveia e ervilhaca foi avaliada em campo pela perda de peso em função do tempo. O preparo das amostras e a descontaminação do solo seguiu a metodologia descrita em Amado et al. (2003). Para a determinação da quantidade de N contido nos resíduos culturais, seguiu-se a metodologia descrita por Tedesco et al. (1995).

Para descrever a decomposição dos resíduos, aplicou-se o modelo de decaimento exponencial duplo descrito por Plantae; Parton (2007):

$$P_t = A e^{(-k_a t)} + B e^{(-k_b t)}, \text{ em que:} \quad (1)$$

P_t é o percentual do resíduo existente no tempo t ; A é a proporção do compartimento de resíduo lábil (resíduo potencialmente decomponível); B é a proporção do compartimento de resíduo recalcitrante; k_a e k_b são constantes de decomposição de cada compartimento. A partir dos valores da constante de decomposição da MS, calculou-se o tempo de meia-vida ($t_{1/2}$) de cada compartimento (o tempo necessário para que 50% da MS seja decomposta). Para este cálculo, utilizou-se a fórmula cuja dedução também é apresentada por Plantae; Parton (2007):

$$t_{1/2} = 0,693/k \quad (2)$$

Os dados obtidos foram submetidos à análise da variância. Para os fatores de natureza qualitativa, as médias de tratamentos foram comparadas através do teste de Duncan ou Diferença Mínima Significativa ($p < 0,05$). Os dados referentes à taxa de decomposição foram ajustados por modelos não lineares de regressão, para cada ano de estudo (2003 e 2004). As curvas de decomposição e a análise estatística foram realizados com ajuda dos softwares

PlotIT 3.2 (SCIENTIFIC PROGRAMMING ENTERPRISES, Haslsett, 1997) e Origin 5.0 (MICROCAL SOFTWARE, INC., 1997).

5.5 Resultados e Discussão

5.5.1 Relação C/N e quantidade de N aportado pelos resíduos

Os resultados apresentam significativa diferença no conteúdo de N e na relação C/N dos resíduos culturais (Tabela 2). As menores concentrações de N foram encontradas nos resíduos de aveia preta ($\bar{x} = 1,05\%$), seguido pelos resíduos de nabo forrageiro ($\bar{x} = 1,52\%$), e as maiores concentrações foram obtidas com os resíduos de ervilhaca ($\bar{x} = 3,26\%$) que, segundo Giller; Wilson (2003), estaria associada a capacidade de fixar biologicamente 70 a 80% do N da atmosfera.

Independente do ano agrícola, os resíduos de ervilhaca apresentaram as menores relações C/N, variando de 11 a 16, respectivamente em 2003 e 2004. Já os resíduos de aveia preta apresentaram sempre as maiores relações C/N, variando de 44 a 39, respectivamente em 2003 e 2004, enquanto que o nabo forrageiro apresentou valores intermediários, variando de 32 a 26, respectivamente em 2003 e 2004 (Tabela 2). Através das equações médias entre anos e quantidade de resíduo aportadas foi possível estabelecer que, para cada tonelada de resíduo adicionada ao solo, 9, 18 e 23 kg ha⁻¹ de N na forma orgânica foram adicionado, respectivamente, com a aveia preta, nabo forrageiro e ervilhaca (Tabela 1). Embora tenha ocorrido variação entre os anos, estes valores corroboram com a média de outros resultados obtidos com culturas de cobertura no Rio Grande do Sul (GIACOMINI, 2001; SANTI et al., 2003; FIORIN, 2007).

Tabela 2 – Conteúdo de N e relação C/N dos resíduos das culturas de cobertura em 2003 e 2004.

Culturas de cobertura	Aveia preta	Nabo forrageiro	Ervilhaca
	2003		
Carbono (%)	43,5 a ¹	43,8 a	43,0 a
Nitrogênio (%)	0,99 c	1,37 b	3,90 a
Relação C/N	44:1 a	32:1 b	11:1 c
	2004		
Carbono (%)	43,2 a	42,0 b	43,7 a
Nitrogênio (%)	1,10 c	1,63 b	2,61 a
Relação C/N	39:1 a	26:1 b	16:7 c

¹ Médias não seguidas pela mesma letra na linha diferem pelo teste de Duncan ($p < 0,05$).

5.5.2 Cinética de decomposição e liberação de N

Analisando os resultados da decomposição das diferentes culturas de cobertura, observam-se padrões distintos na cinética de decomposição em função de cada tipo de resíduo, principalmente na fase inicial de decomposição, na qual o maior conteúdo de N e a menor relação C/N favoreceram a maior taxa de decomposição (Figura 4). Nos dois anos do estudo, os resíduos da ervilhaca apresentaram sempre maior velocidade de decomposição, decompondo de 30 a 40% da MS em 30 dias após o manejo. Já os resíduos de aveia preta apresentaram maior persistência, sendo que após 141 dias ainda havia mais de 50% de resíduos remanescentes, reafirmando que o menor conteúdo de N e a maior relação C/N devem ter dificultado sua degradação. Da mesma forma, quando comparada com os resíduos de aveia preta e ervilhaca, a composição do nabo forrageiro, com valores intermediários de N e relação C/N, proporcionou taxas de decomposição intermediárias, corroborando com resultados obtidos por Aita; Giacomini (2003).

A velocidade de decomposição não foi influenciada significativamente pelo aumento da quantidade de resíduos culturais adicionados ao solo (Figura 4). Este fato pode estar associado à elevada capacidade de decomposição dos microrganismos que podem aumentar sua população em função da oferta de carbono orgânico (ROBERTSON; GROFFMAN, 2007) e da disponibilidade de N (MARY et al., 1996). Bertol et al. (1998) verificaram que, após 180 dias, a aveia-preta apresentou uma diminuição de 80% e o milho de 64% da massa seca remanescente, quando incorporada ao solo. Este resultado indica que, além da importância da quantidade de MS produzida por uma planta utilizada como cobertura do solo, a qualidade dos resíduos também é um fator importante no que se refere ao tempo de decomposição e permanência do resíduo na superfície do solo, sendo que a qualidade está estreitamente ligada à relação C/N encontrada nos resíduos.

Ao contrário à taxa de decomposição, o processo de liberação de N dos resíduos foi diferentemente influenciado pela quantidade de resíduos adicionada aos sacos de decomposição (Figura 5). O maior aporte de resíduos influenciou no processo de mineralização e imobilização de N em função da relação C/N de cada cultura de cobertura. Assim, os resíduos de ervilhaca, com elevado conteúdo de N e baixa relação C/N liberaram até 50% do N acumulado em seus resíduos nos primeiros 30 dias (Figura 5), podendo fornecer ao solo quantidades que variaram de 20 a 100 kg ha⁻¹ de N (Figura 6). Essa característica dos resíduos de ervilhaca poderia suprir até 50% da adubação mineral e promover um incremento de mais de 100% na produção de grãos de milho.

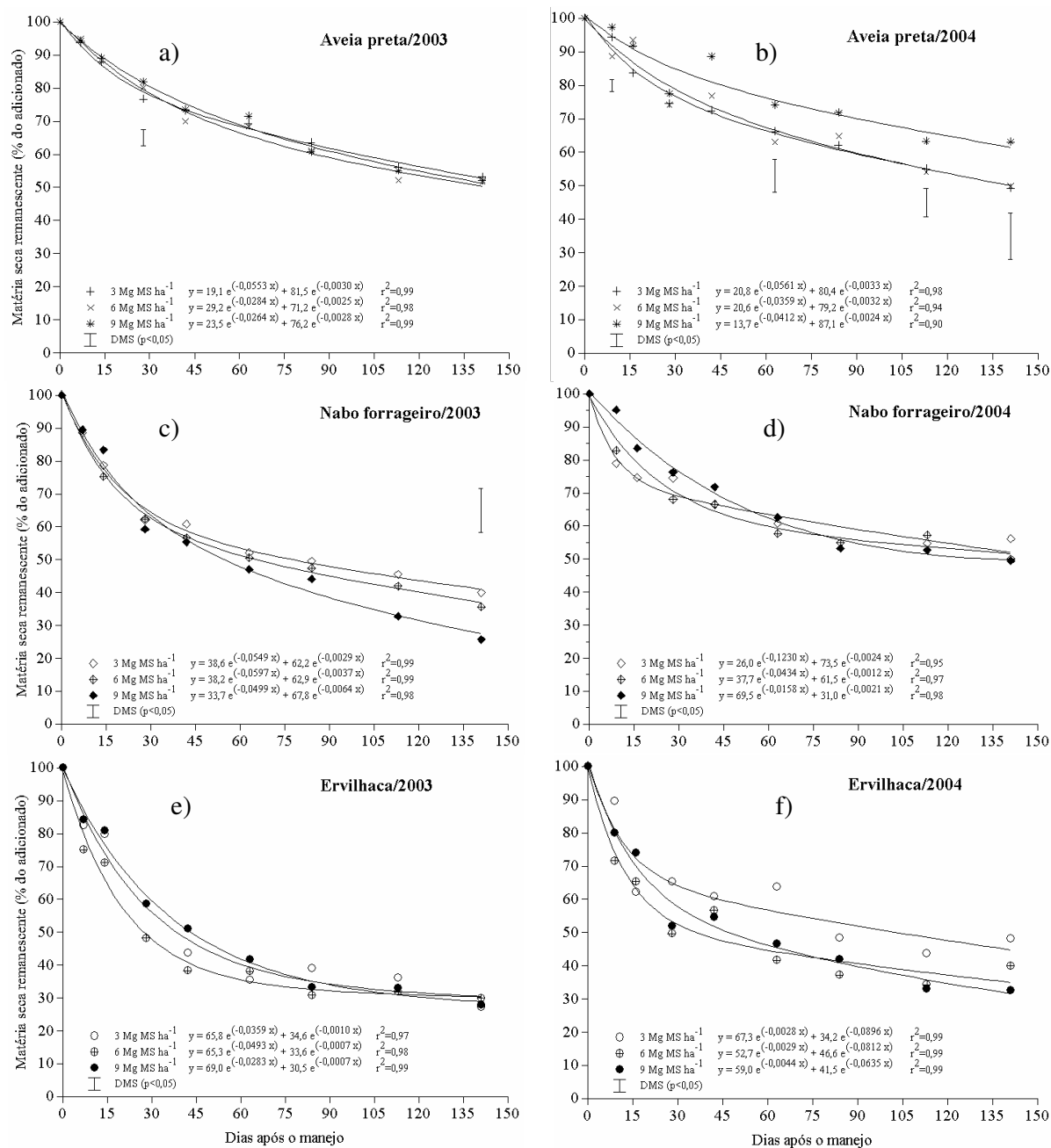


Figura 4 – Curvas de decomposição dos resíduos de aveia preta, nabo forrageiro e ervilhaca em função da quantidade de resíduos aportada ao solo. As barras verticais indicam a Diferença Mínima Significativa (DMS) pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

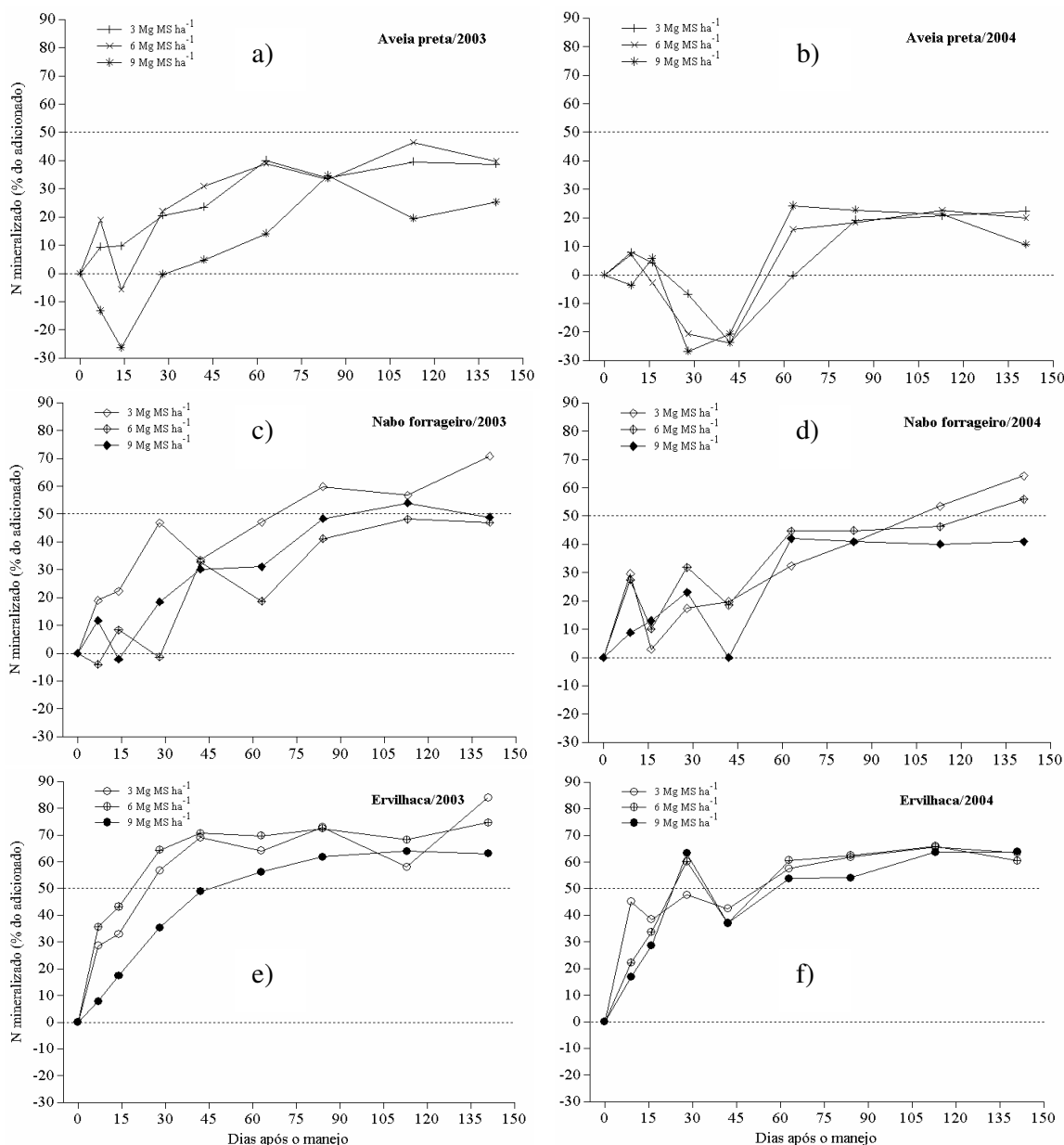


Figura 5 – Percentual mineralizado do N adicionado ao solo com resíduos culturais de aveia preta, nabo forrageiro e ervilhaca em função da quantidade aportada nos sacos de decomposição.

Com os resíduos da aveia preta foi observada forte imobilização inicial, sendo intensificada à medida que houve aumento do aporte de resíduos. Em ambos os anos avaliados, o aporte de 9 Mg ha⁻¹ de MS promoveu imobilização temporária de até 30 kg ha⁻¹ de N, aproximadamente, 15 dias após o manejo. A re-mineralização parcial ao solo da mesma quantidade imobilizada só ocorreu a partir de 60 dias após o manejo (Figura 6ab). Segundo Vargas et al. (2005), o nível mais elevado de carbono disponível para a biomassa microbiana, no SPD, possibilitaria uma maior imobilização do N, bem como o seu acúmulo gradual em

formas orgânicas, aumentando a capacidade de suprimento deste nutriente ao longo do tempo. A dinâmica da liberação de N, observada neste experimento, evidencia o processo de imobilização temporária com liberação tardia e parcial de N afirmado por Sá (1996), estudando a antecipação de adubação nitrogenada no milho em pré-semeadura da aveia. Segundo Basso; Ceretta (2000), a aplicação de N mineral em pré-semeadura do milho, embora represente uma prática agrícola de risco, pode promover acréscimos no N mineral do solo na época em que o milho apresenta maior demanda.

Nos primeiros 30 dias de decomposição, ocorrem intensos processos de mineralização, imobilização e re-mineralização de N, principalmente com os resíduos culturais de nabo forrageiro de relação C/N intermediária, provavelmente decorrente das oscilações da população microbiana durante o processo de decomposição dos resíduos. Holtz (1995) aborda, em seu trabalho sobre a dinâmica de decomposição de resíduos, a variação da relação C/N ao longo do processo de decomposição, com valores oscilando de 20 a 28, indicando que em determinados momentos ocorria a imobilização e em outros a mineralização. No presente trabalho, após, aproximadamente, 60 dias, esses processos se estabilizam, uma vez que, provavelmente, o carbono e o nitrogênio mais lábeis dos resíduos tenha sido liberado (SÁ, 1996) ou, possivelmente, absorvido pelas plantas, lixiviado, volatilizado e/ou desnitrificado do sistema (CERETTA, 1998).

Normalmente, o processo de imobilização predomina sobre o de mineralização durante a decomposição de resíduos deficientes em N, ou seja, aqueles resíduos com relação C/N maior do que a relação C/N crítica (White et al., 1988). Cabe ressaltar que em ambos os anos avaliados a aveia preta e o nabo forrageiro apresentaram relação C/N superior a 25, que causaria imobilização líquida, enquanto que a ervilhaca apresentou teores inferiores a 25, que promoveria mineralização líquida. Assim, os resultados obtidos neste trabalho concordam com a hipótese desta relação de equilíbrio entre os processos de imobilização e mineralização também mencionada por Wieder; Lang (1982), Aita (1997) e Kumar; Goh (2003).

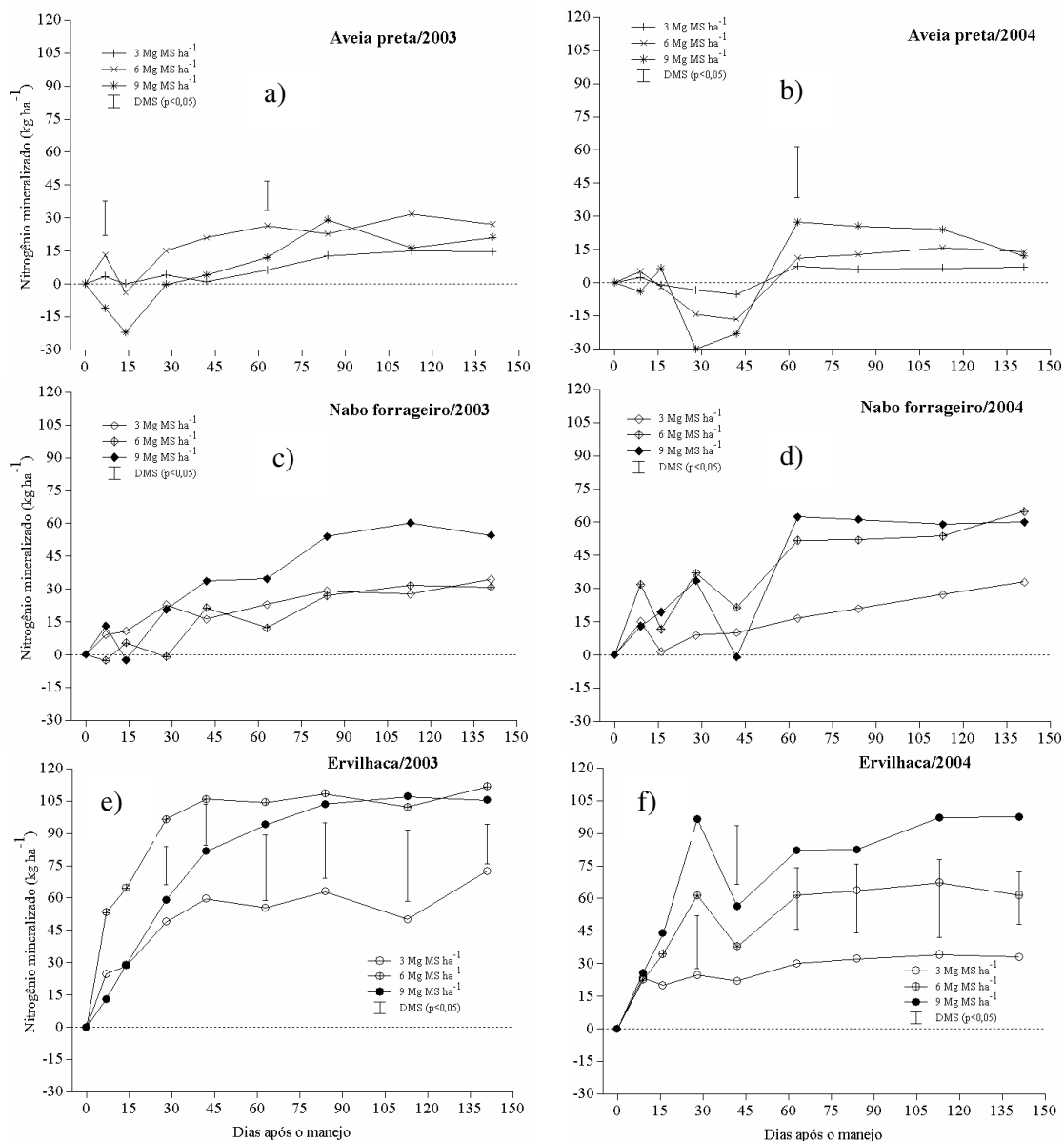


Figura 6 – Quantidade de N mineralizada dos resíduos culturais de aveia preta, nabo forrageiro e ervilhaca em função da quantidade aportada nos sacos de decomposição. As barras verticais indicam a Diferença Mínima Significativa (DMS) pelo teste Tukey ($p < 0,05$). Datas sem DMS não apresentaram diferenças significativas.

5.5.3 Compartimento lábil e tempo de meia-vida

O processo de decomposição dos resíduos culturais também foi avaliado por meio da constante de decomposição (k_a e k_b) e o tempo de meia-vida ($t_{1/2}$) dos resíduos vegetais subdivididos através da aplicação do modelo duplo exponencial em dois compartimentos: lábil e recalcitrante. O compartimento lábil é a parte mais facilmente decomponível de um

resíduo (AITA; GIACOMINI, 2003) e, seguramente, os resíduos com maior partição desde compartimento apresentaram maior velocidade de decomposição. Já o compartimento recalcitrante é formado por compostos orgânicos de mais difícil decomposição, como, por exemplo, lignina e polifenóis (PAUL; CLARK, 1996).

Os níveis de resíduos elaborados não apresentaram efeitos significativos sobre o tamanho dos compartimentos e o tempo de meia-vida. Entretanto, os tipos de resíduos, como a ervilhaca e nabo forrageiro, apresentaram compartimento lábil praticamente duas vezes maior em relação ao compartimento lábil da aveia preta e, mesmo com a constante de decomposição semelhante, a velocidade de decomposição foi diferenciada entre as culturas de cobertura (Tabela 3).

Tabela 3 – Proporção do compartimento de resíduo lábil (A), recalcitrante (B), constantes de decomposição (k_a e k_b), tempo de meia-vida ($t_{1/2}$) de cada compartimento e tempo necessário para decompor 50% ($t_{50\%}$) dos resíduos das culturas de cobertura dentro de cada nível de resíduo avaliada. Médias de 2003 e 2004.

Culturas de cobertura	NR ¹	A	k_a	$t_{1/2}$	B	k_b	$t_{1/2}$	$t_{50\%}$	r^2
		%	$g\ g^{-1}\ dia^{-1}$	dia	%	$g\ g^{-1}\ dia^{-1}$	dia	dia	
Aveia preta	3	20,0	-0,0557	12	81,0	-0,0032	214	147	0,991
	6	24,9	-0,0322	22	75,2	-0,0029	235	141	0,969
	9	18,6	-0,0339	20	81,7	-0,0027	258	203	0,945
	Média	21,2 b²	-0,0406 a	18 a	79,3 a	-0,0030 a	236 a	164 a	
Nabo forrageiro	3	32,4	-0,0889	8	67,9	-0,0027	257	115	0,975
	6	38,0	-0,0515	13	62,3	-0,0025	277	113	0,983
	9	51,6	-0,0329	21	49,9	-0,0042	164	90	0,985
	Média	40,7 a	-0,0578 a	14 a	60,0 b	-0,0031 a	233 a	106 b	
Ervilhaca	3	50,1	-0,0628	11	50,9	-0,0019	356	69	0,975
	6	55,9	-0,0653	11	43,2	-0,0018	378	32	0,983
	9	55,2	-0,0460	15	44,8	-0,0026	269	45	0,979
	Média	53,7 a	-0,0580 a	12 a	46,3 c	-0,0021 a	335 a	49 c	
CV%		15,6	24,8	23,2	9,03	20,8	16,7	25,7	

¹ NR = Nível de resíduos ($kg\ ha^{-1}$ de MS). Os níveis de resíduos não foram estatisticamente diferentes.

² Médias não seguidas pela mesma letra minúsculas na coluna diferem pelo teste de Duncan ($p < 0,05$).

Com constantes de decomposição semelhante, conseqüentemente, o tempo de meia-vida dentro de cada compartimento também foi semelhante. Entretanto, o compartimento lábil levou, em média, 15 dias para reduzir seu tamanho a metade, e o compartimento recalcitrante levou 268 dias. Os resíduos de aveia preta com, aproximadamente, 80% de compartimento recalcitrante necessitaram de 164 dias para decompor 50% de seus resíduos, enquanto que a ervilhaca levou apenas 49 dias. Os resíduos de nabo forrageiro novamente apresentaram comportamento intermediário, sendo necessário 106 dias para decompor 50% dos resíduos. Os tempos de meia-vida não diferiram significativamente entre as três espécies, embora haja uma tendência à maior decomposição dos resíduos culturais da ervilhaca ($t_{1/2}$ 33% inferior ao

da aveia preta). Estes resultados sugerem que a cinética de decomposição está intimamente associada aos tamanhos de cada compartimento e não, necessariamente, às constantes de decomposição que são variáveis com as condições climáticas conforme observado por Gama-Rodrigues et al. (2007) em Campos-RJ e por Torres et al. (2008) em Uberaba-MG.

A relação C/N tem sido apontada por muitos trabalhos com o principal parâmetro no processo de decomposição (BOER et al., 2007) e, associando o tamanho do compartimento com a relação C/N, foi possível observar que o aumento da relação C/N está diretamente associado com o aumento do compartimento recalcitrante e a redução do compartimento lábil (Figura 7). Esse resultado evidencia o potencial dos resíduos de maior relação C/N na proteção do solo, principalmente, contra agentes erosivos, mas também na menor capacidade de fornecer nutrientes para a cultura sucessora, resultado da menor taxa de decomposição e liberação de nutrientes, especialmente N.

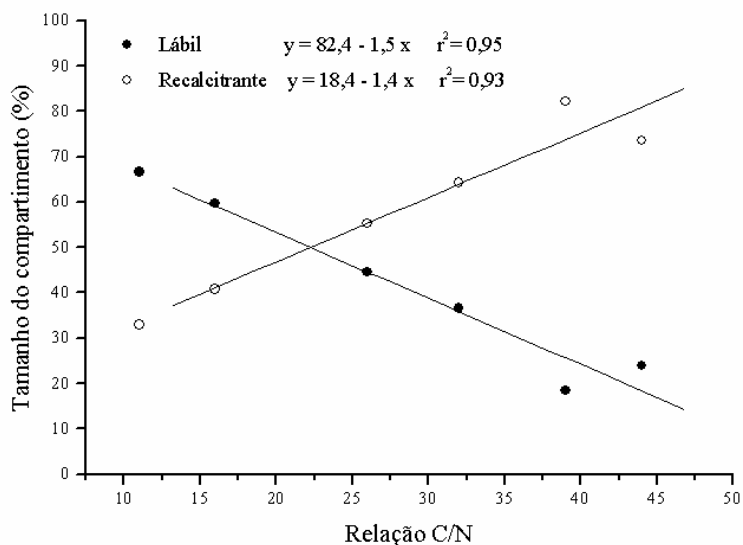


Figura 7 – Relação entre o tamanho dos compartimentos de decomposição lábil e recalcitrante e a relação C/N dos resíduos culturais.

Portanto, os resultados sugerem que a adição diferencial de resíduos não influencia a taxa de decomposição, embora possa estimular o crescimento microbiano, intensificando os processos de mineralização e imobilização de N, influenciando diretamente a disponibilidade de N. Entretanto, uma das principais dificuldades técnicas para o sincronismo entre liberação de N ao solo e demanda pela cultura subsequente é estabelecer um comportamento padrão de decomposição e liberação de N dos resíduos, devido à associação da diversidade de fatores

bióticos, como tipo de resíduo e dinâmica de decomposição microbiana, altamente dependente de fatores abióticos como as condições climáticas.

5.6 Conclusões

1. A taxa de decomposição de resíduos, dentro de cada espécie, não foi significativamente influenciada pela quantidade de resíduos aportados ao solo. Entretanto, os processos de mineralização e imobilização foram intensificados pela relação C/N de cada cultura de cobertura.
2. Os resíduos de ervilhaca apresentaram elevada taxa de decomposição inicial, liberando até 50% da quantidade acumulada de N nos primeiros 30 dias após o manejo, podendo promover elevada disponibilidade de N ao solo.
3. Os resíduos de aveia preta apresentam lenta taxa de decomposição, causam imobilização temporária de N do solo, com liberação tardia e parcial entre 2 a 3 meses após o manejo.
4. As constantes de decomposição dos resíduos entre a aveia preta, nabo forrageiro e ervilhaca foram semelhantes. Porém, os tamanhos dos compartimentos decomponíveis foram diferentes.

6 CAPÍTULO II – DISPONIBILIDADE DE NITROGÊNIO NO SOLO EM FUNÇÃO DA QUANTIDADE DE RESÍDUOS APORTADA AO SOLO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO

6.1 Resumo

O sistema plantio direto preconiza adição de elevadas quantidades de diferentes tipos de resíduos orgânicos ao solo, onde a composição bioquímica de cada resíduo, em especial a relação C/N, assume papel relevante frente à dinâmica do nitrogênio (N) mineral do solo e sua disponibilidade à cultura sucessora. Esse trabalho teve como objetivo avaliar a disponibilidade de N do solo em função da quantidade e da qualidade dos resíduos aportados por diferentes culturas de cobertura de inverno, associada ou não à aplicação de N fertilizante. O trabalho foi realizado na área experimental do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), RS, em um ARGISSOLO VERMELHO Distrófico arênico. Durante as safras 2003/04 e 2004/05 foi avaliada a disponibilidade de N mineral no solo durante o ciclo da cultura do milho, após o manejo cultural dos resíduos de aveia preta, nabo forrageiro e ervilhaca, sem e com aplicação de fertilizante mineral (0 e 120 kg ha⁻¹ de N). Em 2003/04 avaliou-se a distribuição do N mineral no perfil do solo (0 a 40 cm de profundidade) nos tratamentos com aporte médio de 6 Mg ha⁻¹ de matéria seca e em 2004/05 avaliou-se o aporte de diferentes quantidades de resíduos ao solo (0, 3, 6, 9 Mg ha⁻¹ de matéria seca). A quantidade de resíduo não influenciou significativamente a disponibilidade de N do solo, ao contrário da qualidade dos resíduos que, associada ao conteúdo de N, foi determinante na dinâmica de disponibilidade. Os resíduos de aveia preta promoveram imobilização temporária de N nos primeiros meses após o manejo, com liberação tardia e parcial, em relação ao ciclo do milho, enquanto que os resíduos de ervilhaca proporcionaram incremento na disponibilidade de N, principalmente na fase inicial de desenvolvimento do milho, sugerindo ser um fator essencial à obtenção de elevadas produtividades.

Palavras-chave: culturas de cobertura; nitrogênio; N mineral; mineralização de N; plantio direto; milho.

6.2 Abstract

NITROGEN AVAILABILITY IN THE SOIL IN FUNCTION OF THE AMOUNT OF RESIDUES ADDED TO SOIL UNDER NO-TILLAGE SYSTEM

The no-tillage system recommends additional higher amounts of different types of organic residues to the soil where the biochemical composition of each residue, especially the C/N relationship, take on important functions in front of the nitrogen (N) dynamics to the soil and your availability to culture subsequent. That work had as objective to evaluate the N availability of the soil in function of the amount and quality of the residues added to the soil by different cover crops, associated or not to the application N fertilizer. The work was carried out in the experimental area of the Soil Department at Federal University of Santa Maria, RS, on a typic Hapludalf with sandy loam A horizon. During 04/2003 and 04/2003 the N availability was evaluated in the soil during the maize cycle, after the management of black oat, oil radish and hairy vetch residues, without and with application of mineral fertilizer (0 and 120 kg N ha⁻¹). In 04/2003 the distribution of mineral N was evaluated in the profile of the soil (0 to 40 cm of depth) in the treatments with medium addition of 6 Mg dry matter ha⁻¹ and in 05/2004 was evaluated the addition of different amounts of residues to the soil (0, 3, 6, 9 Mg ha⁻¹ de dry matter). The amount of residues did not influence significantly the N availability in the soil, unlike the quality residues that, associated to the N content, was decisive in the availability dynamics. The black oat promoted temporary N immobilization in the first months after the management, with late and partial release in relation to the maize cycle, while that hairy vetch residues provided increase in the N availability, mainly in the initial phase of development of the maize, suggesting to be an essential factor for obtaining higher yields.

Key-words: cover crops; nitrogen; N mineral; N mineralization; N immobilization; no-tillage system; maize.

6.3 Introdução

A produtividade do milho está associada, entre outros fatores, à disponibilidade de N no solo durante o seu ciclo de desenvolvimento. Esta limitação ocorre porque as plantas requerem quantidade relativamente grande de N (de 1,5 a 3,5% do seu peso seco), e porque, na maioria dos solos, a mineralização deste nutriente é insuficiente para sustentar os níveis de produção desejados (BELOW, 2002).

O N é um dos nutrientes absorvidos em maior quantidade pela cultura do milho e também pode ser o mais limitante. A disponibilidade deste nutriente no solo é controlada pelos processos microbianos de mineralização e imobilização, os quais dependem basicamente da relação C/N (SÁ, 1996) e da composição bioquímica dos resíduos culturais em decomposição (HEINZMANN, 1985), principalmente no SPD, em que os mesmos permanecem na superfície. Nestas condições, pode ocorrer deficiência de N para o milho, quando cultivado sobre resíduos de alta relação C/N, devido à imobilização do N pelos microrganismos do solo (VICTORIA et al., 1992; SALET et al., 1994; VARGAS et al., 2005).

De acordo com Victoria et al. (1992), a adição de quantidades elevadas de resíduos culturais com alta relação C/N faz com que os microrganismos heterotróficos, atuantes na decomposição da matéria orgânica, tornem-se gradativamente ativos, multiplicando-se e produzindo CO₂ em grandes quantidades. Nestas condições, o nitrato praticamente desaparece do solo, o mesmo devendo ocorrer com o amônio. Durante certo período, a cultura em desenvolvimento terá pouca ou nenhuma disponibilidade de N mineral para o seu desenvolvimento, causando um “estresse” pela carência de N no sistema. Entretanto, a continuidade do processo de decomposição diminui a relação C/N do solo, uma vez que o C está sendo perdido na forma de CO₂ e o N sendo conservado pela formação da massa celular microbiana. Segundo o mesmo autor, esta situação continua até que os resíduos vegetais atinjam uma relação C/N em torno de 20. Neste ponto, a atividade de microrganismos decompositores, pela falta de carbono facilmente oxidável, diminui gradualmente, e também a formação de CO₂. O N deixa de ser limitante para os processos microbianos, passando então, a ocorrer a liberação de N mineral. A nitrificação volta a ser ativa, produzindo nitrato em nível superior às condições originais.

Sabe-se que os resíduos culturais de leguminosas armazenam grandes quantidades de N em sua fitomassa, atribuída principalmente à fixação biológica do N atmosférico. Entretanto, grande parte deste N é liberada pela decomposição destas culturas, já nas

primeiras semanas após o manejo (HEINZMANN, 1985; Amado et al., 1999), tornando-o passível de perdas, principalmente por lixiviação (AITA; GIACOMINI, 2003). Entretanto, com o advento do uso de ^{15}N , descobriu-se que a maior parte do N é, na verdade, imobilizada pelos microrganismos no solo (OLSON, 1980; POWER; LEGG, 1984) e as perdas por lixiviação seriam significativas somente em solos muito arenosos, com baixos teores de matéria orgânica e com elevadas precipitações pluviométricas (URQUIAGA et al., 1990).

Já os resíduos culturais de gramíneas promovem baixo ou até mesmo negativo efeito na disponibilidade de N à cultura sucessora. Nesse sentido, a maioria dos trabalhos evidencia que a produtividade de milho em sucessão a gramíneas é comprometida, principalmente, em função da imobilização temporária de N pela biomassa microbiana durante o processo de decomposição da palhada (DA ROS; AITA, 1996; AMADO, 1997; BASSO; CERETTA, 2000; VARGAS et al., 2005).

Entre os parâmetros utilizados para se determinar quanto e quando aplicar o N fertilizante, a forma mineral encontrada no solo (N mineral do solo, especialmente o teor de nitrato) durante o desenvolvimento da cultura do milho tem sido apontada como um indicador potencial para a adubação nitrogenada (RAMBO et al., 2007). Segundo KLAPWYK; KETTERINGS (2006), a determinação do teor de nitrato no solo na fase V6 do milho, também chamado de teste de pré-aplicação de N em cobertura (“Pré-Sidedress Nitrato Test”), é atualmente a melhor ferramenta disponível para os produtores da região Nordeste dos EUA para determinar se o milho responderá a aplicação de N em cobertura.

A implementação de modelos de produção, em que a rotação de culturas prima pela presença de leguminosas antecedendo o milho, propicia aporte significativo de N à cultura. Entretanto, a estruturação do modelo deve buscar o sincronismo entre a liberação deste nutriente pela decomposição dos resíduos e os períodos de maior demanda de N pelo milho, que, segundo Magdoff (1991), inicia a partir do estágio de seis folhas. Se o N mineral estiver disponível precocemente, podem ocorrer perdas do nutriente por lixiviação e/ou desnitrificação (AITA; GIACOMINI, 2003). Entretanto, se a liberação do N for excessivamente tardia, poderá haver prejuízos na produtividade da cultura. Tal observação é justificada pelo fato de que componentes importantes da produtividade de milho, como o número de fileiras da espiga e grãos por fileira, são definidos logo nas primeiras semanas do seu desenvolvimento (ARNOL, 1975).

O maior desafio está, portanto, em estabelecer o manejo mais adequado da adubação nitrogenada à cultura de cobertura antecessora, buscando atender a necessidade de N pelo milho de forma equilibrada, em que os processos de mineralização e imobilização sejam

sincronizados com a aplicação de N fertilizante complementar, minimizando perdas e buscando maximizar às produtividades. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar a disponibilidade de N mineral no solo, em função da quantidade de resíduos aportados por diferentes culturas de cobertura de inverno, associadas ou não à aplicação de N fertilizante.

6.4 Material e Métodos

O trabalho foi realizado na área experimental do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), RS, em um ARGISSOLO VERMELHO distrófico arênico (EMBRAPA, 2006), durante as safras 2003/04 e 2004/05. O clima da região é do tipo “Cfa2” (subtropical úmido), de acordo com a classificação de Köppen, com precipitação média anual de 1.686 mm e temperatura média anual de 19,3° C, variando mensalmente entre 9,3 e 31,5° C. As características químicas do solo da camada de 0,10 m no início do experimento eram: MOS = 1,1%; pH = 4,9; P disponível (Mehlich I) = 27 mg dm⁻³; CTC efetiva a pH 7,0 = 4,2 cmol_c dm⁻³; argila = 160 g kg⁻¹ e cátions trocáveis (cmol_c dm⁻³) K = 0,07; Ca = 1,5; Mg = 0,4 e Al = 0,3.

A avaliação da quantidade de N mineral do solo foi realizada em alguns tratamentos do experimento principal conduzido sob delineamento trifatorial com blocos ao acaso e parcelas subdivididas, com três repetições. Isso ocorreu devido ao tamanho do experimento e à impossibilidade de realizar a amostragem e a determinação de N mineral em todas as combinações possíveis do experimento principal (Maiores informações ver Capítulo III). Assim, durante a safra 2003/04, realizaram-se amostragens de solo em todos os tratamentos com culturas de cobertura (Aveia preta - *Avena strigosa* Schreb, ervilhaca - *Vicia villosa* Roth, nabo forrageiro – *Raphanus sativus* L.), em duas doses de N (0 e 120 kg ha⁻¹ de N), nas camadas de 0 a 5; 5 a 10; 10 a 20 e 20 a 40 cm de profundidade, mas apenas no nível de resíduo considerado médio (6 Mg ha⁻¹ de matéria seca). Na safra de 2004/2005, buscando identificar diferenças na disponibilidade de N mineral no solo em função do tipo e da quantidade de resíduos aportado, reduziram-se as profundidades amostradas para compreender os 4 níveis de resíduos do experimento principal (0, 3, 6 e 9 Mg de matéria seca ha⁻¹), amostrando-se apenas as camadas de 0 a 5 e 5 a 20 cm de profundidade. Em ambos os anos estudados, foram realizadas amostragens no tratamento sem adição de resíduos, utilizando-o como referência. Na Tabela 4 é apresentado a quantidade adicionada de MS, N total e relação C/N dos três níveis de resíduos culturais.

O híbrido de milho utilizado foi o AG8021, semeado em outubro (18/10/2003 e 14/10/2004), com espaçamento entre linhas de 0,9 m e população de plantas de 75.000 ha⁻¹, posteriormente, sendo ajustado para 60.000 plantas ha⁻¹ por desbaste manual. A adubação com fósforo e potássio no milho em ambos os anos foi de 200 kg ha⁻¹ da fórmula NPK 00-30-20, baseada em análise de solo e seguindo as recomendações da Comissão de Fertilidade do solo (CFS-RS/SC, 1995). A adubação nitrogenada foi realizada com uréia (45% de N), sendo realizada em três épocas: 30 kg ha⁻¹ de N na semeadura do milho, 50 kg ha⁻¹ de N com 4 folhas e 40 kg ha⁻¹ de N com 10 folhas de milho.

Tabela 4 – Matéria seca das culturas de cobertura, N total adicionado e relação C/N dos três níveis de resíduos culturais adicionados ao solo.

Culturas de cobertura	NR ¹	Matéria seca (Mg ha ⁻¹)		N total adicionado (kg ha ⁻¹)		C/N	
		2003	2004	2003	2004	2003	2004
Aveia preta	3	-	2827 ^{±445}	-	35 ^{±15}		
	6	6237 ^{±953}	5480 ^{±1086}	43 ^{±6}	63 ^{±23}	57:1	40:1
	9	-	8810 ^{±452}	-	93 ^{±7}		
Nabo forrageiro	3	-	2733 ^{±244}	-	58 ^{±14}		
	6	6570 ^{±1345}	5787 ^{±669}	78 ^{±22}	113 ^{±25}	37:1	23:1
	9	-	9003 ^{±613}	-	156 ^{±16}		
Ervilhaca	3	-	2640 ^{±114}	-	90 ^{±14}		
	6	5623 ^{±194}	5103 ^{±655}	141 ^{±13}	156 ^{±35}	18:1	15:1
	9	-	7900 ^{±473}	-	211 ^{±46}		

¹ NR = nível de resíduos (kg de matéria seca ha⁻¹)

² ± = desvio padrão

O solo foi amostrado em diferentes fases de desenvolvimento da cultura do milho, buscando avaliar a disponibilidade de N em períodos críticos. Assim, efetuaram-se amostragem antes do manejo dos resíduos culturais, na semeadura do milho, no momento anterior às adubações nitrogenadas de cobertura, no florescimento e no enchimento de grãos do milho. As datas amostradas em 2003/04, considerando o manejo das culturas de cobertura foram: 5 dias antes e 9, 19, 26, 38, 58, 97 e 117 dias após ao manejo das culturas de cobertura. As datas amostradas durante a safra 2004/05 foram: 6 dias antes e 16, 37, 51, 66, 95 e 126 dias após ao manejo das culturas de cobertura.

As amostragens de solo foram realizadas com trado calador, consistindo de cinco subamostras dentro da área útil de cada unidade experimental, coletadas aproximadamente a 15 cm da linha de semeadura. As amostras foram acondicionadas em caixa de isopor durante a coleta e imediatamente congeladas a -20° C (freezer) até momento da determinação do N mineral em laboratório. As extrações foram realizadas com cloreto de potássio (KCl) na

proporção de 1:10 (solo:solução) e o teor de N mineral ($\text{N-NH}_4^+ + \text{N-NO}_3^-$) no solo foi determinado conforme metodologia descrita por Tedesco et al. (1995). Os resultados foram expressos em relação à massa de solo seco.

No florescimento da cultura do milho foi avaliada a produção de MS (10/01/2004 e 06/01/2005). Em cada amostragem foram coletadas quatro plantas de milho, dentro da área útil de cada parcela dos tratamentos avaliados, sendo posteriormente secos em estufa a 65°C para quantificar a MS total pela população média de plantas por hectare. A quantidade de N absorvido pelo milho foi quantificada a partir do teor de N na fitomassa das amostras de milho coletadas para matéria seca, seguindo a metodologia descrita por Tedesco et al. (1995). A produtividade de grãos de milho foi avaliada através da colheita manual em uma área útil de 10,8 m² (3 metros lineares nas 4 linhas centrais da parcela). As espigas foram debulhadas mecanicamente e os grãos foram pesados e subamostrados para determinação da umidade. Os resultados foram corrigidos para 13% de umidade e expressos em Mg ha⁻¹.

Os dados obtidos foram submetidos à análise da variância. Para os fatores de natureza qualitativa, as médias de tratamentos foram comparadas através do teste de Duncan ou DMS - Diferença Mínima Significativa ($p < 0,05$). As figuras e as análises estatísticas foram obtidas através dos softwares PlotIT 3.2 (SCIENTIFIC PROGRAMMING ENTERPRISES, Haslsett, 1997) e Origin 5.0 (MICROCAL SOFTWARE, INC., 1997).

6.5 Resultados e Discussão

6.5.1 Disponibilidade de N em função da qualidade de resíduos

Os resultados demonstram haver grande variabilidade na dinâmica do N mineral do solo logo após o manejo das diferentes culturas de cobertura, tanto nos tratamentos sem aplicação de N (Figura 8ab) quanto naqueles onde houve aplicação de N fertilizante (Figura 8cd). Provavelmente, estes resultados estejam relacionados às transformações microbianas decorrentes da cinética de decomposição de cada tipo resíduo (ver Capítulo I), aliado à disponibilidade de água e temperatura do solo (SÁ, 1996). Na maioria dos solos, a quantidade e a qualidade dos resíduos aportados são os principais fatores que controlam as taxas e os padrões de mineralização e imobilização (ROBERTSON; GROFFMAN, 2007).

Na Figura 8 é possível identificar diferença no padrão de disponibilidade de N no solo entre os anos avaliados. Em 2003/04, sem aplicação de N fertilizante, os teores variaram de 25 a 95 kg ha⁻¹ de N (Figura 8a) e em 2004/05 os teores encontrados foram de apenas 11 a 48

kg ha⁻¹ de N (Figura 8b). De outubro a março de 2003/04, houve precipitações que totalizaram 511 mm a mais em relação a 2004 (Figura 9), proporcionando oscilações no conteúdo de água do solo, desfavoráveis à decomposição microbiana, com redução dos processos metabólicos dos microorganismos responsáveis pela mineralização (PARTON et al., 2007). Segundo Robertson; Groffman (2007), quando a umidade e a temperatura são favoráveis, o aumento do aporte de resíduos orgânicos aumenta as taxas de atividade e o potencial para elevadas taxas de mineralização e imobilização. Entretanto, Cabrera et al. (2005) colocam que o ciclo de secamento e umedecimento do solo causam maior efeito no processo de decomposição de resíduos em superfície do que quando incorporados e são, provavelmente, responsáveis pela redução da taxa decomposição e mineralização de N. Assim, provavelmente, as condições climáticas foram responsáveis pela menor variação na disponibilidade de N observadas em 2004, embora a tendência tenha se mantido em relação a 2003.

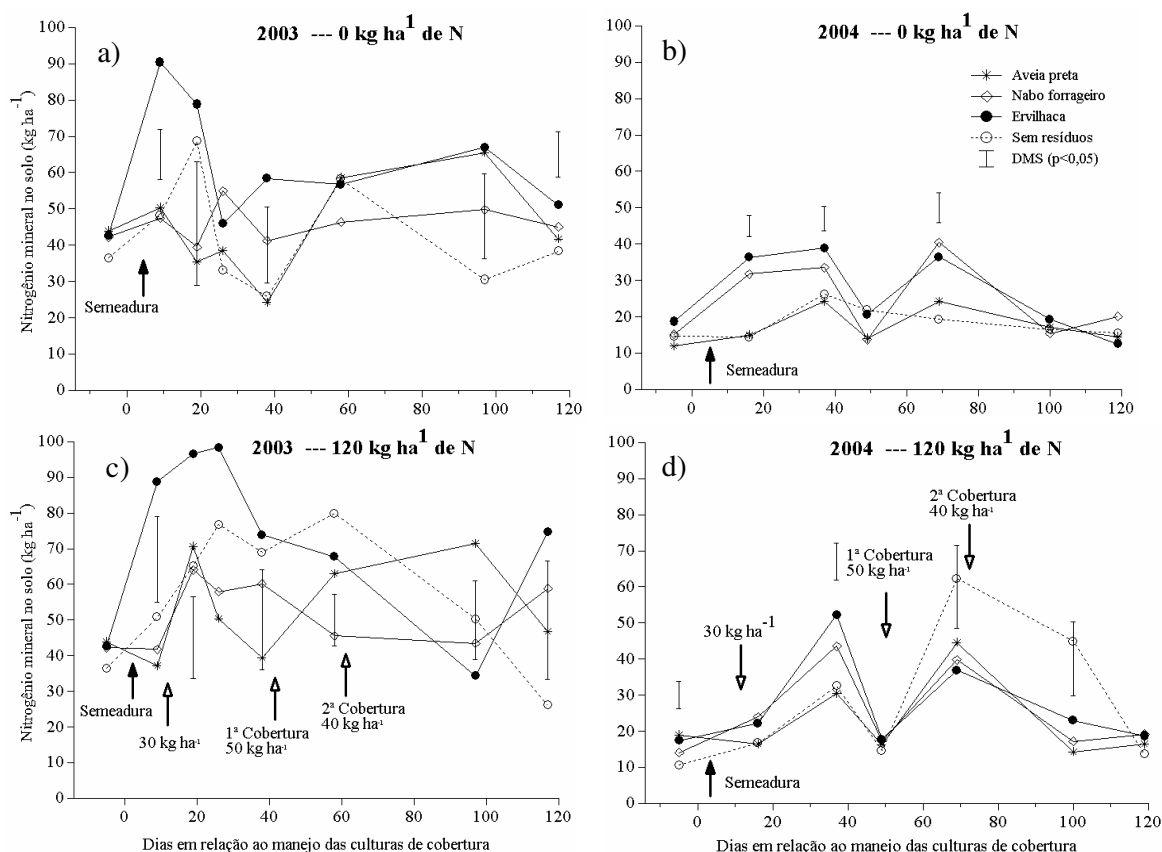


Figura 8 – N mineral (N-NO₃⁻ + N-NH₄⁺) no solo durante o ciclo do milho, na camada de 0 a 20 cm, em função das culturas de cobertura sem aplicação de N (a e b) e com aplicação de 120 kg ha⁻¹ de N (c e d). As barras verticais indicam a Diferença Mínima Significativa (DMS) pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

É possível observar ainda que o comportamento do N mineral no solo ocorreu com oscilação acentuada ao longo do ciclo de desenvolvimento do milho, influenciado

basicamente pelo aporte de resíduos ao solo e pela aplicação de N fertilizante. O padrão de oscilação do N mineral pode ser comparando ao padrão de crescimento microbiano, em que o aumento ou redução da oferta de fonte de carbono passível de decomposição proporciona momentos de mineralização (morte de microorganismos) ou de intensa imobilização (multiplicação de microrganismos).

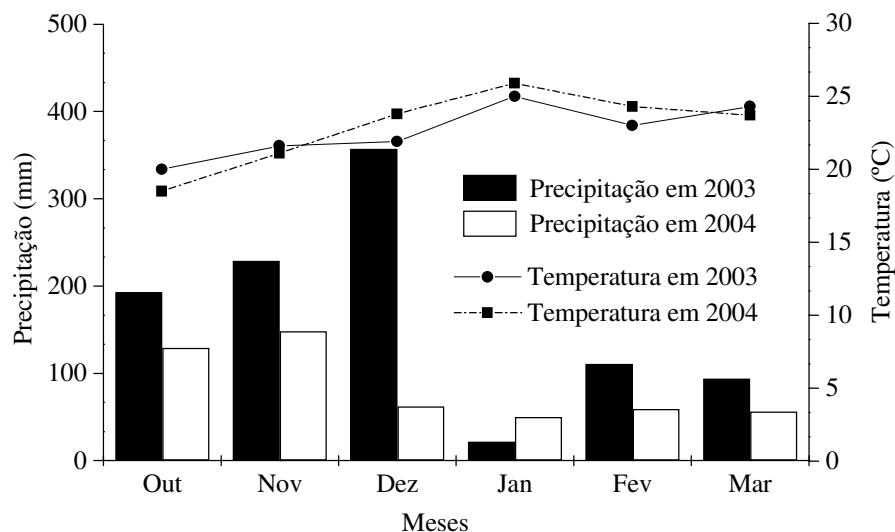


Figura 9 – Precipitação pluviométrica mensal e temperatura média mensal durante os anos de 2003 e 2004. Informações obtidas da Estação Metereológica da UFSM, Santa Maria, RS.

Neste sentido, em 2003/04, o período compreendido entre 30 a 40 dias após o manejo foi o momento de menor disponibilidade de N mineral no solo, provavelmente associado ao pico de maior crescimento da população microbiana e com o esgotamento do compartimento mais decomponível dos resíduos (ver Capítulo I), principalmente com o aporte de resíduos de alta relação C/N, como a aveia preta (Figura 8ac).

Em 2004/05, esse momento foi mais tardio ocorrendo entre 40 e 50 dias, provavelmente em função das condições climáticas menos favoráveis ao processo de decomposição (Figura 8bd). Este resultado evidencia a sazonalidade da disponibilidade de N no solo entre anos e durante o ciclo da cultura do milho, indicando que parâmetros em tempo real, como, por exemplo, a coloração das plantas de milho poderia ser capaz de indicar a quantidade e o momento mais adequado para aplicação de N (ARGENTA; SILVA, 2003). Ressalva-se ainda que a rapidez com que essas oscilações ocorreram pode ser um dos motivos

da dificuldade de se utilizar o N mineral como um parâmetro na recomendação da adubação nitrogenada em regiões tropicais e subtropicais (RAMBO et al., 2004).

Quanto ao aporte de resíduos, em ambas as safras, destacam-se os elevados teores iniciais de N mineral do solo proporcionados pelos resíduos da ervilhaca. Com 10 a 15 dias após o manejo de resíduos, foi possível alcançar até 90 kg ha^{-1} de N na camada de 20 cm em 2003/04 e próximo a 40 kg ha^{-1} de N em 2004/05 sem aplicação de fertilizante. Neste mesmo período, o tratamento com resíduos de aveia preta apresentava apenas 45 kg ha^{-1} de N em 2003/04 e próximo a 15 kg ha^{-1} de N em 2004/05. Esse resultado concorda com Aita; Giacomini (2003), pois evidencia o maior aporte inicial de N pelos resíduos da ervilhaca logo após o manejo e também corrobora com o processo de imobilização de N por resíduos com maior relação C/N citado por Vargas et al. (2005).

Quando adicionado fertilizante mineral (120 kg ha^{-1} de N), observou-se incremento na disponibilidade de N mineral no solo poucos dias após a aplicação, seguido de um decréscimo acentuado, principalmente nos tratamentos com aporte de resíduos (Figura 8cd). As oscilações de disponibilidade são ainda mais acentuadas quando comparadas a não aplicação de N, possivelmente ocasionadas pela absorção de N pelo milho e/ou pelo processo de imobilização microbiana, havendo a possibilidade de perdas de N por lixiviação, nitrificação ou volatilização, mas não quantificadas neste trabalho.

A imobilização e posterior liberação de N por resíduos de maior relação C/N é observada em 2003, em que próximo aos 100 dias após o manejo das culturas de cobertura, o tratamento com aveia preta apresentou aumento no teor de N mineral no solo, quando comparado aos demais tratamentos, principalmente ao tratamento referência (Figura 8c). Este fato evidencia o possível processo de re-mineralização de parte do N imobilizado no período inicial de decomposição citado por SÁ (1996) e estudado posteriormente por BASSO (1999) e SANTI et al. (2003).

6.5.2 Disponibilidade de N no perfil do solo

A disponibilidade de N mineral no perfil do solo durante a safra 2003/04 foi significativamente influenciada pelo aporte de resíduos e pelas aplicações de N até 40 cm de profundidade, principalmente logo após o início do manejo dos resíduos, ocorrendo variações em todo o perfil do solo, de acordo com a característica de cada resíduo e das doses de N aplicadas (Figura 10).

Destacar-se ainda que o tratamento com resíduos de ervilhaca apresentou, na maioria das datas avaliadas, quantidade mais elevada de N que os demais resíduos, alcançando valores próximos de 60 kg ha^{-1} de N na camada de 20 a 40 cm, no tratamento sem aplicação de N (Figura 10), provavelmente devido aos altos teores de N em sua fitomassa, que permite rápida decomposição dos resíduos e liberação do N ao solo. Este resultado está de acordo com Aita (2004), além de corroborar com os resultados de decomposição de resíduos e liberação de N realizado no mesmo experimento (ver Capítulo I).

Quando aplicado N, houve acréscimo na quantidade deste nutriente ao longo do perfil, com destaque para os resíduos da ervilhaca e do tratamento sem resíduos. Na maioria das épocas avaliadas, o tratamento com resíduos de aveia preta apresentou menores quantidades. Entretanto, aos 97 dias este tratamento apresentou teores superiores no perfil em relação aos demais tratamentos, evidenciando novamente o processo de re-mineralização parcial do N temporariamente imobilizado (Figura 10g). Isso sugere que resíduos de alta relação C/N proporcionam imobilização temporária inicial e liberação parcial e tardia, principalmente a partir de 50 a 60 dias após o manejo. Tal tendência foi reportada por Heinzmann (1985), que em um Latossolo Roxo do Norte do Paraná, acompanhando a dinâmica de N após o corte de adubos verdes de inverno (aveia preta, nabo forrageiro, ervilhaca peluda, tremoço e trigo) em nove datas, para avaliar a influência destas sobre as culturas de verão (soja, milho, feijão), encontrou imobilização de N nas primeiras semanas com posterior liberação de N, sendo que Sá (1996) coloca que a liberação da aveia preta coincidiria com o estágio de florescimento e enchimento de grãos do milho.

Este fenômeno aconteceria em função da redução da fonte de carbono de mais fácil decomposição, promotora do crescimento exponencial microbiano na fase inicial de decomposição (VICTORIA et al., 1992). Neste caso, a escassez de fonte energética (carbono) levaria a uma redução da população microbiana com liberação de parte do N imobilizado. Ceretta et al. (2002) também observaram que 85% do N de resíduos de aveia preta foram liberados tardiamente, aos 120 dias após a dessecação. Este fato também é observado, quando se comparado o tratamento sem resíduos em relação aos tratamentos com aporte de resíduos aos 97 dias após o manejo, sem aplicação de N (Figura 10f). Durante a condução do experimento foi possível observar que o milho semeado sobre resíduos de aveia preta teve um desempenho inferior aos demais resíduos, mas com recuperação visual dias antes ao florescimento.

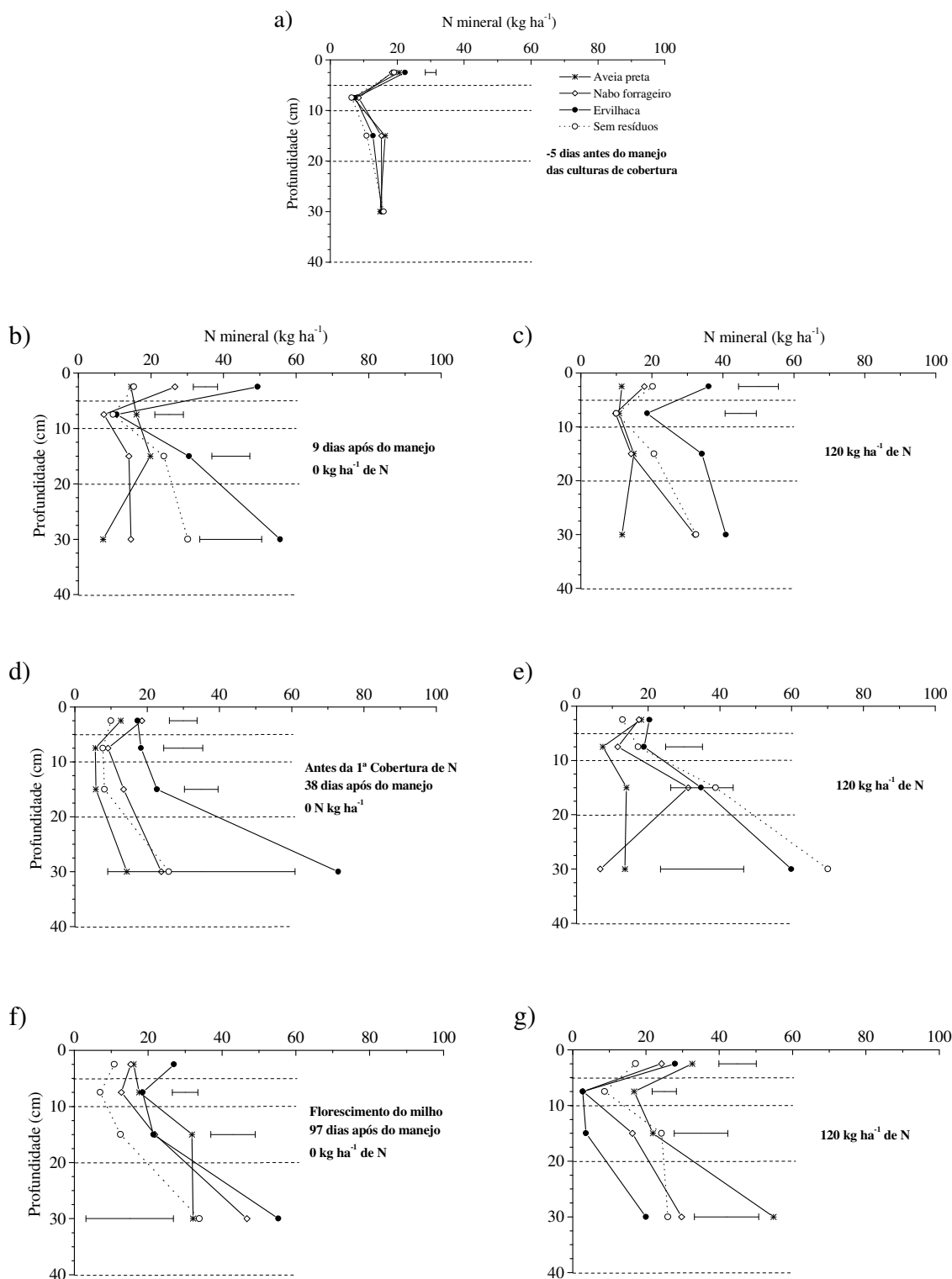


Figura 10 – N mineral ($N-NO_3^- + N-NH_4^+$) no perfil do solo (0 a 40 cm) durante o desenvolvimento da cultura de milho em função do aporte de diferentes resíduos de cultura de cobertura na safra 2003/04. Nas camadas em que as quantidades de N diferiram significativamente entre os tratamentos, as diferenças estão representadas por barras horizontais que indicam a Diferença Mínima Significativa (DMS) pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

6.5.3 Disponibilidade de N em função da quantidade de resíduo

Na safra 2004/05, onde foi avaliada a influência de diferentes níveis de resíduos aportados ao solo sobre disponibilidade de N mineral no solo, em poucos casos houve diferença estatística em função do aumento da quantidade de resíduos aportado ao solo nas datas avaliadas (Tabela 5). Provavelmente, este fato está associado ao reduzido efeito da quantidade de resíduo na disponibilidade de N e também a grande variabilidade dos dados expressos pelo coeficiente de variação médio de 44%, característica normalmente encontrada em trabalhos que avaliam o N mineral do solo. Entretanto, é possível identificar tendências de maior disponibilidade de N, principalmente com adição de resíduos de ervilhaca no momento do plantio de milho, seguido de uma redução aos 37 dias após o manejo das culturas de cobertura (antes da 1ª cobertura de nitrogenada), tanto mais acentuada quanto maior o aporte de elevadas quantidades de resíduos de alta relação C/N. Exemplo disso é o menor conteúdo de N mineral no tratamento com aveia preta, quando aportado 9 Mg ha^{-1} de matéria seca ($9,5 \text{ kg ha}^{-1}$ de N) (Tabela 5).

Observa-se ainda tendência de maior imobilização de N nos primeiros 40 dias após o manejo das culturas de cobertura, mesmo com o fornecimento de fertilizante nitrogenado (120 kg ha^{-1} de N). Este fato pode estar associado às condições favoráveis para o aumento da população microbiana promovido pela interação entre o N oriundo do fertilizante e o carbono orgânico passível de decomposição dos resíduos, acentuando o processo de imobilização temporária do N. Após 40 dias, essa fonte de carbono orgânico deve ter sido esgotada, principalmente no tratamento sem resíduos, podendo ser observado maiores teores de N mineral após 50 dias do manejo, principalmente quando aplicado N em cobertura. Os tratamentos com resíduos, embora também apresentassem mineralização de N, possuíam menor quantidade de N mineral quando comparados com o tratamento sem resíduos, provavelmente associado aos processos de imobilização. Essa tendência também foi observada na menor absorção de N pelo milho (ver Capítulo III). É importante reconhecer que a mineralização e a imobilização acontecem simultaneamente, dentro de um pequeno volume de solo (ROBERTSON; GROFFMAN, 2007), o que dificulta sua avaliação de qual processo é predominante.

Tabela 5 – Quantidade de N mineral (N-NO₃⁻ + N-NH₄⁺) no solo durante o desenvolvimento da cultura do milho na safra 2004/05 em função dos níveis de resíduos das diferentes culturas de cobertura, sem aplicação de N. Camada de 0 a 20 cm.

Cultura de Cobertura	Sem nitrogênio				Com 120 kg ha ⁻¹ de N				
	Nível de resíduos (Mg ha ⁻¹)								
	0	3	6	9	0	3	6	9	
Manejo das culturas de cobertura (kg ha ⁻¹ de N)									
Aveia preta	14,1 ns	12,1	11,4	12,4	10,1 ns	13,4	21,4	21,9	
Nabo forrageiro	14,1 ns	20,7	16,5	8,4	10,1 ns	18,1	11,3	12,5	
Ervilhaca	14,1 ns	17,5	25,1	13,4	10,1 ns	19,1	20,8	12,2	
Média	14,1	16,8	17,7	11,4	10,1	16,9	17,8	15,5	
Média				15,0	Média				15,0
Momento do plantio de milho – 16 DAM ² (kg ha ⁻¹ de N)									
Aveia preta	14,4 ns	19,5	10,1	15,0	16,7 ns	19,0	9,6	20,7	
Nabo forrageiro	14,4 ns	39,3	26,5	29,4	16,7 ns	23,1	12,5	36,5	
Ervilhaca	14,4 b	47,3 a	25,7 ab	36,0 ab	16,7 ns	33,7	21,0	11,8	
Média	14,4	35,4	20,8	26,8	16,7	25,3	14,4	23,0	
Média				24,4	Média				20,0
1ª cobertura nitrogenada (V4) – 37 DAM (kg ha ⁻¹ de N)									
Aveia preta	21,8 ns	17,6	14,9	9,5	14,6 ns	13,9	20,9	14,7	
Nabo forrageiro	21,8 ns	11,8	15,1	14,1	14,6 ns	17,9	16,8	17,2	
Ervilhaca	21,8 ns	20,7	21,2	20,1	14,6 ns	16,5	16,4	21,1	
Média	21,8	16,7	17,1	14,6	14,6	16,1	18,0	17,7	
Média				17,6	Média				16,6
2ª cobertura nitrogenada (V8) – 51 DAM (kg ha ⁻¹ de N)									
Aveia preta	19,3 ns	21,9	28,5	22,1	70,6 ns	25,6	77,1	30,8	
Nabo forrageiro	19,3 ns	50,0	40,6	30,4	70,6 ns	44,9	38,0	36,4	
Ervilhaca	19,3 ns	39,4	39,3	30,5	70,6 a	32,8 b	49,8 ab	28,0 b	
Média	19,3	37,1	36,1	27,7	70,6	30,4	55,0	46,9	
Média				30,1	Média				50,7
Florescimento de milho – 95 DAM (kg ha ⁻¹ de N)									
Aveia preta	16,5 ns	20,8	15,0	15,6	44,9 a	13,2 b	14,4 b	15,1 b	
Nabo forrageiro	16,5 ns	14,3	14,0	17,3	44,9 ns	19,3	11,3	21,1	
Ervilhaca	16,5 ns	15,0	23,9	18,9	44,5 ns	22,2	23,8	22,9	
Média	16,5	16,7	17,6	17,3	44,9	18,2	16,5	19,7	
Média				17,0	Média				24,8

¹ Médias seguidas pela mesma letra na linha não diferem pelo teste de Duncan ($p < 0,05$). ns = não significativo. Média de 3 repetições. ² DAM = Dias após o manejo das culturas de cobertura. ³ Coeficiente médio = 44%.

6.5.4 Produtividade de grãos de milho

Comparando a produção de milho em sucessão aos diferentes tipos de resíduos, sem aplicação de N, observa-se que a aveia preta, o nabo forrageiro e o tratamento sem aporte de resíduos apresentaram, respectivamente, produtividade de 50, 66, 72% daquela obtida sobre os resíduos de ervilhaca (Tabela 6). Com adubação nitrogenada (120 kg ha⁻¹ de N), a diferença entre as sucessões foi reduzida, destacando-se somente a sucessão ervilhaca/milho que, apesar do menor incremento de produtividade com a adubação nitrogenada (18%), alcançou, aproximadamente, 9 Mg ha⁻¹ de grãos.

Tabela 6 – Produtividade de milho obtida em sucessão a 6 Mg ha⁻¹ de matéria seca de diferentes culturas de cobertura de inverno. Médias de 2003 e 2004.

	Adubação nitrogenada (kg ha ⁻¹)	
	0	120
	kg ha ⁻¹	
Aveia preta	3717 B c	7331 A b
Nabo forrageiro	4945 B bc	7410 A b
Ervilhaca	7500 A a	8860 A a
Sem resíduos	5380 B b	8294 A b
Média	5386	7974

Médias não seguidas pela mesma letra maiúscula na linha e minúscula na coluna diferem pelo teste de Duncan (p<0,05).

O incremento médio de produtividade com a adubação nitrogenada foi de 48%, correspondendo a um ganho em grãos de 22 kg ha⁻¹ para cada kilograma aplicado de N. A sucessão aveia/milho foi a que teve maior incremento por kilograma de N aplicado (30 kg ha⁻¹), seguido do tratamento sem aporte de resíduos (24 kg ha⁻¹) e da sucessão nabo/milho (20 kg ha⁻¹). Considerando apenas a sucessão ervilhaca/milho, esse ganho foi de apenas 11 kg ha⁻¹, o que significa que a adubação nitrogenada no milho pode ser mesmo reduzida quando a ervilhaca for a cultura antecessora ao milho, como sugere a CQFS-RS/SC (2004), mas deverá ser reforçada quando for em sucessão a resíduos de alta relação de C/N, como a aveia preta.

A sucessão aveia/milho e nabo/milho, apesar de terem incrementado sua produção, respectivamente, em 97 e 50%, com a adubação nitrogenada, não alcançaram o valor obtido na sucessão ervilhaca/milho sem N (7500 kg ha⁻¹ de grãos). Andrada et al. (2000) encontraram uma diferença na produtividade em torno de 2,2 Mg ha⁻¹ em favor da sucessão ervilhaca/milho, quando comparada com a sucessão aveia/milho e pousio/milho. Na média de dois anos, foi necessário aplicar 150 kg ha⁻¹ de N no milho em sucessão à aveia preta para alcançar a produção de grãos obtida com 60 kg ha⁻¹ de N na sucessão ervilhaca/milho.

Quando o milho foi semeado em solo, sem nenhum tipo de resíduo de cultura de cobertura, obtiveram-se produtividades superiores, quando comparado aos tratamentos com aveia e nabo, sem e com adubação nitrogenada complementar. Estes resultados reforçam a idéia de que resíduos com maior relação de C/N como os de aveia preta (C/N ± 49) e nabo forrageiro (C/N ± 30) podem reduzir a produtividade de milho e refletem os benefícios da utilização de leguminosas como a ervilhaca (C/N ± 17), como cultura antecessora. Resultados de pesquisa de Muzilli (1981a) em um experimento sobre sistema de manejo e rotação de culturas implantado em Carambeí-PR, em 1976, já mostravam claramente a deficiência de N no tecido foliar do milho e do trigo, quando a seqüência de culturas era predominantemente constituída de gramíneas (milho/trigo/milho). Posteriormente, Derpsch et al. (1985),

trabalhando com diversas coberturas verdes de inverno, mostrou que as leguminosas, antecedendo a cultura do milho, proporcionaram maior produtividade de grãos do que as gramíneas.

Apesar do evidente efeito positivo da sucessão ervilhaca/milho, apresentado por vários estudos, tem-se procurado entender melhor os benefícios dos resíduos de ervilhaca na produção de milho, além do fornecimento de N, uma vez que recuperação de N-ervilhaca varia entre 10 a 27% (ver Capítulo IV), sendo que há trabalhos que têm observado respostas à adubação nitrogenada complementar na sucessão ervilhaca/milho (BONGIOVANNI, 2001; SILVA et al., 2006).

Analisando a quantidade de N mineral no solo (Figura 8), verifica-se a variação na disponibilidade de N ao longo do ciclo do milho, basicamente em função da qualidade dos resíduos, da adubação nitrogenada complementar e da provável absorção pelas plantas; ambas variáveis correlacionadas e condicionadas pelos processos microbiológicos e condições climáticas momentâneas. Quando se correlacionou o conteúdo de N mineral do solo em diferentes fases fenológicas da cultura do milho com a produtividade, encontrou-se elevado índice de correlação e significância com o N disponível nos primeiros 20 dias após a emergência das plantas de milho, indiferentemente do ano avaliado ou da dose de N aplicada. Nas demais fases (4 a 6 folhas e 7 a 9 folhas), encontraram-se menores correlações e não significativas (Tabela 7). Apesar da fase inicial do milho (até 3 folhas) não ter grande capacidade para absorver elevadas quantidades de N, decorrente de seu reduzido porte, níveis elevados de N mineral no solo durante esta fase parecem ser preponderantes para a obtenção de elevadas produtividades de grãos (NOVAIS, 1974; COELHO; FRANÇA, 1995; FANCELLI; DOURADO NETO, 1996; YAMADA; ABDALLA, 2000; GARCIA, 2005; SILVA et al., 2006).

Tabela 7 – Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre o conteúdo de N mineral do solo e a produtividade de grãos em três estádios fenológicos do milho.

Estádios	Período	Safrá 2003/04		Safrá 2004/05	
		kg ha ⁻¹ de N aplicado			
		0	120	0	120
Até 3 folhas	1 a 20 dias	0,99 *	0,92 ***	0,98 **	0,90 ***
4 a 6 folhas	21 a 40 dias	0,78 ^{ns}	0,79 ^{ns}	0,50 ^{ns}	-0,42 ^{ns}
7 a 9 folhas	41 a 60 dias	0,13 ^{ns}	0,70 ^{ns}	0,63 ^{ns}	-0,65 ^{ns}

¹ Considerando a média de N mineral em kg ha⁻¹ da camada de 0 a 20 cm nos tratamentos com nível de 6 Mg ha⁻¹ de resíduos de aveia preta, nabo forrageiro, ervilhaca e sem aporte de resíduos. ² Período em dias após a emergência do milho. ³ * $p < 0,01$; ** $p < 0,05$; *** $p < 0,10$, $n = 4$ e ns = não significativo.

Comparando os diferentes níveis de resíduos, na média dos dois anos avaliados, não houve diferença significativa na produtividade de milho com ao aporte crescente de resíduos, principalmente, quando foi aplicado N fertilizante complementar (Tabela 8). Entretanto, sem aplicação de N, observam-se tendências associadas à qualidade e à quantidade de resíduos aportados ao solo. O aporte de 9 Mg ha⁻¹ de MS de aveia proporcionou a redução da produtividade em 708 kg ha⁻¹ (17%), quando comparado com o aporte de 3 Mg ha⁻¹ de MS. Já o maior aporte de resíduos de nabo forrageiro e ervilhaca promoveu pequenos incrementos na produtividade (\pm 22%), mas não houve diferença estatística. Com adubação nitrogenada, praticamente não houve diferença entre os aportes de resíduos. Apesar das tendências de redução ou incremento da produtividade com o aporte crescente de resíduos, os resultados sugerem que a quantidade de resíduo não deva ser um fator complementar no estabelecimento das recomendações de N a serem aplicados na cultura do milho como propõe a CQFS/RS-SC (2004).

Tabela 8 – Produtividade de milho obtida em sucessão a diferentes níveis de resíduos de culturas de cobertura de inverno. Médias de 2003 e 2004.

	Níveis de resíduos (Mg ha ⁻¹)				Média
	0	3	6	9	
	Sem aplicação de N				
	kg ha ⁻¹				
Aveia preta		4091	3678	3383	4133 b
Nabo forrageiro	5380	4399	5075	5362	5054 b
Ervilhaca		6597	7912	7992	6970 a
Média	-	5039	5555	5579	
	Com 120 kg ha ⁻¹ de N				
	kg ha ⁻¹				
Aveia preta		7133	7276	7585	7572 b
Nabo forrageiro	8294	7244	7574	7412	7630 b
Ervilhaca		8530	8663	9386	8718 a
Média	-	7636	7838	8128	

Médias não seguidas pela mesma letra maiúscula na coluna diferem pelo teste de Duncan ($p < 0,05$). Em ambos os anos avaliados, os níveis de resíduos não foram significativamente diferentes ($p < 0,05$).

6.6 Conclusões

1. As quantidades de resíduos aportadas não influenciaram significativamente a disponibilidade de N mineral no solo.
2. As oscilações de disponibilidade de N no solo estão associadas à qualidade do resíduo antecessor e condicionadas às condições climáticas momentâneas.
3. Os resíduos de nabo forrageiro e, principalmente, de aveia preta promoveram imobilização temporária de N nos primeiros meses após o manejo, com liberação tardia e parcial, a partir da fase de florescimento do milho.
4. Os resíduos de ervilhaca proporcionaram elevado incremento na disponibilidade de N, coincidindo com fase inicial de desenvolvimento da cultura do milho, favorecendo a produtividade desta cultura.

7 CAPÍTULO III – ABSORÇÃO DE NITROGÊNIO E PRODUTIVIDADE DE MILHO EM FUNÇÃO DA QUANTIDADE DE RESÍDUOS APORTADOS AO SOLO SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO

7.1 Resumo

O aporte de elevada quantidade de resíduos ao solo, associado ao sistema plantio direto, representa a base do desenvolvimento de uma agricultura que valoriza os processos biológicos, considerando-os como componente essencial para alcançar a sustentabilidade no agroecossistema. Este trabalho teve como objetivo avaliar o efeito combinado de diferentes quantidades de resíduos culturais de inverno e doses de nitrogênio (N) na absorção de N e na produtividade de milho sob sistema plantio direto. O experimento foi desenvolvido na área experimental do Departamento de Solos da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM), RS, em um ARGISSOLO VERMELHO Distrófico arênico, sendo conduzido durante as safras 2003/04 e 2004/05. O delineamento experimental utilizado foi um trifatorial com parcelas subsubdivididas, com três repetições. As parcelas principais com dimensões de 5 m x 48 m foram constituídas por culturas de cobertura: aveia preta, nabo forrageiro e ervilhaca; nas subparcelas com dimensões de 5 m x 16 m foram aportados níveis de resíduos ao solo: 0, 3, 6 e 9 Mg ha⁻¹ de matéria seca e nas subsubparcelas com dimensões de 5 m x 4 m foram estabelecidas doses de N no milho: 0, 60, 120, 180 kg ha⁻¹. Avaliou-se a absorção de N no florescimento através da coleta de 4 plantas e da produtividade de milho em área útil de 10,8 m² por subsubparcela. Não houve interação entre o tipo de resíduo e as doses de N. Porém, houve entre a quantidade de resíduo aportado e as doses de N. Produtividades de milho superiores a 9 Mg ha⁻¹ somente foram possíveis na sucessão ervilhaca/milho que permitiu o acúmulo de 150 kg ha⁻¹ de N até o florescimento, o que não foi possível de ser obtido com as sucessões aveia/milho e nabo/milho, provavelmente em função do processo de imobilização temporária de N. A elevada quantidade de N disponibilizada pela rápida decomposição dos resíduos de ervilhaca, no início do desenvolvimento do milho, foi essencial à absorção de N e aumento da produtividade de milho.

Palavras-chave: milho; nitrogênio; cultura de cobertura; ervilhaca; imobilização; mineralização.

7.2 Abstract

NITROGEN ABSORPTION AND MAIZE PRODUCTIVITY IN FUNCTION OF THE AMOUNT OF RESIDUES ADDED TO SOIL IN NO-TILLAGE SYSTEM

The addition of higher amount of residues to the soil, associated to the no-tillage system, represents the base of the development of an agriculture that favors the biological processes, considering them as essential component to reach an agrosystem maintainable. This work had as objective evaluating the combined effect of different amounts of winter cultural residues and nitrogen (N) levels in the absorption of N and in the maize yield in no-tillage system. The work was carried out in the experimental area of the Soil Department at Federal University of Santa Maria, RS, on a typic Hapludalf with sandy loam A horizon, during 04/2003 and 05/2004. The experimental design was randomized by complete block, with three repetitions. The main plots with dimensions 5 m x 48 m were established by cover crops: black oat, oil radish and hairy vetch; in the subplots with dimensions of 5 m x 16 m were added levels of residues to the soil: 0, 3, 6 and 9 Mg ha⁻¹ of dry matter; and in the subsubplots with dimensions of 5 m x 4 m were applied levels of N in the maize: 0, 60, 120, 180 kg ha⁻¹. The N absorption was evaluated in the flower stage through the sampled of 4 plants and the maize yield in useful area of 10.8 m² for subsubplot. There was not interaction between the amount added of residues and the N levels. However, there were between the residue type and N levels. Maize yields upper to 9 Mg ha⁻¹ only were possible in the hairy vetch/maize succession that allowed the accumulation of 150 kg N ha⁻¹ until flower stage, but was not possible to obtain this with black oat/maize and oil radish/maize successions, probably in function of the process of temporary immobilization of N. The higher amount of N availability by fast decomposition from hairy vetch residues, in the beginning of the maize development, was essential to the N absorption and increase of the maize productivity.

Key-words: corn; nitrogen; cover crop; hairy vetch; N immobilization; N mineralization.

7.3 Introdução

Sob condições naturais, o aporte de N ao solo pode ocorrer através da fixação biológica de leguminosas, pela decomposição de resíduos animais e vegetais ou pelas precipitações anuais. A maior parte do N do solo fica armazenada na matéria orgânica do solo na forma orgânica, que é relativamente estável e não diretamente disponível às plantas (CAMARGO, 1999). Embora uma porção do N da matéria orgânica possa se tornar disponível através do processo de mineralização realizada pelos microrganismos do solo, a quantidade liberada é variável ao longo do tempo e dependente das práticas de manejo e das condições ambientais. Além disso, a liberação é normalmente muito lenta para satisfazer a necessidade da cultura do milho em crescimento, considerando que somente 2 a 3% (10 a 90 kg ha⁻¹) do N total presente no solo são disponibilizados anualmente (BELOW, 2002). Dessa forma, há necessidade de aumentar a disponibilidade de N através da decomposição de resíduos orgânicos ou de fertilizantes nitrogenados complementares, visando aumentar a produtividade de milho.

Tradicionalmente, os resíduos orgânicos, principalmente as leguminosas, eram incorporados ao solo pelo método convencional de cultivo antes da semeadura das culturas comerciais, visando à imediata liberação dos nutrientes acumulados na fitomassa (REEVES, 1994). Entretanto, com a crescente ênfase ao manejo dos resíduos em superfície através do Sistema Plantio Direto (SPD), como meio de reduzir o processo erosivo, os sistemas de manejo foram gradualmente conduzidos a um uso cada vez mais frequente de culturas de cobertura de solo sem incorporação dos resíduos.

A utilização de leguminosas em sucessões e rotações de culturas, objetivando a melhoria da fertilidade do solo e o incremento na produtividade agrícola, é uma prática relativamente antiga (REEVES, 1994). Segundo PÖTTKER; ROMAN (1994), MITCHELL; TELL (1977) estão entre os pioneiros a reportar a superioridade das leguminosas em relação às gramíneas na produtividade do milho em sucessão no SPD. Estes mesmos autores relatam que o milho após centeio necessitou 112 kg ha⁻¹ de N para atingir a mesma produção do milho sucedido pela ervilhaca.

A utilização de gramíneas (aveia preta, trigo ou azevém) para a formação da cobertura de solo no inverno, sendo o principal benefício ao solo, advindo destas culturas o controle da erosão, sempre representou grande parte das áreas cultivadas desde a implantação do SPD no Rio Grande do Sul (PÖTTKER; ROMAN, 1994) e ainda hoje é uma realidade no Estado (INDICAÇÕES..., 2006). Mas, embora na literatura sejam citadas inúmeras vantagens do

cultivo da aveia preta como cultura de cobertura (DEBARBA; AMADO, 1997; BAYER; MIELNICZUK, 1997; MIELNICZUK, 1998; SPAGNOLLO, 2000; AMADO et al., 2000), a contribuição das gramíneas, em relação ao aporte de N é, quantitativamente menor que a das espécies leguminosas. Porém, alguns autores observam que, quando o requerimento de N é atendido, a aveia preta possui elevada capacidade de extração e acumulação de N na planta, superando valores de 90 kg ha^{-1} . Assim, ainda que limitada, poderia ser uma fonte de N para as culturas cultivadas em sucessão, porque, segundo Heinzmann (1985) e Sá (1996), a maior liberação deste nutriente pode coincidir com os períodos de grande demanda quantitativa de N pelo milho. Entretanto, Amado et al. (2003), avaliando a decomposição de resíduos em solos com baixa capacidade de fornecimento de N, relataram que a aveia preta, com alta relação C/N, liberou apenas 20% do N total presente na fitomassa nas primeiras quatro semanas após o manejo, período de menor demanda pela cultura do milho, mas importante para a definição da produtividade (NOVAIS, 1974; COELHO; FRANÇA, 1995; FANCELLI; DOURADO NETO, 1996; YAMADA; ABDALLA, 2000; GARCIA, 2005; SILVA et al., 2006).

Esse assincronismo entre a liberação de N da aveia e a demanda inicial do milho indica que estes resíduos têm pequena possibilidade de atender a demanda inicial da cultura do milho. Dessa forma, invariavelmente, evidencia-se que a utilização de gramíneas antecedendo o milho requer a utilização de uma fonte externa de N (adubação orgânica ou química), para que esta cultura alcance uma produção satisfatória, mas ainda aquém dos resultados encontrados sobre resíduos de leguminosas (SILVA et al., 2006).

Na região Sul do Brasil há vários trabalhos relacionando o uso de culturas de cobertura com a produtividade do milho no SPD (PÖTTKER; ROMAN, 1994; TEIXEIRA et al., 1994; AITA et al., 1994; DA ROS; AITA, 1996; SÁ, 1996; AMADO, 1997; HEINRICHS et al., 2001; AMADO, 2002; CERETTA et al., 2002). Amado et al. (1999), ao trabalhar com sistemas de cultura sobre resíduos de ervilhaca, reportaram um incremento de 82% na produtividade de milho em relação ao sistema aveia/milho, enquanto que Andrada et al. (2000) encontraram uma diferença de produtividade em torno de $2,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ em favor da sucessão ervilhaca/milho, quando comparada com a sucessão aveia/milho e pousio/milho. Na média de dois anos, foi necessário aplicar 150 kg ha^{-1} de N no milho em sucessão à aveia preta para alcançar a produção de grãos obtida com 60 kg ha^{-1} de N na sucessão ervilhaca/milho.

Estes trabalhos evidenciam os efeitos positivos da ervilhaca sobre a produção de grãos de milho e demonstram que é possível recomendar a utilização desta leguminosa como fonte de N ao milho. No entanto, a produção de fitomassa desta leguminosa é variável e

influenciada pelas condições climáticas, edáficas e fitossanitárias (CALEGARI et al., 1993). Por isso, segundo Holderbaum et al. (1990), seria importante considerar a quantidade de matéria seca produzida, a qual está ligada diretamente ao aporte de N ao solo, para uma recomendação mais precisa.

A estratégia de utilização de elevados aportes de resíduos ao solo, associados ao SPD, representa a base do desenvolvimento de uma agricultura que valoriza os processos biológicos, considerando-os como componentes essenciais para alcançar a sustentabilidade no agroecossistema. Porém, constata-se a necessidade de investigações da influência da quantidade e qualidade dos resíduos, quando combinados com aplicação de N fertilizante sobre a eficiência da adubação nitrogenada e na produtividade de milho. Neste contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar o uso de diferentes quantidades de resíduos culturais de inverno aportados ao solo, combinados com doses de N na absorção de N e na produtividade de milho sob SPD.

7.4 Material e Métodos

7.4.1 Localização e caracterização da área experimental

O experimento foi implantado na área experimental do Departamento de Solos da UFSM, Santa Maria, RS, em um ARGISSOLO VERMELHO Distrófico arênico (EMBRAPA, 2006), sendo conduzido durante as safras 2003/04 e 2004/05. O clima da região é do tipo “Cfa2” (subtropical úmido) de acordo com a classificação climática de Köppen, com precipitação média anual de 1.686 mm e temperatura média anual de 19,3° C, variando mensalmente entre 9,3 e 31,5° C.

7.4.2 Delineamento experimental e tratamentos

O delineamento experimental foi um trifatorial (3x4x4) com parcelas subdivididas, com três repetições. O experimento constou de um total de 120 subparcelas experimentais medindo 20 m² (4 x 5 m). As parcelas principais mediram 240 m² (5 x 48 m), enquanto que as subparcelas foram de 80 m² (5 x 16 m). Foram avaliadas as interações dos seguintes fatores: Fator A: culturas de cobertura (*Aveia preta* – *Avena strigosa* Schreb, *Ervilhaca Peluda* – *Vicia villosa* Roth, *Nabo forrageiro* – *Raphanus sativus* L.); Fator B: níveis de resíduos culturais (0,

3, 6 e 9 Mg ha⁻¹ de MS); Fator C: doses de N no milho na forma de uréia (0, 60, 120, 180 kg ha⁻¹).

7.4.3 Detalhes experimentais

As culturas de cobertura foram semeadas a lanço no mês de maio (17/05/2003 e 22/05/2004) com densidade de semeadura correspondendo a 80, 80 e 25 kg ha⁻¹, para aveia preta, ervilhaca e nabo forrageiro, respectivamente. As características químicas do solo na camada de 0 a 10 cm no início do experimento eram: MOS = 1,1%; pH = 4,9; P disponível (Mehlich I) = 27 mg dm⁻³; CTC = 4,2 cmol_c dm⁻³; argila = 160 g kg⁻¹ e cátions trocáveis (cmol_c dm⁻³) K = 0,07; Ca = 1,5; Mg = 0,4 e Al = 0,3. Em junho de 2003, foi aplicada 1 Mg ha⁻¹ de calcário (Calcário Dolomítico/PRNT 75%). As culturas de cobertura e o tratamento sem cultura de cobertura receberam 40 kg de P₂O₅ e 50 kg de K₂O ha⁻¹, como adubação de inverno em ambos os anos do trabalho. O tratamento referência sem cultura de cobertura foi dessecado sucessivamente durante o inverno, sendo mantido livre de plantas.

Os níveis de resíduos foram estabelecidos a partir dos resíduos produzidos pela parte aérea das culturas de cobertura na própria parcela e em área adjacente, sendo manualmente ajustados. As culturas de cobertura foram manejadas com corte laminar próximo à superfície do solo dentro da parcela principal (5 x 48 m). O equipamento utilizado para corte foi uma roçadeira costal à gasolina. Após esse procedimento, dentro de cada bloco e espécie de cultura de cobertura, 50% da produção de resíduos frescos do nível baixo (3 Mg ha⁻¹ de MS) foram transferidos para o nível mais alto (9 Mg ha⁻¹ de MS). O restante dos resíduos (50%) foi distribuído dentro da subparcela (5 x 16 m). Efetuado esse procedimento de ajuste inicial, teve início um processo de conferência dos níveis com amostragens sucessivas com quadro de 0,5 x 0,5 m e pesagens com balança de campo, buscando ajustar as quantidades de resíduos frescos de forma a criar condições com aporte de 3, 6 e 9 Mg ha⁻¹ de MS. Para isso, utilizaram-se coeficientes de relação entre matéria verde e matéria seca, obtidos uma semana antes do início do manejo das culturas de cobertura. As bordaduras do experimento foram semeadas com os mesmos procedimentos com a finalidade de contribuir na adequação dos níveis de resíduos aportados ao solo. O aporte do sistema radicular das culturas de cobertura não foi considerado neste trabalho. Depois de finalizados estes ajustes, as parcelas foram efetivamente amostradas para quantificação final da quantidade de resíduos aportados ao solo e para determinação do teor de N médio acumulado em cada nível de resíduo. Foram realizadas 5 repetições em cada nível de resíduo. O material amostrado foi seco em estufa a

65°C até peso constante. Posteriormente, as amostras foram moídas em um triturador de forrageiras, subamostradas e moídas novamente em moinho tipo Willey, equipado com peneira de 40 mesh. O N no tecido foi extraído e determinado segundo o método descrito em Tedesco et al. (1995) para resíduos vegetais. Dentro das condições experimentais, foi possível obter aportes de N de acordo com o tipo e quantidade de resíduos variando de 20 a 260 kg ha⁻¹ de N (Figura 11).

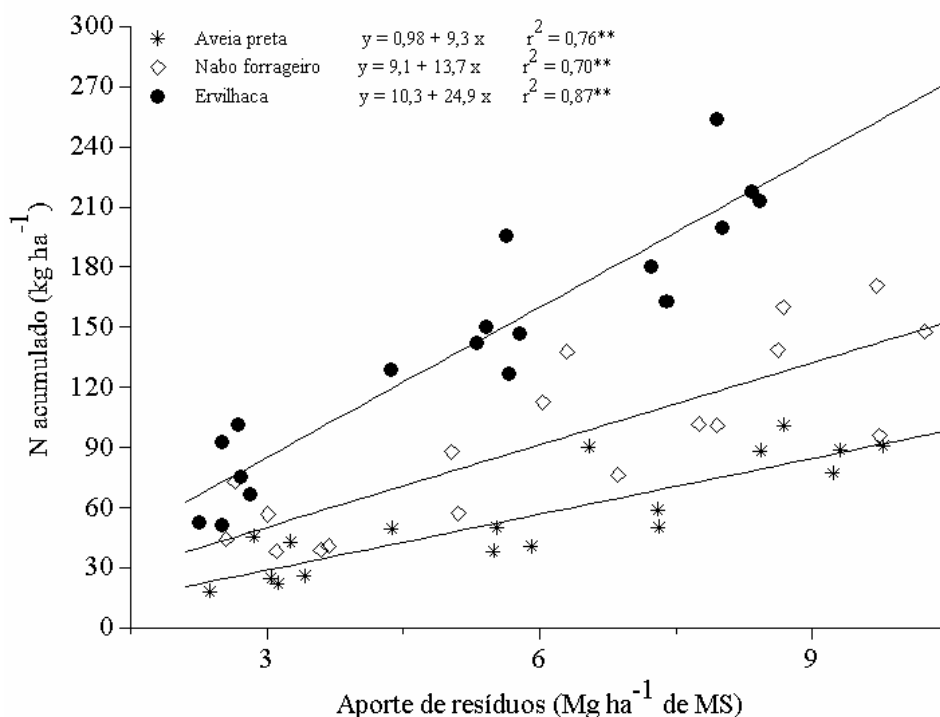


Figura 11 – Acúmulo de N das diferentes culturas de cobertura em função das quantidades de resíduos manualmente aportados ao solo. Média de 2003 e 2004.

O híbrido de milho utilizado em ambos os anos do trabalho foi o AG8021, semeado em outubro (18/10/2003 e 14/10/2004), com espaçamento entre linhas de 0,9 m e 75.000 plantas ha⁻¹, posteriormente, sendo ajustado para 60.000 plantas ha⁻¹ por desbaste manual. A adubação com fósforo e potássio no milho em ambos os anos foi de 200 kg ha⁻¹ da fórmula 00-30-20, seguindo as recomendações da Comissão de Fertilidade do Solo (CFS-RS/SC, 1995).

A aplicação do N foi de acordo com a fase de desenvolvimento do milho, obedecendo às doses pré-definidas (Tabela 9). Durante o experimento, quando necessário, foi realizado o controle de ervas daninhas, pragas e doenças das culturas. Também foi realizada a irrigação

suplementar por aspersão do experimento durante os períodos sem precipitação pluviométrica, buscando manter o solo sob condições adequadas de umidade.

Tabela 9 – Estádios de desenvolvimento da cultura do milho e quantidades de N aplicadas.

Tratamentos	Estádio de desenvolvimento do milho		
	Semeadura – 0 dia	4 a 6 folhas – 30 dias	10 a 12 folhas – 45 dias
	Doses de nitrogênio ⁽¹⁾		
	----- 0 kg ha ⁻¹ -----		
Aveia preta	0	0	0
Nabo forrageiro	0	0	0
Ervilhaca	0	0	0
Sem resíduos	0	0	0
	----- 60 kg ha ⁻¹ -----		
Aveia preta	20	20	20
Nabo forrageiro	20	20	20
Ervilhaca	20	20	20
Sem resíduos	20	20	20
	----- 120 kg ha ⁻¹ -----		
Aveia preta	30	50	40
Nabo forrageiro	30	50	40
Ervilhaca	30	50	40
Sem resíduos	30	50	40
	----- 180 kg ha ⁻¹ -----		
Aveia preta	50	80	50
Nabo forrageiro	50	80	50
Ervilhaca	50	80	50
Sem resíduos	50	80	50

⁽¹⁾ Fonte de N foi uréia (45-00-00).

7.4.4 Avaliações realizadas

No florescimento do milho, foi avaliada a produção de matéria seca (10/01/2004 e 06/01/2005). Em cada amostragem, foram coletadas 4 plantas de milho, dentro da área útil de cada tratamento, sendo posteriormente secas em estufa a 65°C para estimar a matéria seca total pela população média de plantas por hectare. A quantidade de N absorvido pelo milho foi quantificada a partir do teor de N acumulado na fitomassa das amostras de milho coletadas para matéria seca. O método de análise de tecido utilizado foi o descrito por Tedesco et al. (1995). A produtividade de grãos de milho foi avaliada através da colheita manual em uma área útil de 10,8 m² (3 metros lineares nas 4 linhas centrais). As espigas foram debulhadas mecanicamente e os grãos foram pesados e subamostrados para determinação da umidade. Os resultados foram corrigidos para 13% de umidade e expressos em Mg ha⁻¹.

7.4.5 Análise estatística

Os dados obtidos foram submetidos à análise da variância. Para os fatores de natureza quantitativa, realizou-se análise de regressão e, para fatores de natureza qualitativa, as médias de tratamentos foram comparadas através de teste de Tukey ($p < 0,05$). Os gráficos e as análises estatísticas foram realizados com ajuda dos softwares PlotIT 3.2 (SCIENTIFIC PROGRAMMING ENTERPRISES, Haslsett, 1997) e Origin 5.0 (MICROCAL SOFTWARE, INC., 1997).

7.5 Resultados e Discussão

7.5.1 Produção de matéria seca, N acumulado e relação C/N dos resíduos

A produção de MS das culturas de cobertura foi semelhante entre os dois anos avaliados (2003 e 2004), variando de 5 a 6 Mg ha⁻¹ de MS, com exceção do nabo forrageiro que em 2003 produziu mais de 9 Mg ha⁻¹ de MS (Tabela 10). A produção de MS da aveia preta está dentro da faixa de produção normalmente encontrada no Sul do Brasil (BOLLIGER et al., 2006), enquanto que a produção da ervilhaca foi 2 a 3 Mg ha⁻¹ superior a produções reportadas por Santi et al. (2003) em anos anteriores na mesma área experimental. Esta maior produção de MS da ervilhaca pode estar associada à espécie *Vicia villosa*, considerada mais rústica em relação a *Vicia sativa* (CALEGARI et al., 1993) utilizada nos trabalhos anteriores e também devido à adubação mineral e tratamentos fitossanitários realizados. Já a menor produtividade do nabo forrageiro no segundo ano (40% menor) pode ser considerada normal, uma vez que a repetição sucessiva desta cultura no mesmo local tem como consequência a redução gradativa da produtividade de acordo com Fiorin (2007).

Tabela 10 – Produção de matéria seca, teor de nitrogênio, N acumulado e relação C/N dos resíduos das culturas cobertura em 2003 e 2004.

Espécies	Matéria seca Mg ha ⁻¹	Teor de N %	N acumulado kg ha ⁻¹	Relação C/N -
--- Ano agrícola de 2003 ---				
Aveia preta	6,24 b	0,77 c	48,0 b	57:1
Nabo Forrageiro	9,31 a	1,18 b	109,9 a	37:1
Ervilhaca	5,62 b	2,42 a	136,1 a	18:1
CV%	27,1	10,7	29,4	-
--- Ano agrícola de 2004 ---				
Aveia preta	5,22 a	1,14 c	59,5 c	40:1
Nabo Forrageiro	5,54 a	1,93 b	106,7 b	23:1
Ervilhaca	5,13 a	3,03 a	152,2 a	15:1
CV%	15,6	17,5	14,5	-

Médias não seguidas pela mesma letra minúscula na coluna diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), dentro de cada ano agrícola.

Apesar de produções semelhantes de MS, a quantidade total de N acumulada e a concentração de N na fitomassa pelas culturas de cobertura foram variáveis de acordo com a espécie. A concentração média de N encontrada nos resíduos de aveia preta foi 0,96%, seguido do nabo forrageiro com 1,56% e ervilhaca com 2,73%. Conseqüentemente, na média dos dois anos, a ervilhaca apresentou o maior potencial de aporte de N (144 kg ha^{-1} de N), seguido do nabo forrageiro (108 kg ha^{-1} de N) e aveia preta (54 kg ha^{-1} de N). Calegari et al. (1993) também afirma o maior potencial de aporte de N por resíduos de leguminosas, como a ervilhaca, em relação a outras culturas de cobertura, podendo destacar ainda que até 70% deste N pode ser oriundo da fixação biológica (ver Capítulo IV). Já o maior aporte de N dos resíduos de nabo forrageiro em relação aos resíduos de aveia preta está associado à maior eficiência de ciclagem e à capacidade de acúmulo de nutrientes, conforme relatado por Rossato (2004).

No segundo ano (2004) houve redução média na produção de matéria seca de 21%, provavelmente associado a condições climáticas e efeito negativo da repetição da mesma cultura nas parcelas. Entretanto, observa-se aumento médio de 46% na concentração do N e, conseqüentemente, registra-se um aumento médio de 11% no acúmulo de N. Com isso houve uma redução na relação de C/N dos resíduos em, aproximadamente, 28% no segundo ano, formando uma cobertura mais facilmente decomponível.

A relação C/N média encontrada foi de 49:1, 30:1 e 17:1, respectivamente para a aveia preta, nabo forrageiro e ervilhaca. Esses valores médios concordam com outros trabalhos sobre essas culturas de cobertura (FIORIN, 2007; BOLLIGER et al., 2006) e tem papel fundamental no padrão de decomposição de cada tipo de resíduo (ver Capítulo I), bem como na disponibilidade de N ao solo (ver Capítulo II), e conseqüentemente, para a cultura subsequente.

7.5.2 Interações entre resíduos e as doses de N

Os resultados da análise estatística trifatorial indicaram não haver interação significativa entre os três fatores estudados: cultura de cobertura, níveis de resíduos e doses de N. A interação bifatorial entre os níveis de resíduos e as doses de N (interação N x D) apresentou significância em praticamente todos os parâmetros avaliados, com exceção da produtividade de grãos em 2004 (Tabela 11). Este resultado reforça a importância da interação entre os resíduos e a fertilização nitrogenada na dinâmica do N e,

consequentemente, na disponibilidade ao milho. Entretanto, salienta-se que a significância desta interação está mais associada à presença de resíduos no solo do que aos níveis de resíduos avaliados (ver Apêndice 13). Salienta-se ainda que os níveis de resíduos como fator isolado somente foi significativo na produção de grãos da safra 2003/04.

Tabela 11 – Efeito das culturas de cobertura, níveis de resíduos e as doses de N na produção de matéria seca, N acumulado no florescimento e produtividade de milho nas safras de 2003/04 e 2004/05.

Tratamentos	Matéria seca no florescimento		N acumulado no pendoamento		Produtividade de grãos	
	kg ha ⁻¹					
Safras	2003/04	2004/05	2003/04	2004/05	2003/04	2004/05
Cultura de cobertura						
Aveia preta	6758 c ⁽¹⁾	8147 b	66,8 c	73,8 b	6168 b	6118 b
Nabo forrageiro	10020 b	10401 a	89,6 b	92,0 ab	6737 b	6494 b
Ervilhaca	11267 a	9396 ab	137,2 a	105,2 a	9247 a	7827 a
F	506 *	7,7 *	65,9 *	80 *	73,2 *	34,5 *
DMS	1118	1388	15,3	19,1	654	522
CV(%)	21,0	26,2	27,4	37,0	15,6	13,5
Níveis de resíduos (MS ha⁻¹)						
Sem resíduos	9321	9064	92,3	76,2	8186 a	6580
3000 kg	9854	9199	100,3	90,3	7079 b	6795
6000 kg	9084	9843	101,6	92,8	7186 ab	6898
9000 kg	9107	8902	104,4	87,9	7887 ab	6961
F	0,6 ^{ns}	0,97 ^{ns}	0,81 ^{ns}	1,7 ^{ns}	3,7 ^{**}	0,83 ^{ns}
DMS	1715	1562	21,4	20,7	1038	683
CV(%)	29,5	27,1	34,4	38,3	22,0	16,1
Doses de N (kg ha⁻¹)						
0	6632 c	8137 b	54,1 c	51,9 c	5151 c	5622 b
60	8934 b	9486 ab	88,3 b	88,8 b	7243 b	6911 a
120	10608 a	9924 a	118,4 a	101,4 ab	8541 a	7278 a
180	11208 a	9611 ab	134,1 a	113,6 a	8923 a	7433 a
F	32,5 *	3,4 ^{**}	45,6 *	37,4 *	88,6 *	18,9 *
DMS	1347	1608	18,6	16,3	678	710
CV(%)	21,05	25,3	29,0	26,8	13,27	15,2
Interação (valores de F)						
C x N	1,8 ^{ns}	0,7 ^{ns}	3,6 ^{**}	2,79 ^{**}	1,8 ^{ns}	2,6 ^{ns}
C x D	0,5 ^{ns}	1,0 ^{ns}	1,2 ^{ns}	0,8 ^{ns}	7,1 *	0,9 ^{ns}
N x D	2,6 *	2,2 ^{**}	5,9 *	2,9 *	6,2 *	0,6 ^{ns}
C x N x D	0,6 ^{ns}	1,3 ^{ns}	1,1 ^{ns}	0,9 ^{ns}	1,5 ^{ns}	0,5 ^{ns}
CV (%)	20,9	22,5	24,7	27,0	9,7	16,7

⁽¹⁾ Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). ns = não significativo; * e ** = significativo a 1% e 5%, respectivamente. MS = matéria seca.

Entre os fatores estudados isoladamente, os de maiores destaque foi o tipo de resíduo e as doses de N, estatisticamente significativos para os três parâmetros de produção avaliados (matéria seca, N acumulado no florescimento e produtividade de grãos). Esse resultado confirma a importância do N para a cultura do milho, uma vez que, independente do manejo adotado, a aplicação de N fertilizante, seja oriundo da ervilhaca ou da adubação nitrogenada, sempre teve efeitos significativos nos fatores de produção avaliados.

Considerando a produtividade de grãos como principal fator avaliado, salienta-se que as condições climáticas adversas da safra de 2004/05 (precipitações \pm 50% inferior à safra anterior) tiveram influência direta no baixo índice de significância encontrado nesta safra, se comparado com a safra 2003/04. Neste sentido, destacam-se os fatores isolados C e D (culturas de cobertura e doses de N) que, mesmo em condições adversas, apresentaram significância, indicando uma forte influência da qualidade do resíduo e da quantidade de N fertilizante no incremento da produtividade de milho (Tabela 11).

7.5.3 Nitrogênio absorvido pelo milho

Na Figura 12 observa-se a maior absorção de N no florescimento da safra de milho de 2003/04 em relação à safra 2004/05 na sucessão com ervilhaca e tratamento sem resíduos. Neste último, houve uma redução de 35 kg ha⁻¹ na quantidade absorvida no florescimento na última safra comparada com a primeira. Já, para a ervilhaca, esta redução foi na média de 30 kg ha⁻¹. Nos resíduos de nabo forrageiro, a absorção foi semelhante em ambas as safras. Na aveia preta, a média de N absorvido na safra 2004/05 foi semelhante ao nível de 3 Mg ha⁻¹ de MS na safra 2003/04 e superior aos demais níveis.

A ervilhaca se destacou no suprimento de N ao milho, sendo que na safra com maior disponibilidade hídrica (2003/04), a diferença de N acumulado no florescimento alcançou 40 kg ha⁻¹ em relação ao nabo forrageiro e 55 kg ha⁻¹ em relação à aveia preta com nível 3 Mg ha⁻¹ de MS, enquanto que, na safra com menor disponibilidade hídrica, a diferença da ervilhaca e o nabo forrageiro foi reduzida para 10 kg ha⁻¹ e 30 kg ha⁻¹ em relação à aveia (Figura 12). Diferenças significativas na acumulação de N pelo milho foram obtidas por Basso; Ceretta (2000), durante três anos, em função das épocas de aplicação de N. Os autores ressaltam que, em anos nos quais não ocorreu excesso de chuva, a aplicação de N em pré-semeadura favoreceu a acumulação de N, devido provavelmente à diminuição do efeito da imobilização microbiana, especialmente no início do desenvolvimento do milho. Os resultados sugerem que o aproveitamento do N liberado pelos resíduos foi fortemente influenciado pela disponibilidade hídrica.

O efeito dos níveis de resíduos, em termo de quantidade crescente do mesmo tipo de resíduo, só foi significativo na safra de 2003/04, com a cultura da aveia preta, onde o aporte de 9 Mg ha⁻¹ de MS promoveu uma redução de N absorvido (Figura 12a). Os demais resultados não apresentam diferenças estatísticas em relação à quantidade de resíduo aportado ao solo (Figura 12b).

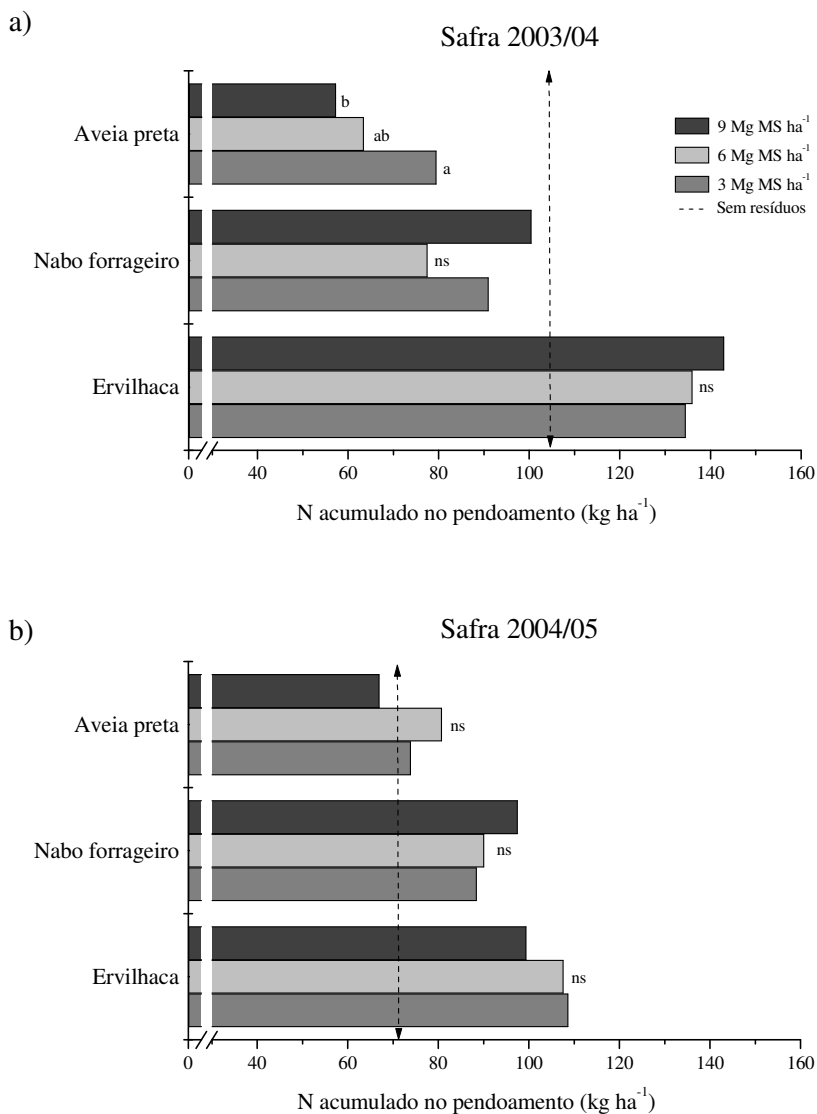


Figura 12 – N acumulado médio no florescimento de milho de cada cultura de cobertura dentro de cada nível de resíduo aportado ao solo na safra 2003/04 (a) e 2004/05 (b). Médias de todas as doses de N e as médias não seguidas pela mesma letra minúscula entre colunas de diferente cor diferem pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). ns = não significativo.

Entretanto, pode se observar a menor absorção de N nos tratamentos com aveia preta, quando comparado ao tratamento sem resíduos, exceto com aplicação de 180 kg ha^{-1} N fertilizante (Figura 13). A menor absorção provavelmente deve estar associada à predominância de processo de imobilização em relação à mineralização de N. Segundo Vargas; Scholles (1998), a maior imobilização microbiana ocorre nas camadas superficiais do

solo sob SPD, podendo ser suficientemente elevada para, isoladamente, afetar a absorção de N pelas plantas.

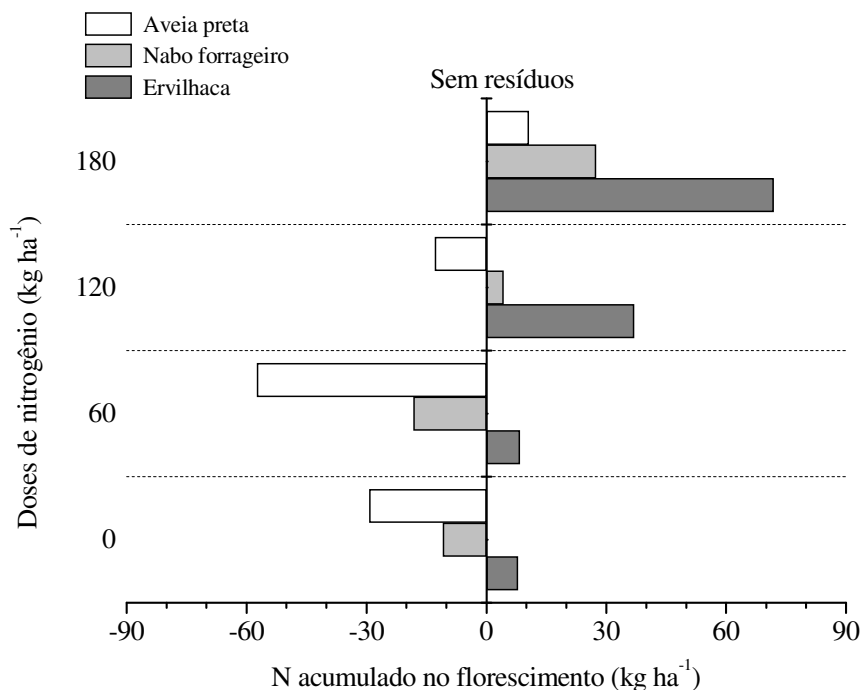


Figura 13 – Diferença do N acumulado até o florescimento no milho cultivado sob resíduos de culturas de cobertura em relação ao tratamento sem aporte de resíduos ao solo, associado a dose de N em cobertura. Médias dos níveis de resíduos em 2003 e 2004.

No ano com elevada disponibilidade hídrica, verificou-se que o solo descoberto foi capaz de suprir 105 kg ha^{-1} de N ao milho, sugerindo que a umidade favoreceu a mineralização do N da forma orgânica, o desenvolvimento radicular do milho e o mecanismo de fluxo de massa, principal mecanismo de suprimento de N as plantas. Neste caso, os adubos verdes aveia preta e nabo forrageiro promoveram imobilização de N. Já, no segundo ano, o suprimento de N do solo foi menor (70 kg ha^{-1}), havendo neste caso a aveia preta produzido efeito neutro na absorção de N, enquanto o nabo forrageiro e a ervilhaca foram fontes de N ao milho. A maior imobilização de N está coerente com o valor da relação C/N. Já a ervilhaca, em ambos os anos, foi uma fonte de N ao milho.

Indiretamente, quanto maior a relação C/N dos resíduos, menor foi a absorção de N pela cultura do milho até o florescimento (Figura 14), provavelmente associado à competição por N das plantas com os microrganismos. Aita (1997) cita que resíduos com relações C/N superiores a 25 têm a tendência a imobilizar N e inferiores a 25 podem liberar. No entanto, é

difícil estabelecer um ponto de equilíbrio entre mineralização e imobilização, mas pode-se afirmar que resíduos com menor relação C/N imobilizam menores quantidades de N, havendo reflexos diretos na absorção de N pelas plantas.

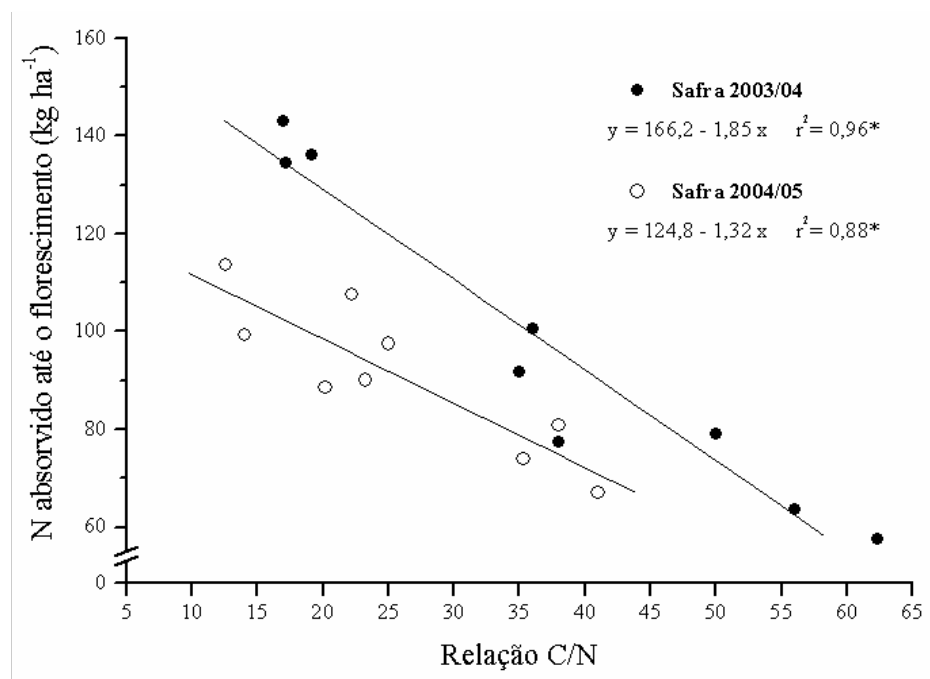


Figura 14 – Relação entre o N absorvido até o florescimento do milho e a relação C/N dos resíduos das culturas de cobertura antecessoras. Médias das doses de N.

Na Figura 15, é apresentada a relação entre o N acumulado até o florescimento e a produtividade de milho, sendo possível identificar que a quantidade total de N absorvida pelo milho foi determinante para a máxima produtividade alcançada. A partir da equação quadrática ajustada, pode-se concluir que a cada kg de N acumulado até o florescimento ocorreu um aumento de, aproximadamente, 40 kg ha⁻¹ de grãos. Sá (1996), estudando o efeito do parcelamento da adubação nitrogenada na semeadura e em cobertura nas doses de 0, 30 e 60 kg ha⁻¹ de N em 3 diferentes regiões do Estado do Paraná, relata que a produtividade de grãos foi significativamente afetada pelas doses de N na semeadura, independente do local. A dose de 30 kg ha⁻¹ de N, no sulco de semeadura, proporcionou o resultado equivalente à dose de 120 kg ha⁻¹ de N em cobertura. O mesmo autor coloca que o retorno de kg de milho por kg de N aplicado na semeadura foi de 31 a 90 kg, enquanto que, a aplicação em cobertura proporcionou um ganho de até 30 kg.

Assim, para alcançar produtividade de milho superior a 9 Mg ha⁻¹, foi necessário acumular, aproximadamente, 150 kg ha⁻¹ de N até o florescimento. Neste caso, só foi possível

alcançar tal quantidade na sucessão ervilhaca/milho, sugerindo que os resíduos de ervilhaca, além de fornecer N, podem favorecer a absorção de N, potencializando ainda mais a produtividade de milho. Isso reforça o pressuposto de que as elevadas quantidades de N disponibilizadas pela rápida decomposição dos resíduos de ervilhaca, no início do desenvolvimento milho, aumentam a concentração de N mineral do solo e podem ser um fator essencial no aumento da produtividade do milho (ver Capítulo II). Derivando-se a equação quadrática, obtêm-se o Ponto de Máxima Absorção (PMabs) de 335 kg ha^{-1} de N, valor o qual indica que o milho, nas condições deste experimento, ainda poderia aumentar em 17% sua produtividade (atingir 11856 kg ha^{-1}), se tivesse absorvido mais N.

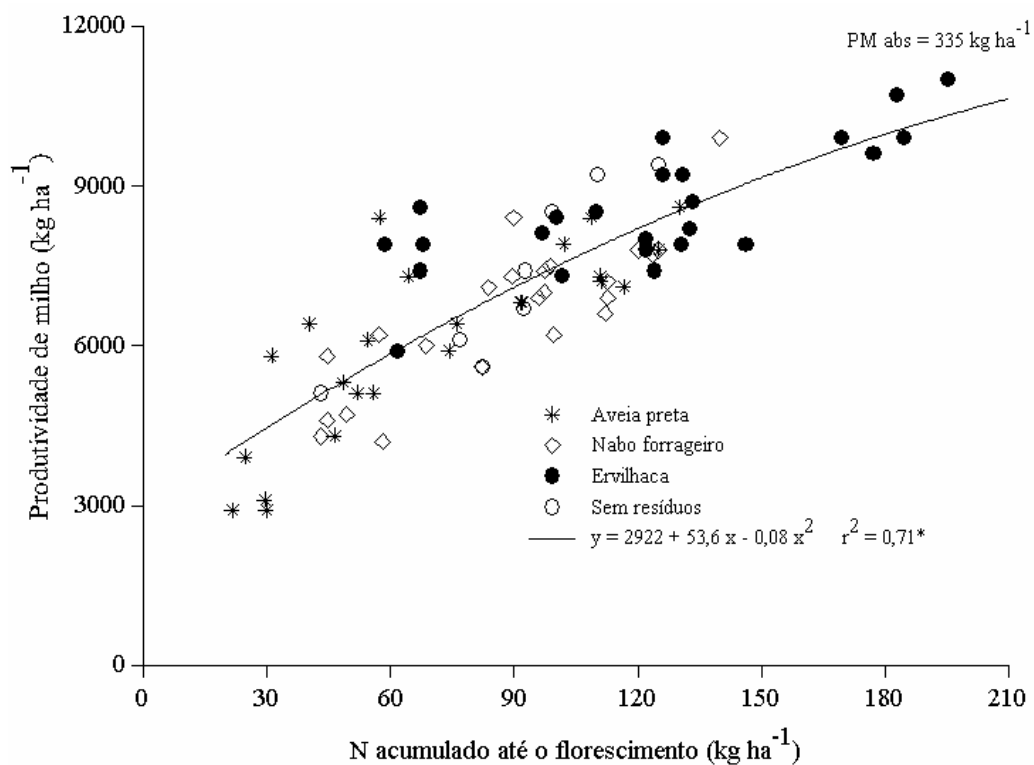


Figura 15 – Relação entre o N acumulado até o florescimento e a produtividade de milho. Média de 2003 e 2004, totalizando 80 observações.

7.5.4 Produtividade de milho

Na média dos dois anos e das doses de N investigadas, a aveia preta, independente da quantidade de resíduos aportados, promoveu uma redução média na produtividade de aproximadamente 1200 kg ha⁻¹ (Figura 16a). Já o nabo forrageiro e a ervilhaca apresentaram efeito distinto na produtividade em função do nível de resíduo aportado ao solo. Para o nabo forrageiro, o aumento da quantidade de resíduo aportado diminuiu o efeito de imobilização do N. Este fato pode estar associado à rápida decomposição dos resíduos de nabo forrageiro em relação à aveia. Assim, o N na fitomassa do nabo forrageiro pode ficar disponível à cultura do milho mais rapidamente do que o contido nos resíduos de aveia. Já a ervilhaca apresentou um aumento linear no incremento da produtividade com o aumento da quantidade de resíduo aportado. Este resultado concorda com a quantidade de N na fitomassa de ervilhaca (Tabela 10), com os resultados de N absorvido (Figura 15) e também com a disponibilidade de N mineral no solo (ver Capítulo II).

Comparando-se os aportes de 6 e 9 Mg ha⁻¹ de MS com menor aporte de 3 Mg ha⁻¹ de MS dentro de cada cultura de cobertura, observa-se pequenos incrementos na produtividade (250 a 1000 kg ha⁻¹ de grãos) com resíduos de nabo forrageiro e ervilhaca (Figura 16b). Os efeitos sobre resíduos de aveia foram praticamente nulos. Esses resultados sugerem que o aporte de resíduos, mesmo em quantidades elevadas (9 Mg ha⁻¹ de MS), independente da cultura de cobertura, não parece ser fator relevante na produtividade de milho.

Analisando as curvas de resposta de N em função das culturas de cobertura (Figura 17), observa-se a menor resposta apresentada pelo milho sobre resíduos de ervilhaca em relação ao nabo forrageiro e aveia-preta em ambos os anos, sendo uma consequência do aporte superior de N pelos resíduos da ervilhaca em relação aos demais e, conseqüentemente, menor resposta à adubação nitrogenada. O incremento médio em grãos de milho por kg de N adicionado sempre foi menor sobre a ervilhaca ($\bar{x} = 10$ kg). A sucessão aveia/milho foi a que mais respondeu à adubação nitrogenada ($\bar{x} = 23$ kg), seguida da sucessão nabo/milho ($\bar{x} = 15$ kg). A produtividade média de milho das safras 2003/04 e 2004/05, na ausência da aplicação de N, em sucessão à ervilhaca foi 56 e 117 % superior em relação ao obtido com nabo forrageiro e à aveia preta, respectivamente. Os maiores tetos de produtividade também foram alcançados pelo milho em sucessão à ervilhaca com 10077 kg ha⁻¹ de grãos (Figura 17). A máxima eficiência técnica média do experimento foi de 156 e 158 kg ha⁻¹ de N, respectivamente em 2003/04 e 2004/05 (ver Apêndice 11). Esta menor eficiência do uso de N

para produção de grãos de milho na safra 2004/05 está associada à forte estiagem deste período com o total precipitado, 50% menor em relação ao mesmo período da safra anterior.

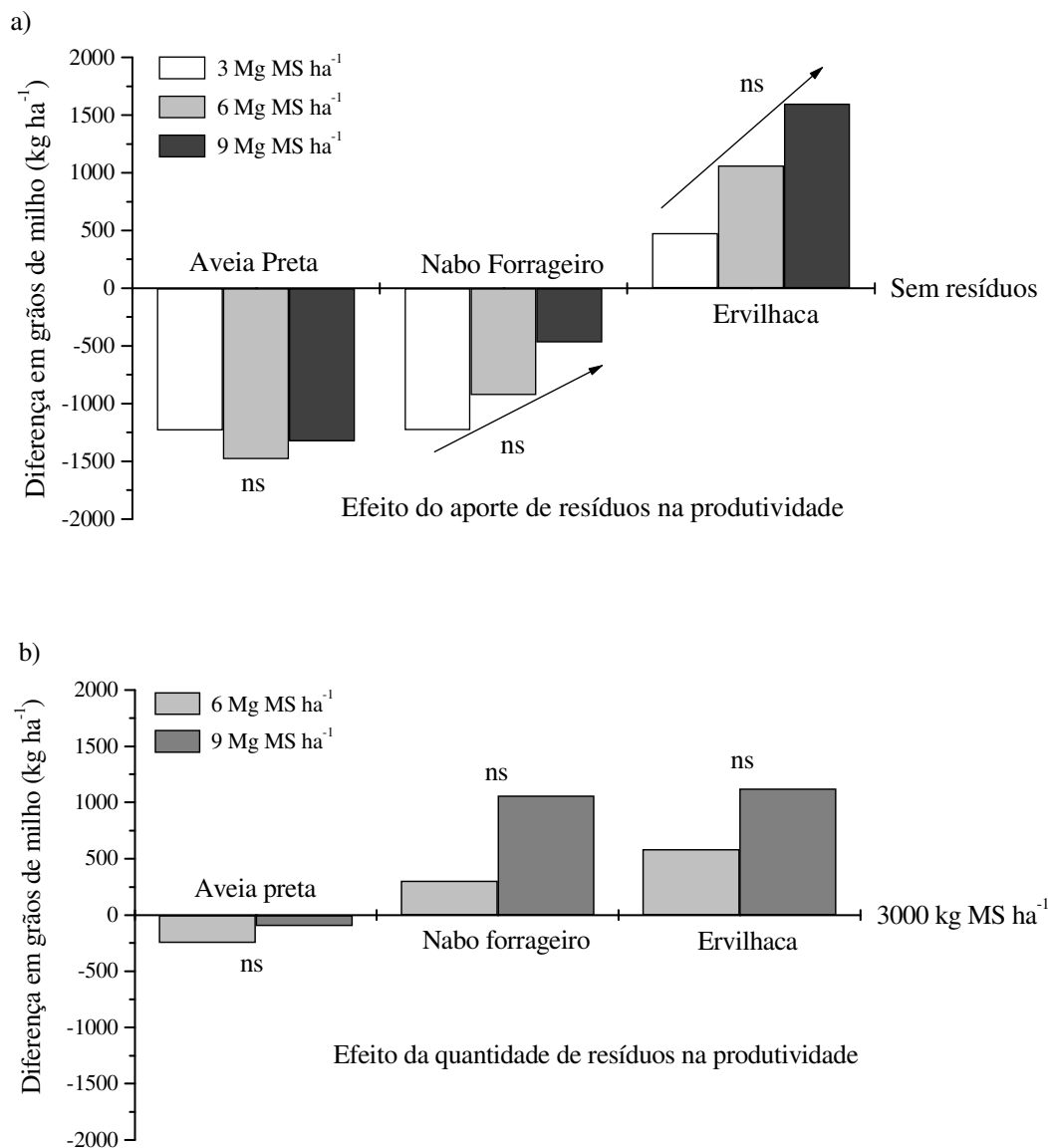


Figura 16 – Efeitos do aporte de resíduos (a) e da quantidade de resíduo (b) na produtividade de milho. Médias das doses de N em 2003 e 2004. ns = não significativo.

Comparando-se os resultados do experimento com a atual recomendação de adubação nitrogenada, destaca-se que a recomendação parece estar superestimando a necessidade de N para a cultura do milho em sucessão à leguminosa, principalmente, para expectativas de baixa a média produção de grãos (≤ 4 a 6 t/ha). Os resultados encontrados também sugerem que os

intervalos de MS adotados pela Comissão de Química e Fertilidade do Solo - CQFS-RS/SC (2004), como forma de recomendar acréscimos ou redução na quantidade de N a ser aplicada, não seriam necessários, uma vez que a quantidade de resíduos não parecer ser relevante para o estabelecimento das doses de N a serem aplicadas no milho e também porque em nível de campo as variações de MS são menores em relação às investigadas neste experimento.

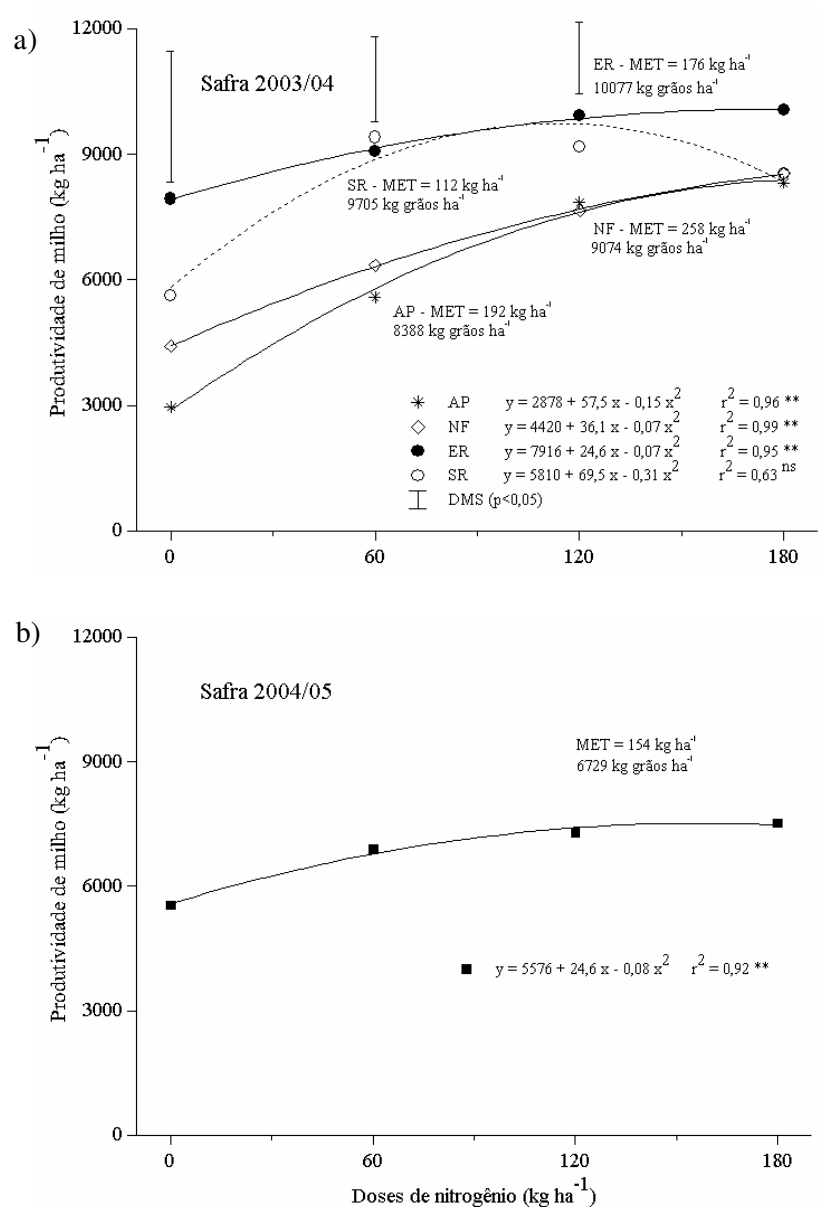


Figura 17 – Curvas de resposta às doses de N na cultura do milho em função do tipo de resíduo antecedente na safra 2003/04 (a). Médias dos níveis de resíduos. AP = aveia preta, NF = nabo forrageiro, ER = ervilhaca e SR = sem resíduos. As barras verticais indicam a Diferença Mínima Significativa (DMS) pelo teste Tukey ($p < 0,05$).

7.6 Conclusões

1. A quantidade de resíduo aportado ao solo não foi um fator relevante para o estabelecimento das doses de N a serem aplicadas no milho.
2. O milho cultivado após resíduos de nabo forrageiro e aveia preta, mesmo com adubações elevadas de N, pode não alcançar os tetos de produtividade obtidos com a sucessão ervilhaca/milho.
3. Há pequena resposta à adubação nitrogenada na cultura do milho, quando cultivado após a ervilhaca, principalmente para atingir produtividade de até 6 Mg ha^{-1} de grãos.
4. Produtividades de milho superiores a 9 Mg ha^{-1} de grãos somente foram possíveis com acúmulo de 150 kg ha^{-1} de N até o florescimento.
5. A elevada quantidade de N disponibilizada pela rápida decomposição dos resíduos de ervilhaca, no início do desenvolvimento milho, pode ser um fator essencial para o aumento da produtividade de milho na sucessão ervilhaca/milho, sugerindo que aplicações antecipadas de N devem ser melhor investigadas.

8 CAPÍTULO IV – SINERGISMO ENTRE RESÍDUOS DE ERVILHACA E ADUBAÇÃO NITROGENADA MINERAL NO MILHO INVESTIGADO POR TÉCNICAS ISOTÓPICAS

8.1 Resumo

A ervilhaca tem sido estudada no Sul do Brasil como uma fonte alternativa de nitrogênio (N) para a cultura do milho e, apesar de resultados sempre positivos, a rápida decomposição e liberação de N dos resíduos desta leguminosa não coincide com a fase de maior demanda de N pelo milho. Assim, este estudo teve como objetivo investigar o valor fertilizante do N-ervilhaca para o milho utilizando técnicas isotópicas com ^{15}N . Para tanto, três estudos foram conduzidos: 1º) estimativa da Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN) da ervilhaca; 2º) avaliação da liberação de N dos resíduos através de sacos de decomposição; e 3º) estimativa do N recuperado pelo milho oriundo dos resíduos de ervilhaca através da técnica de diluição isotópica com ^{15}N . Os experimentos a campo foram conduzidos nas safras 2003/04 e 2004/05, na área experimental do Departamento de Solos da UFSM, RS, Brasil. Já as determinações isotópicas foram realizadas na Royal Veterinary and Agriculture University, Copenhague, Dinamarca. A ervilhaca fixou biologicamente da atmosfera, aproximadamente, 70% de N e acumulou mais de 200 kg ha⁻¹. O N-ervilhaca, mesmo com os resíduos mantidos na superfície do solo, foi liberado rapidamente após o manejo dos resíduos, reduzindo a eficiência de recuperação de N pelo milho. O uso de N-fertilizante também reduziu a recuperação de N-ervilhaca. Assim, quanto maior foi a quantidade de resíduo de ervilhaca aportado ao solo, menor foi a eficiência do N-fertilizante. A recuperação máxima de N-ervilhaca pelo milho foi de 26% no primeiro ano e inferior a 4% após dois anos. A ervilhaca contribuiu significativamente para o aporte de N ao sistema solo-planta através da FBN, aumentando a disponibilidade de N na fase inicial de desenvolvimento do milho. Os resultados sugerem que o N fornecido pelos resíduos de ervilhaca não seja diretamente responsável pela maior produtividade, mas proporciona efeitos positivos no desenvolvimento fisiológico inicial das plantas de milho.

Palavras-chave: cultura de cobertura; fixação de nitrogênio; ^{15}N recuperado; ervilhaca; milho; sincronismo.

8.2 Abstract

SYNERGISTIC BETWEEN HAIRY VETCH RESIDUES AND NITROGEN FERTILIZER IN THE MAIZE INVESTIGATED BY ISOTOPE TECHNIQUES

The hairy vetch culture has been studied in the South of Brazil as an alternative source of nitrogen (N) for the maize and, in spite of results always positive, the fast decomposition and N release of the residues this legume does not match with the phase of larger demand of N by maize. Therefore, this study aimed to evaluate the N fertilizer value from hairy vetch residues to maize using ^{15}N -isotope techniques. For that, three studies were carried out: 1st) estimate of the Biologic Nitrogen Fixation (BNF) from hairy vetch using the ^{15}N natural abundance technique; 2nd) a litterbag experiment to evaluate N release from residues; and 3rd) estimate of the maize N recovery from residue left on the soil surface using the ^{15}N isotope dilution technique. The field experiments were carried out in 04/2003 and 05/2004, in the experimental area of the Soil Department of the Federal University of Santa Maria, RS, Brazil and the isotopes determinations were accomplished in the Royal Veterinary and Agriculture University, Copenhagen, Denmark. The hairy vetch fixed biologically from atmosphere, approximately, 70% of the N and accumulated more than 200 kg N ha⁻¹. The N-hairy vetch, even with the residues maintained in the surface of the soil, was released quickly after residues management, reducing the N recovery efficiency by maize. The use of N-fertilizer also reduced the recovery from N-hairy vetch. Like this, the more the amount of hairy vetch residue added in the soil, the less was the efficiency of the N-fertilizer. The maximum recovery of the N-hairy vetch by maize was 26% in the first year and inferior to 4% after two years. The hairy vetch contributed significantly to the addition of N to the soil-plant system through BNF, increasing also the N availability in the initial phase of development of the maize. The results suggest that N supplied by hairy vetch residues is not directly responsible for the largest maize yield, but provides positive effects in the initial physiological development of the maize plants.

Key-words: cover crop; nitrogen fixation; ^{15}N recovery; hairy vetch; maize; synchronization.

8.3 Introdução

O uso de culturas de cobertura ou adubos verdes em sistemas de rotação, visando melhorar a fertilidade do solo e aumentar a produtividade agrícola, é uma prática muito antiga (REEVES, 1994). Durante a primeira metade do século XX, as leguminosas foram intensivamente utilizadas como fonte de N. No entanto, após a Segunda Guerra Mundial, houve uma significativa redução no uso dessas espécies, devido ao aumento da disponibilidade de fertilizante mineral de origem industrial (CALEGARI et al., 1993), com base no processo conhecido como Haber-Bosch. Este combina nitrogênio e hidrogênio, formando amônia, produzindo outros compostos como a uréia, sendo necessário cerca de 1,3 toneladas de combustível fóssil para fixar 1 tonelada de N em alta pressão (35 a 100 Mpa) e temperatura (300 a 400°C) (MARIN et al., 2009). Este processo foi muito importante para o incremento da produtividade agrícola e fornecimento de alimentos, atendendo a exponencial demanda da população (MOSIER et al., 2004). No entanto, o alto custo do N e a contaminação de recursos hídricos com nitrato induziram, nas últimas décadas, a busca de práticas ambientalmente mais sustentáveis com ênfase em fontes alternativas de N, resultando no estímulo ao uso de culturas de cobertura em sistemas de agricultura conservacionistas (BLEVINS et al., 1990).

No Sul do Brasil, há vários estudos mostrando a eficiência do uso de cultura de cobertura e o incremento na produtividade da cultura do milho sob SPD (PÖTTKER; ROMAN, 1994; TEIXEIRA et al., 1994; AITA et al., 1994; DA ROS; AITA, 1996; SÁ, 1996; AMADO, 1997; AGOSTINETTO, et al., 2000; GONÇALVES; CERETTA, 1999; HEINRICHS et al., 2001; AMADO, 2002; CERETTA et al., 2002). Estes estudos recomendam o uso de leguminosas, principalmente a cultura da ervilhaca, com fonte suplementar de N na produção de milho. Além de proporcionar a vantagem de outras culturas de cobertura, tal como o controle da erosão, a ervilhaca fornece elevadas quantidades de N para milho em sucessão e pode, parcialmente (AITA et al., 1994) ou totalmente (ROS; AITA, 1996), substituir o uso de fertilizante mineral, motivo pelo qual é considerada um adubo verde.

Estimativas do N fertilizante equivalente ao uso de leguminosas variam consideravelmente (SCIVITTARO et al., 2003). A maioria dos benefícios das leguminosas tem sido atribuída ao incremento na disponibilidade de N (FLEMING et al., 1981; EBELHAR et al., 1984; TEIXEIRA et al., 1994; AITA et al., 1994). Além disso, as leguminosas como adubos verdes podem suprir uma considerável quantidade de N fixado biologicamente,

melhorando o balanço de N no sistema (HEINRICHS et al., 2001) e podendo aumentar o “pool” de N total do solo (AMADO, 2000), o qual é considerado como o principal destino do N oriundo dos resíduos das culturas de cobertura (HARRIS; HESTERMAN, 1990; SCIVITTARO et al., 2003).

Embora os resíduos das leguminosas contenham uma significativa quantidade de N, a real quantidade que será absorvida pela cultura sucessora irá depender do sincronismo entre a liberação de N dos resíduos e a demanda da cultura sucessora (AMADO, 2000). A combinação de leguminosas com N fertilizante é uma promissora estratégia de manejo alinhada com a preservação ambiental, pois proporciona a racionalização do uso de insumos externos, sem perdas de produtividade (SCIVITTARO et al., 2003). Existe ainda a possibilidade de sinergismo entre estas práticas, resultando em maior produtividade do milho quando comparado com o uso exclusivo de adubos verdes ou de fertilizantes minerais (PÖTTKER; ROMAN, 1994; AITA et al., 1994; GONÇALVES; CERETTA, 1999).

Como forma de aprimorar a recomendação de fertilizante nitrogenado para o milho, quando associado ao uso de adubos verdes como a ervilhaca, faz-se necessário conhecer a quantidade de N liberada pelos resíduos e quanto N pode ser absorvido pelo milho, com ou sem adubação nitrogenada complementar. Neste contexto, o objetivo principal deste trabalho foi investigar o valor fertilizante do N-ervilhaca para o milho através de técnicas isotópica com ^{15}N . Para isso, foram conduzidos três estudos: 1º) para estimar a Fixação Biológica de Nitrogênio (FBN) da ervilhaca através da técnica de abundância natural de ^{15}N ; 2º) para avaliar a liberação de N dos resíduos através de sacos de decomposição; e 3º) para estimar o N recuperado pelo milho oriundo dos resíduos da ervilhaca através da técnica de diluição isotópica com ^{15}N .

8.4 Material e Métodos

8.4.1 Local e solo

O experimento foi realizado durante maio de 2003 a março de 2005 na área experimental da Universidade Federal de Santa Maria, localizada a 12 km de Santa Maria (29°43' S e 53°42' W), RS. O solo é um ARGISSOLO VERMELHO Distrófico arênico no sistema brasileiro de classificação (EMBRAPA, 2006). As características químicas da camada de 0 a 20 cm no início do experimento eram: MOS = 1,1%; pH = 4,9; P disponível (Mehlich I) = 27 mg dm⁻³; CTC = 4,2 cmol_c dm⁻³; argila = 160 g kg⁻¹ e cátions trocáveis (cmol_c dm⁻³):

K = 0,07; Ca = 1,5; Mg = 0,4 e Al = 0,3. A média mensal da temperatura do ar da região varia de 9,3°C a 31,8°C. O clima é subtropical úmido, segundo a classificação de Köppen, com precipitação média anual de 1.686 mm.

8.4.2 Avaliação da fixação biológica de N

No final da estação de crescimento da ervilhaca (*Vicia villosa* Roth), cinco amostras de resíduo da parte aérea foram coletadas, bem como amostras de aveia preta (*Avena strigosa* Schreb) e de nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.), ambas utilizadas como plantas de referência para a estimação da FBN da ervilhaca pela técnica de abundância natural. As amostras foram secas a 65° C até peso constante, visando à determinação da quantidade matéria seca. Em seguida, as amostras foram moídas e passadas em peneira de 0,5 mm. Os conteúdos de C, N e a abundância de ¹⁵N foram mensurados, utilizando o espectrômetro massa de análise elementar ANCA-CL (EUROPA SCIENTIFIC LTD., UK, 1996) no laboratório da Royal Veterinary and Agriculture University, Copenhagen, Dinamarca ⁽¹⁾.

8.4.3 Avaliação da decomposição da ervilhaca

Em 2003 e 2004, os sacos de decomposição, com dimensões de 0,18 x 0,19 m e malha de 0,5 mm, foram utilizados visando determinar a taxa de decomposição de resíduos de ervilhaca mantidos na superfície do solo. Em cada ano, 40 sacos de decomposição foram completados com 100 g de resíduos verdes e colocados na superfície do solo no momento da semeadura do milho. Os sacos de decomposição foram amostrados em sete épocas, correspondendo a 1^a, 2^a, 3^a, 4^a, 6^a, 8^a e 13^a semana após semeadura do milho, com cinco repetições de campo. Todas as amostras foram secas, pesadas, moídas e analisadas quanto ao conteúdo de C e N.

8.4.4 Marcação isotópica da ervilhaca

A marcação foi realizada com 0,705 kg de ¹⁵(NH₄)₂SO₄, enriquecido com 10% de átomos de ¹⁵N, o qual foi dissolvido em água e posteriormente pulverizado com borrifador

⁽¹⁾ Este estudo foi suportado pelo Programa Alþan (Programa Europeu de Bolsas de Alto Nível para América Latina) e realizado de 15 de janeiro a 15 de agosto de 2005, em Copenhagen, Dinamarca. Bolsa número: E04M043372BR.

manual em 20 kg de areia seca, que foi utilizada como material inerte. A dose de fertilização foi equivalente a 78 kg ha⁻¹ de N. No início do mês de setembro de 2003, uma área adjacente (20 m²) ao experimento, na qual foi cultivada ervilhaca semeada em junho e em estágio próximo ao do florescimento, foi dividida em 20 quadrados de 1 m², onde cada quadrado recebeu 1 kg de areia com o ¹⁵N-fertilizante. Transcorridas quatro semanas da fertilização, a parte aérea da ervilhaca foi colhida rente à superfície do solo e seca ao ar por cinco dias. Em setembro de 2004, novamente foi plantada ervilhaca na mesma área, sendo a leguminosa marcada por ¹⁵N residual da fertilização enriquecida em setembro de 2003.

8.4.5 Recuperação de ¹⁵N-ervilhaca pelo milho

Este estudo foi realizado em microparcels dentro de parcelas de um experimento com diferentes culturas de cobertura (aveia preta, nabo forrageiro e ervilhaca), níveis de resíduos (0, 3, 6 e 9 Mg ha⁻¹ de MS) e doses de N na cultura do milho (0, 60, 120 e 180 kg ha⁻¹ de N). Para este estudo, foram utilizadas as parcelas principais de 5 x 48 m com ervilhaca. Maiores detalhes do experimento principal podem ser encontrados no Capítulo III. Em cada ano, os resíduos de ervilhaca não enriquecidos com ¹⁵N foram removidos e substituídos por resíduos marcados. Os tratamentos incluíram três níveis de resíduos marcados (sem resíduos, 50% e 100% da produção total de resíduos) e três doses de N fertilizante (0, 60, 120 kg ha⁻¹ de N). As microparcels mediam 4 m² e foram localizadas dentro de parcelas com 25 m². O total de resíduo coletado oriundo da área de marcação foi seco a 60°C e dividido em nove volumes de mesmo peso. Para a distribuição, três microparcels receberam apenas um volume e outras três receberam dois volumes cada, sendo que três microparcels permaneceram sem resíduos. Os tratamentos foram inteiramente casualizados, com três repetições dentro de cada microparcels (Figura 18).

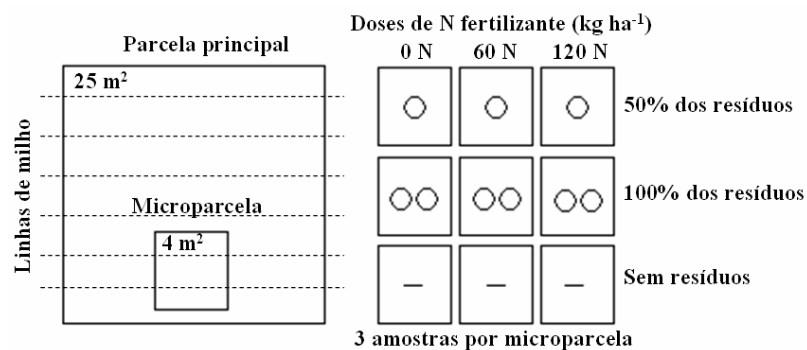


Figura 18 – Desenho experimental de uma microparcela dentro da parcela principal e a distribuição dos volumes contendo resíduos de ervilhaca marcada para a criação dos níveis de resíduos marcados.

Os níveis de resíduos estabelecidos em 2003 foram de 1800 e 3600 kg ha⁻¹ de MS, respectivamente, 50% e 100% da real quantidade de resíduos produzido. Já em 2004, os níveis de resíduos respectivamente aplicados foram de 2305 e 4610 kg ha⁻¹, devido à maior produção de MS deste ano (Tabela 12).

Tabela 12 – Características dos resíduos de ervilhaca marcada com ¹⁵N no primeiro e no segundo ano do experimento.

	2003	2004
Matéria seca produzida (kg ha ⁻¹)	5400	4610
% N	4,14	3,13
Nitrogênio (kg ha ⁻¹)	223,3	144,4
Relação C/N	11:1	14:1
% de atonicidade (¹⁵ N)	1,830	0,418
¹⁵ N em excesso ¹	1,463	0,052
¹⁵ N em excesso (kg ha ⁻¹)	3,270	0,075
% de ¹⁵ N em excesso	399,5	14,1

¹ Abundância natural da atmosfera = 0,3663 % de ¹⁵N

O milho utilizado foi o híbrido AG8021, semeado no mês de outubro e em ambos os anos com 120.000 plantas ha⁻¹. Inicialmente havia 48 plantas de milho em cada microparcela semeadas em duas linhas com 0,9 m de espaçamento e, aproximadamente, 10 cm entre plantas (Figura 12). As linhas externas de cada lado das microparcels foram consideradas como área de bordadura. O controle de ervas daninhas foi realizado regularmente, principalmente no começo do período de desenvolvimento e, quando necessário, as plantas foram pulverizadas com defensivos para proteger contra o ataque de insetos, segundo as normas técnicas da cultura do milho (INDICAÇÕES..., 2006). As doses de N-fertilizante corresponderam à aplicação de uréia parcelada nas seguintes fases: semeadura, 30 e 45 dias após a emergência, como detalhado na Tabela 13.

Tabela 13 – Fase de desenvolvimento do milho e quantidade de N fertilizante aplicado.

Doses de N ¹	Fase de desenvolvimento		
	Plantio	30 DAE	45 DAE
0 kg ha ⁻¹	0	0	0
60 kg ha ⁻¹	20	20	20
120 kg ha ⁻¹	30	50	40

¹ O fertilizante nitrogenado utilizado foi a uréia. DAE = Dias após a emergência.

Plantas de milho foram amostradas durante os seguintes períodos: 23, 52, 82 e 141 dias após a emergência (DAE) em 2003 e 27, 47, 75 e 128 DAE em 2004. Em cada período, três amostras, contendo três plantas, foram amostradas por microparcela. Na última amostragem realizada na colheita em março, as espigas e plantas foram coletadas separadamente. As amostras de fitomassa foram secas a 65° C até peso constante, sendo posteriormente avaliada a quantidade matéria seca e realizada a moagem para passar em peneira de 0,5 mm. A quantidade de N acumulado e a de enriquecimento com ¹⁵N também foram mensuradas por espectrômetro de massa descrito anteriormente.

8.4.6 Re-marcação da ervilhaca em microparcelas de 2003

As antigas microparcelas marcadas com resíduos de ervilhaca em 2003 foram avaliadas novamente em 2004. Para formação dos níveis de resíduos, as microparcelas com elevada aplicação de resíduos (100%) permaneceram com a quantidade de MS correspondente à produção de 2004 (5132 kg ha⁻¹). Já no tratamento com baixo nível de aplicação, 50% dos resíduos foram retirados das microparcelas, permanecendo com a metade da produção de 2004 (2566 kg ha⁻¹). Isto permitiu obter dados de dois anos consecutivos, bem como a mensuração do ¹⁵N recuperado, dois anos após aplicação dos resíduos.

8.4.7 Cálculos: abundância natural e técnica diluição isotópica de ¹⁵N

Os seguintes cálculos foram utilizados:

a) % Ndfa = % de nitrogênio derivado da atmosfera

$$\%Ndfa = \frac{(\% \text{ de átomos de } ^{15}\text{N da PR} - \% \text{ de átomos de } ^{15}\text{N da PF})}{(\% \text{ de átomos de } ^{15}\text{N da PR} - B)} \times 100 \quad (3)$$

$$\% \text{ de átomos de } ^{15}\text{N} = \text{abundância natural de átomos de } ^{15}\text{N como \% do total} = \frac{^{15}\text{N}}{\text{total}} \times 100$$



Onde:

B = 0,3663% (assumiu-se que o B foi igual ao enriquecimento de ^{15}N da atmosfera)

PR = Plantas de referência (nabo forrageiro e aveia preta)

PF = Planta fixadora (ervilhaca)

b) % N_{dfr} = % de nitrogênio derivado dos resíduos

$$\% \text{ N}_{dfr} = \frac{(\% \text{ de átomos de } ^{15}\text{N} \text{ em excesso no milho marcado} - \% \text{ no milho não marcado}) \times 100}{(\% \text{ de átomos de } ^{15}\text{N} \text{ em excesso nos resíduos})} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \% \text{ de átomos em excesso} &= \% \text{ de átomos de } ^{15}\text{N} \text{ acima do \% encontrado na atmosfera} \\ &= \% \text{ de átomos de } ^{15}\text{N} - 0,3663 \end{aligned}$$

$$\text{N}_{dfr} (\text{kg ha}^{-1}) = \frac{\% \text{ N}_{dfr}}{100} \times [\% \text{ N} \times \text{Matéria seca} (\text{kg ha}^{-1})] \quad (5)$$

c) N recuperado = % de nitrogênio recuperado dos resíduos

$$\text{N recuperado} (\%) = \frac{\text{N}_{dfr} (\text{kg ha}^{-1})}{\text{Total de N aplicado via resíduos}} \times 100 \quad (6)$$

8.4.8 Análise estatística

Todos os resultados foram analisados segundo análise da variância com $p < 0,05$ e testados quanto à diferença significativa entre tratamentos, utilizando o programa PlotIT 3.2 (Scientific Programming Enterprises, Haslsett, 1997).

8.5 Resultados e Discussão

8.5.1 Fixação biológica de nitrogênio

O potencial do uso dos resíduos de ervilhaca como fonte alternativa de N à cultura do milho está diretamente associado à fixação biológica de N da atmosfera. Destaca-se que este trabalho alcançou média de 70% (Tabela 14) e acumulou 223 kg ha⁻¹ de N em 2003 e 144 kg ha⁻¹ em 2004 (Tabela 12). Valores semelhantes de FBN por leguminosas foram encontrados por Giller; Wilson (1993), da mesma forma que a quantidade de N acumulada na ervilhaca. Isto corrobora com Bowman et. al. (1998), que encontraram acúmulos de 100 a 200 kg ha⁻¹ de N, com produção de matéria seca variando entre 2500 a 5000 kg ha⁻¹.

Tabela 14 – Capacidade de fixação biológica de nitrogênio da ervilhaca usando a técnica de abundância natural em 2003 e 2004.

Parâmetros	2003	2004
% N	4,34 $\pm 0,38$	2,87 $\pm 0,19$
Atomicidade de ^{15}N (%)	0,370 $\pm 0,034$	0,367 $\pm 0,012$
Relação C/N	10,6 $\pm 0,87$	15,2 $\pm 0,89$
% Ndfa ¹	66,6 $\pm 12,4$	78,2 $\pm 6,6$

¹ % Ndfa = % de N derivado da atmosfera. Média das plantas de referências (aveia preta e nabo forrageiro).

² Desvio padrão, n= 5

Praticamente não houve diferença na estimativa de fixação biológica para ambas as plantas de referência utilizadas (nabo forrageiro e aveia preta). No primeiro ano, a média de fixação biológica dos resíduos de ervilhaca foi de 66,6% de Ndfa, enquanto que no segundo ano foi de 78,2%, embora que, no segundo ano, o percentual de átomos de ^{15}N tenha sido menor (Tabela 14). Esta capacidade de fixação de N atmosférico e o acúmulo de N na fitomassa proporcionam a formação de um resíduo orgânico de elevada qualidade bioquímica, em termos de velocidade decomposição e liberação de N ao solo, principalmente quando comparada a gramíneas como a aveia preta (BOLLIGER et al., 2006).

8.5.2 Decomposição de resíduos e N liberado

O processo de decomposição e a liberação de N apresentaram padrões similares em ambos os anos estudados. Entretanto, no primeiro ano, a perda de resíduo foi ligeiramente mais rápida do que no segundo ano e houve quase o dobro de N liberado em 2003 em relação a 2004 (Figura 19). Nos primeiros 15 dias de decomposição, somente 15 a 20% do resíduo inicial foi decomposto e, após 50 dias, os resíduos de 2003 apresentaram 45% da quantidade inicial, enquanto que os resíduos de 2004 apresentaram pouco mais de 30% (Figura 19a). Diferentemente da perda de resíduos, a liberação de N, após 15 dias de decomposição, alcançou mais de 50 kg ha⁻¹ de N, sendo que 90% do total de N liberado ocorreu nos primeiros 30 dias de decomposição em ambos os anos avaliados (Figura 19b).

A liberação de N dos resíduos de ervilhaca durante o período avaliado foi maior em 2003 do que em 2004, estando este resultado associado à menor relação C/N e à maior concentração de N verificada naquele ano (Tabela 14). Na Figura 19a pode ser verificado que a relação C/N dos resíduos de ervilhaca durante o período de decomposição teve um incremento inicial seguido da estabilização da relação C/N. A quantidade de N liberado

próximo ao florescimento do milho (98 dias) alcançou, aproximadamente, 120 e 70 kg ha⁻¹ de N, respectivamente em 2003 e 2004. Normalmente, a relação C/N é um dos principais atributos bioquímicos que governa o padrão de decomposição (MARY, 1996), sendo que os resíduos com menor relação têm um processo de perda de massa e liberação de N mais rápido, como pode ser observado, principalmente, nos resíduos de 2003 com menor relação C/N (Figura 19a; Tabela 12). Neste caso, apesar da diferente quantidade acumulada de N (223 e 144 kg ha⁻¹ de N, respectivamente em 2003 e 2004), a proporção liberada média após 100 dias foi de aproximadamente 55% (Figura 19b), sendo que grande parte foi liberada nos primeiros 30 dias após o manejo, resultado normalmente encontrado para resíduos com relação C/N entre 10 a 15 (AITA; GIACOMINI, 2003).

A rápida liberação de N dos resíduos de ervilhaca (e de outras leguminosas) é geralmente observada em estudos de decomposição em condições subtropicais e tropicais, sendo um fator bastante discutido em termos de possíveis perdas de eficiência na recuperação de N pela cultura do milho (AITA; GIACOMINI, 2003), uma vez que, na maioria das vezes, o milho com desenvolvimento inicial não tem capacidade de absorver grandes quantidades, podendo haver perdas de N, principalmente, por lixiviação e/ou volatilização (CERETTA, 1998). Assim, alguns autores preconizam efetuar plantio de milho logo após o manejo dos resíduos (HEINZMANN, 1985; AITA et al., 2001) e/ou reduzir a adubação nitrogenada de base e de cobertura (CQFS-RS/SC, 2004) de modo a aumentar a eficiência técnica e econômica desta prática de manejo.

Por outro lado, o elevado conteúdo de N no solo proporcionado pela decomposição dos resíduos de ervilhaca, no início do desenvolvimento do milho, pode ter potencializar a capacidade de produção do milho, estimulando o crescimento radicular, aumentando a taxa fotossintética (UHART; ANDRADE, 1995), além do acúmulo de N e fotossintatos importantes durante o desenvolvimento da cultura do milho. Alguns autores (ARNOL, 1975; MAGDOFF, 1991; FANCELLI & DOURADO NETO, 1996) afirmam que o número de fileiras e número de grãos por fileiras de uma espiga de milho (2 componentes essenciais da produtividade) seriam definidos até a emissão da 4ª folha. Segundo Baluska et al. (2005), através da emissão de impulsos elétricos entre células, as plantas criam e armazenam informações pertinentes à sua sobrevivência. No caso da cultura do milho, informações sobre a elevada disponibilidade N no solo, mesmo que inicialmente, poderiam ser um pré-requisito essencial para se alcançar elevadas produtividades.

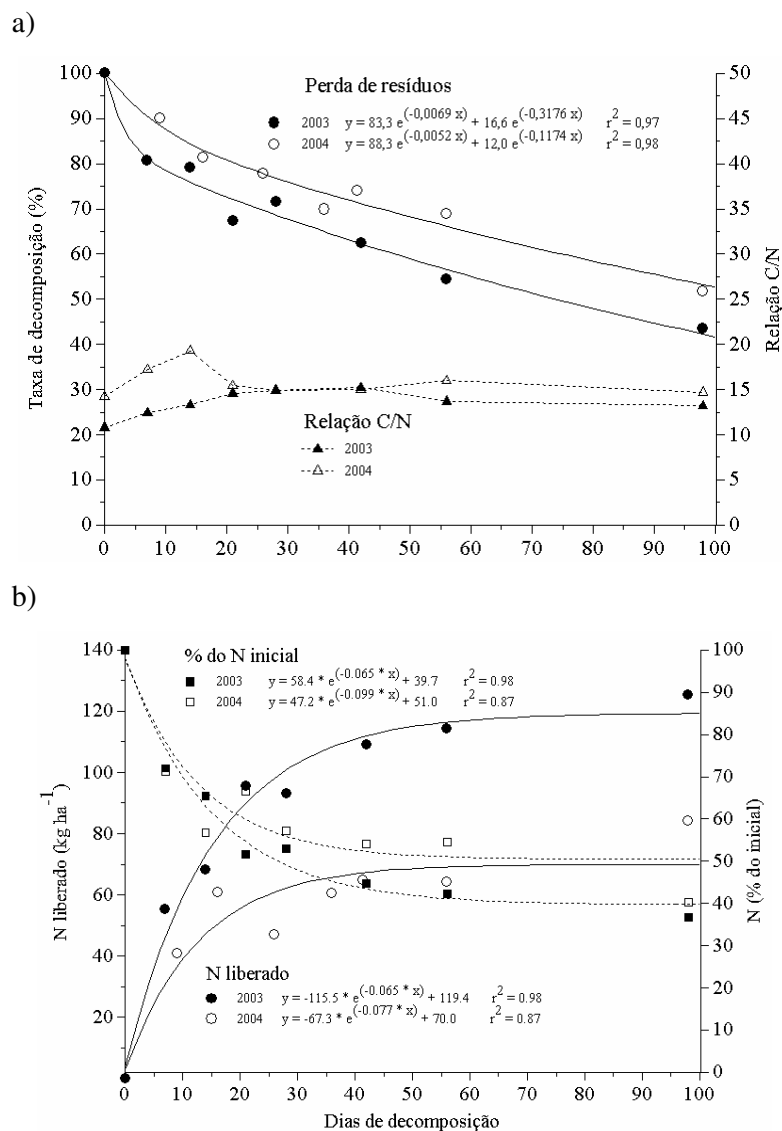


Figura 19 – Taxa de decomposição e relação C/N (a) e a liberação de N com a proporção de N remanescente nos resíduos (b) após 98 dias de decomposição em 2003 e 2004.

8.5.3 Nitrogênio derivado dos resíduos – Primeiro ano de recuperação

A produção de MS de ervilhaca na parcela destinada à marcação com ^{15}N foi de 5400 e 4610 kg ha⁻¹, respectivamente em 2003 e 2004 (Tabela 12). O percentual de N foi 32% maior em 2003, resultando em uma menor relação C/N em relação a 2004. A quantidade de N acumulada variou de 144 a 223 kg ha⁻¹ de N, respectivamente em 2004 e 2003. Os resultados da marcação isotópica mostraram que, provavelmente, o fertilizante enriquecido com átomos de ^{15}N em setembro de 2003 possa ter promovido a maior produção de MS de ervilhaca em

2003, seguido de um maior acúmulo de N, menor relação C/N e maior taxa de decomposição, além da redução da fixação biológica de N. Porém, mesmo com essas diferenças e um enriquecimento 28 vezes menor no segundo ano, sem marcação direta, os dados obtidos de recuperação de N foram semelhantes em ambos os anos avaliados, variando entre 12 a 27% do total de N acumulado nos resíduos de ervilhaca (Figura 20). Hood et al. (1999), também trabalhando com a interação entre resíduos e doses de N, mas em experimento laboratorial, encontraram baixa recuperação (apenas 11%) e afirmam que adição de N fertilizante não aumentou a recuperação de N dos resíduos.

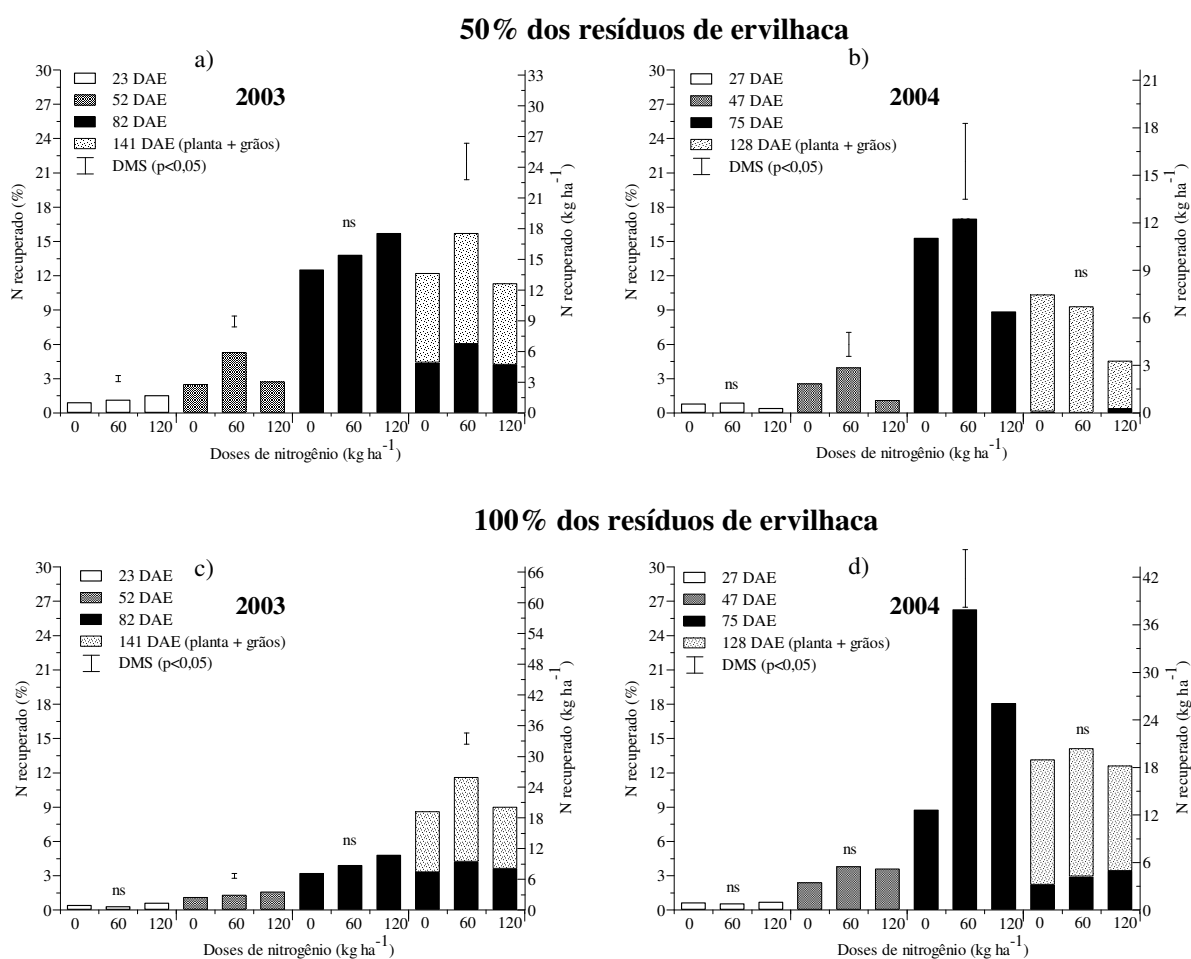


Figura 20 – Recuperação de N com 50% (a,b) e 100% (c,d) dos resíduos em 2003 e 2004. DAE = Dias após a emergência. As barras verticais indicam a Diferença Mínima Significativa (DMS) pelo teste Tukey ($p < 0,05$). ns = não significativo.

O N recuperado foi diferente entre as fases de desenvolvimento do milho, entre os níveis de resíduos aportados e entre as doses de N fertilizante aplicadas. O florescimento foi a fase fenológica que apresentou a maior recuperação de ¹⁵N, alcançando 27% em 2004 no

tratamento com aporte de 100% dos resíduos. Na colheita de grãos (141 DAE), foram encontrados, em ambos os anos, mais de 75% do N recuperado. Já os níveis de resíduo influenciaram o total de N acumulado, sendo que o maior aporte de resíduo sempre proporcionou maior acúmulo de N (18 a 24 kg ha⁻¹ de N em 2003 e 12 a 36 kg ha⁻¹ de N em 2004, respectivamente para o aporte de 50 e 100% dos resíduos). Em 2003, o efeito dos tratamentos 50% e 100% dos resíduos foi menor do que em 2004. Este fato está coerente com a qualidade do resíduo que tinha maior concentração e menor relação C/N (Tabela 12). Também levando em consideração a fase de florescimento em 2003, a maior recuperação de N seguiu as doses de N fertilizante aplicado em cobertura, não sendo estatisticamente diferente. Em 2004 a maior recuperação ocorreu com a aplicação de 60 kg ha⁻¹ de N em cobertura (Figura 20).

Os resultados quanto à recuperação de N permitem concluir que o florescimento é o momento de maior absorção de N, provavelmente por ser a fase de maior demanda por água e N da cultura do milho (MUZILLI, 1989). Nesta fase foi obtida a maior taxa de recuperação de N ($\pm 27\%$), sendo que grande parte do N absorvido até este momento (fase vegetativa) foi translocado para os grãos (fase reprodutiva e de enchimento de grãos). Apesar da redução no N recuperado aos 141 DAE (planta + grãos), provavelmente associado à senescência de folhas, mais de 75% do N recuperado neste estágio se encontrou nos grãos, evidenciando grande mobilidade do N dentro da planta (UHART; ANDRADE, 1995). Segundo Muzilli (1989), a partir do florescimento, o crescimento diminui e passa a predominar a translocação dos compostos acumulados na parte vegetativa para os grãos em formação.

A MS no florescimento do milho em 2004 acumulou mais N à medida que se aumentaram as doses de adubação nitrogenada no tratamento com aporte de 50% de resíduos, sem diferença estatística entre as doses de 60 a 120 kg ha⁻¹ de N. Já com 100% de aporte de resíduos, o nível de 60 kg ha⁻¹ de N apresentou o maior acúmulo de N, chegando a produzir até 22 Mg ha⁻¹ de MS. Observa-se, também, a redução da atômica e do excesso de ¹⁵N com o incremento das doses de N em ambas as quantidades de resíduos aportadas (Tabela 15).

Considerando que foi liberado, na média de 2003 e 2004, aproximadamente 55% do N total acumulado (Figura 19b), o valor de recuperação variou de 16 a 48% no florescimento. Assim, sugere-se que a ervilhaca teria dois “pools” de N. O primeiro, mais facilmente decomponível (compartimento lábil), contribuiria diretamente na nutrição do milho e o segundo, de decomposição mais lenta (compartimento recalcitrante), tem como destino o aumento ou reposição das reservas de N do solo. Assim, os resultados sugerem que a

combinação entre resíduos e doses de N pode potencializar a eficiência do N pelas plantas e proporcionar ganhos de produtividade, pois o N-ervilhaca potencializa a absorção de N pela planta, seja o N-fertilizante ou o N oriundo da mineralização da matéria orgânica.

Tabela 15 – Características de marcação isotópica de resíduos de milho no estágio de florescimento em função do aporte de resíduos de ervilhaca em 2004.

	50% de resíduos			100% de resíduos		
	0	60	120	0	60	120
Matéria seca (Mg ha ⁻¹)	12,7 b ³	14,3 ab	16,5 a	9,2 c	22,3 a	15,6 b
% N	0,96 b	1,02 ab	1,19 a	1,06 c	1,31 b	1,47 a
Nitrogênio (kg ha ⁻¹)	121,1 b	146,8 ab	197,4 a	97,1 b	292,7 a	229,7 a
% de atonicidade (¹⁵ N)	0,374 a	0,372 b	0,370 c	0,376 a	0,375 ab	0,374 b
¹⁵ N em excesso	0,0077 a	0,0058 b	0,0035 c	0,0097 a	0,0083 ab	0,0076 b
% Ndf ¹	9,1 a	8,3 a	3,3 b	13,0 a	13,1 a	11,3 a
Ndf ¹ (kg ha ⁻¹)	11,0 a	12,3 ab	6,4 b	12,6 c	37,9 a	26,1 b
% de N recuperado	15,3 a	17,0 ab	8,8 b	8,8 c	26,3 a	18,1 b
% de N recuperado ²	27,8 a	30,9 ab	16,4 b	15,9 c	47,8 a	32,4 b

¹ % Ndf = % de nitrogênio derivado dos resíduos.

² % de N recuperado, considerando liberação de 55% do N acumulado nos resíduos.

³ Valores seguidos pela mesma letra dentro do mesmo nível de resíduo não diferem significativamente (Duncan, $p < 0,05$)

Outra hipótese dos benefícios da sucessão ervilhaca/milho é a disponibilidade de N na forma de N-NH₄⁺, produto imediato da mineralização (ROBERTSON; GROFFMAN, 2007). Segundo Wang; Below (1992), a absorção de N pelo trigo aumentou em 35%, quando 1/4 de N foi fornecido na forma de N-NH₄⁺. A assimilação de N-NO₃⁻ requer energia equivalente a 20 ATP mol⁻¹ N-NO₃⁻, enquanto a assimilação de N-NH₄⁺ requer somente 5 ATP mol⁻¹ N-NO₃⁻ (SALSAC et al., 1987). Esta energia economizada pode proporcionar um aumento em matéria seca na plantas supridas com N-NH₄⁺ (HUFFMAN, 1989).

8.5.4 Produtividade e N recuperado nos grãos

Quando somente 50% dos resíduos de ervilhaca foram aportados ao solo, a produtividade de grãos foi incrementada entre 1,95 a 2,49 Mg ha⁻¹, com aplicação de N fertilizante nas doses de 0 a 120 kg ha⁻¹ de N, respectivamente para 2003 e 2004. Quando 100% dos resíduos foram aportados, a variação máxima entre as mesmas doses de N foi de apenas 1,53 a 0,67 Mg ha⁻¹, inclusive para este tratamento, não havendo diferença estatística em ambos os anos. O N recuperado do total de N acumulado nos resíduos de ervilhaca com o aporte de 50% dos resíduos variou entre 7,1 a 9,7% (8 a 11 kg ha⁻¹ de N) em 2003 e entre 4,2 a 10,2% (3 a 7 kg ha⁻¹ de N) em 2004. Com o aporte de 100% dos resíduos, a recuperação foi

quantitativamente maior, variando entre 5,3 a 7,4% (12 a 17 kg ha⁻¹ de N) em 2003 e entre 9,2 a 11,2% (13 a 16 kg ha⁻¹ de N) em 2004 (Tabela 16).

Tanto os resultados de recuperação de N nas plantas de milho como nos grãos indicam que adubação nitrogenada foi mais eficiente na produção de grãos e no acúmulo de N, quando combinada com menores quantidades de resíduos (50% dos resíduos), inclusive não havendo diferença estatística na produção de grãos, quando a adubação nitrogenada foi combinada com elevado aporte de resíduos (100% dos resíduos) (Tabela 16). À medida que se aumentou a adubação nitrogenada (0 < 60 < 120 kg ha⁻¹ de N), independente da quantidade de resíduos aportada, houve significativa redução de N derivado dos resíduos. Este resultado corrobora com Hood et al. (1999), que utilizaram marcação cruzada para comparar métodos diretos e indiretos para estimativa do N recuperado de resíduos orgânicos. Além disso, verificaram que o percentual de N fertilizante recuperado foi significativamente maior do que o percentual N oriundo dos resíduos, sugerindo que adição de N fertilizante é mais prontamente disponível que N do resíduo.

Tabela 16 – Produtividade de milho e características de marcação isotópica, em função do aporte de resíduos de ervilhaca em 2003 e 2004.

N mineral aplicado (kg ha ⁻¹)	50% de resíduos					
	2003			2004		
	0	60	120	0	60	120
Produtividade (Mg ha ⁻¹)	7,27 b ⁴	8,18 ab	9,22 a	7,75 b	9,01ab	10,24 a
% N	1,14 b	1,25 ab	1,40 a	1,42 b	1,33 c	1,64 a
Nitrogênio (kg ha ⁻¹)	82,5 b	103,0 ab	129,0 a	109,8 b	119,6 b	167,7 a
% de atomicidade (¹⁵ N)	0,528 a	0,525 a	0,467 b	0,372 a	0,371 a	0,370 b
¹⁵ N em excesso (%)	0,1612 a	0,1591 a	0,1002 b	0,0055 a	0,0048 b	0,0035 c
% Ndf ¹	10,5 a	10,5 a	6,2 b	6,6 a	5,6 a	1,8 b
Ndf (kg ha ⁻¹)	8,7 ns	10,8	8,0	7,4 a	6,7 a	3,0 b
% N recuperado ²	11,7 ns	14,6	10,7	10,2 a	9,3 a	4,2 b
% N recuperado ³	21,2 ns	26,5	19,5	18,6 a	16,9 a	7,6 b
	100% de resíduos					
Produtividade (Mg ha ⁻¹)	7,94 ns	9,20	9,47	8,16 ns	8,95	8,83
% N	1,21 ab	1,12 a	1,41 a	1,45 ns	1,74	1,73
Nitrogênio (kg ha ⁻¹)	96,1 b	103,2 b	133,2 a	119,5 ns	155,4	152,9
% de atomicidade (¹⁵ N)	0,5548 b	0,6071 a	0,5095 c	0,3752 ns	0,3735	0,3734
¹⁵ N em excesso (%)	0,1885 b	0,2408 a	0,1432 c	0,0089 ns	0,0072	0,0071
% Ndf ¹	12,4 b	16,1 a	9,1 c	13,1 ns	10,2	8,7
Ndf (kg ha ⁻¹)	11,8 b	16,5 a	12,0 b	15,8 ns	16,2	13,3
% N recuperado	7,9 b	11,1 a	8,1 b	11,0 ns	11,2	9,2
% N recuperado ²	14,4 b	20,1 a	14,7 b	19,9 ns	20,3	16,7

¹ % Ndf = % de nitrogênio derivado dos resíduos.

² % de N recuperado, considerando liberação de 55% do N acumulado nos resíduos (Figure 2).

³ Valores seguidos pela mesma letra dentro do mesmo nível de resíduo e ano, não diferem significativamente (Duncan, $p < 0,05$)

Verifica-se também que a produtividade, a percentagem de N e total de N acumulado aumentaram com as doses de N-fertilizante, somente no tratamento com 50% dos resíduos

aplicados, em ambos os anos, e a percentagem de N e total de N acumulado em 2003 com 100% dos resíduos (Tabela 16). No entanto, as características de marcação isotópica como o percentual de atômica e o excesso de ^{15}N foram reduzidos à medida que se aumentaram as doses de N fertilizante. Com aplicação de 100% dos resíduos, essa tendência não foi observada e o nível de 60 kg ha^{-1} de N apresentou a maior recuperação em ambos os anos.

O incremento das doses de N-fertilizante aumentou a produtividade (Figura 21a), mas reduziu o N derivado dos resíduos (Figura 21b). Na prática, significa dizer que o uso de N fertilizante reduz a recuperação de N oriundo dos resíduos. Quanto maior for a quantidade de resíduos aportados ao solo, menor será a eficiência do N fertilizante. Neste sentido, de acordo com resultados de recuperação (Figura 20) e de produtividade (Figura 21a), podemos afirmar que a redução de 120 kg ha^{-1} de N para 60 kg ha^{-1} não causaria perdas significativas na produtividade e seria uma ótima estratégia econômica e ambiental em termos de utilização racional do N. Este resultado concorda com a atual recomendação de adubação nitrogenada no milho, que sugere redução da dose em sucessão a leguminosas (CQFS-RS/SC, 2004).

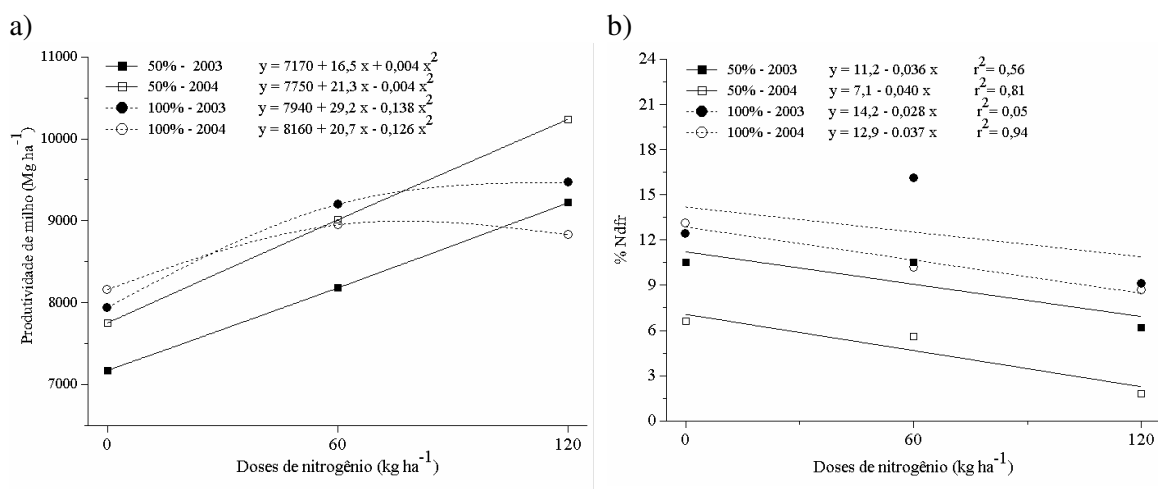


Figura 21 – Produtividade de grãos e % Ndf nos grãos com aumento da adubação mineral de N em 2003 e 2004.

Conclui-se, ainda, que os resultados positivos no aumento da produtividade de milho obtidos por sistemas de manejo, que utilizam a ervilhaca (ou qualquer outra leguminosa), possam não estar associados diretamente à quantidade de N fornecido, uma vez que grande parte do N absorvido pelo milho é obtido do solo (SCIVITTARO et al., 2003; FIGUEIREDO et al., 2005) e sim pelo fato de que os resíduos de ervilhaca promovem elevada disponibilidade de N no solo no início do desenvolvimento da cultura de milho, permitindo a esta cultura estabelecer condições fisiológicas para alcançar elevadas produtividades. Neste

sentido, sugere-se que na ausência de resíduos de leguminosas, o aumento das quantidades de N fertilizante na base e/ou antecipação do N na cultura do milho pode ser uma estratégia importante no aumento da produtividade de milho, devendo ser mais bem investigada nos próximos trabalhos.

8.5.5 Nitrogênio derivado dos resíduos – Segundo ano de recuperação

A Tabela 17 apresenta as características dos resíduos de ervilhaca cultivada nas microparcelas de milho marcada com resíduos em setembro de 2003. A média de MS de ervilhaca produzida nas microparcela foi de 5132 kg ha⁻¹, com conteúdo médio de N variando entre 2,8 a 3,6%, respectivamente para os aportes de 50 e 100% de resíduos. Consequentemente, onde se aportou 50% dos resíduos, foram acumulados 144 kg ha⁻¹ de N (\bar{x} = 81,3% Ndfa), enquanto que com aporte de 100% dos resíduos, o N acumulado médio foi de 183 kg ha⁻¹ de N (\bar{x} = 53,1% Ndfa).

Tabela 17 – Características isotópicas dos resíduos de ervilhaca coletado em setembro de 2004 nas antigas microparcelas de milho marcadas com resíduos em 2003.

Doses de N em cobertura	50% de resíduos			100% de resíduos		
	0	60	120	0	60	120
	kg N ha ⁻¹					
Resíduo marcado ²	2700 kg MS ha ⁻¹			5400 kg MS ha ⁻¹		
% N	3,11 ns ⁵	2,55	2,74	3,70 ns ⁵	3,69	3,32
Nitrogênio (kg ha ⁻¹)	159,6 ns	130,8	140,8	189,6 ns	189,2	170,3
% de atomicidade (¹⁵ N)	0,380 ns	0,377	0,377	0,404 ns	0,419	0,400
¹⁵ N em excesso (%)	0,014 ns	0,011	0,010	0,037 ns	0,052	0,034
¹⁵ N em excesso (%) em planta referência ³	0,444 ns	0,437	0,414	0,446 ns	0,473	0,443
% Ndf ³	0,92 ns	0,73	0,70	2,54 ns	3,58	2,29
Ndf ³ (kg ha ⁻¹)	1,47 ns	0,96	0,99	4,82 ns	6,77	3,90
% N recuperado ⁴	1,32 ns	0,86	0,89	2,16 ns	3,03	1,75
% N derivado a atmosfera	82,1 ns	84,4	77,4	53,0 ns	50,6	55,6

¹ Produção de material seca média em Setembro de 2004 foi de 5132 kg ha⁻¹.

² Resíduo adicionado no campo em Setembro de 2003.

³ Planta referência foi as primeiras plantas de milho amostradas logo após o manejo do resíduos.

⁴ % de N dos resíduos de ervilhaca adicionado no campo em Setembro de 2003.

⁵ ns = não significativo

As características de marcação dos resíduos (Tabela 17) e a produtividade de milho em 2004 nas antigas microparcelas (Tabela 18) seguiram o mesmo padrão constatado em 2003, com redução do percentual de atomicidade e do ¹⁵N em excesso quando aumentado às doses de N fertilizante no tratamento com aplicação de 50% dos resíduos. Também similar a 2003, quando 100% dos resíduos foram aportados, os maiores valores observados ocorreram com nível de 60 kg ha⁻¹ de N. A recuperação média de N no segundo ano variou entre 2 a 5% (3 a 7 kg de N ha⁻¹) (Tabela 18).

Tabela 18 – Produtividade de milho e características de marcação com 50 e 100% de resíduos nas antigas microparcelas de milho de 2003 em março de 2005.

	50% de resíduos			100% de resíduos		
	0	60	120	0	60	120
Produtividade (Mg ha ⁻¹)	8,64 ns ²	7,99	9,20	9,09 ns	9,22	9,50
% N	1,33 b ³	1,66 a	1,46 ab	1,40 ns	1,36	1,54
Nitrogênio (kg ha ⁻¹)	114,3 ns	132,9	133,7	128,3 ns	125,5	146,2
% de atomicidade (¹⁵ N)	0,423 a	0,410 b	0,397 c	0,435 ns	0,443	0,422
¹⁵ N em excesso (%)	0,056 a	0,044 b	0,031 c	0,068 ns	0,077	0,055
% Ndf ¹	3,70 a	2,88 b	1,95 c	4,52 ns	5,12	3,60
Ndf ¹ (kg ha ⁻¹)	4,25 a	3,76 a	2,54 b	5,82 ns	6,52	5,30
% N recuperado	3,80 a	3,37 a	2,27 c	2,61 ns	2,92	2,37

¹ % Ndf = % de N derivado dos resíduos.

² ns = não significativo.

³ Significativo a Duncan ($p < 0,05$).

8.6 Conclusões

1. Aproximadamente 70% do N acumulado na fitomassa da ervilhaca teve origem da fixação biológica de N.
2. A recuperação máxima de N-ervilhaca pelo milho foi de 26% no primeiro ano e não superior a 4% no segundo ano.
3. O uso de N-fertilizante reduziu a recuperação de N-ervilhaca, assim como quanto maior a quantidade de resíduo de ervilhaca aportado ao solo, menor foi a absorção de N fertilizante.
4. A ervilhaca apresentou efeitos positivos à absorção de N e à nutrição do milho, além do fornecimento de N.

8.7 Agradecimentos

Este estudo foi parcialmente suportado pelo Programa Alβan (Programa Europeu de Bolsas de Alto Nível para América Latina), bolsa nº: E04M043372BR.

9 CAPÍTULO V – AVALIAÇÃO DO POTENCIAL DE USO DE PARÂMETROS DE SOLO E PLANTA NA ADUBAÇÃO NITROGENADA À TAXA VARIÁVEL NO MILHO

9.1 Resumo

Uma das alternativas para aumentar a eficiência do uso do nitrogênio (N) na cultura do milho é sincronizar a quantidade a ser aplicada com a necessidade da planta considerando a existência da variabilidade espacial de solo e de plantas. Este trabalho teve como objetivo avaliar o potencial de uso de parâmetros de solo e plantas na adubação nitrogenada à taxa variável de milho. O experimento foi estabelecido em uma área de 7,2 hectares sob pivô de irrigação. Os tratamentos constaram de seis faixas de 20 m de largura e 600 m de comprimento. As alternativas de manejo da adubação nitrogenada avaliadas foram: 1ª) taxa variável em função do potencial produtivo do solo; 2ª) taxa variável em função do mapa de vigor obtido por imagens aéreas multiespectrais; 3ª) taxa variável a partir de leituras de clorofila com clorofilômetro manual; 4ª) taxa variável em função dos teores de matéria orgânica do solo; 5ª) taxa fixa - manejo tradicional e 6ª) sem aplicação de N em cobertura. A dose média de N (uréia) utilizada foi de 180 kg ha⁻¹ de N em todas as alternativas, variando de 120 a 240 kg ha⁻¹ de N, dentro de cada unidade de trabalho e parcelada em 2 aplicações em cobertura. Os parâmetros de plantas apresentaram melhor desempenho no diagnóstico da demanda de N pelo milho em relação aos parâmetros de solo. Os coeficientes de correlação entre a produtividade e os parâmetros avaliados foram em ordem decrescente: leituras de clorofila no florescimento (0,75), imagem multiespectral com 7 a 8 folhas (0,70), N acumulado no florescimento (0,56), leituras de clorofila com 12 folhas (0,48) e teores de matéria orgânica do solo (0,44). A adubação nitrogenada à taxa variável aumentou a eficiência de absorção de N, principalmente quando parâmetros de planta foram utilizados. Entretanto, as produtividades obtidas não diferiram estatisticamente do manejo à taxa fixa, provavelmente devido ao fato de que a quantidade de N aplicada no experimento foi superior à máxima eficiência técnica estimada (161 kg ha⁻¹ de N).

Palavras-chave: agricultura de precisão; clorofilômetro; nitrogênio; milho; taxa variável.

9.2 Abstract

EVALUATION OF THE POTENTIAL USE OF SOIL AND PLANT PARAMETERS IN THE NITROGEN FERTILIZER TO THE VARIABLE RATE IN THE MAIZE

One of the alternatives to increase the efficiency of the use of the nitrogen (N) in the maize culture is to synchronize the amount to be applied with the plants necessity considering the existence of the spatial variability of soil and plants. This work had as an objective to evaluate the use potential of soil and plants parameters in the nitrogen fertilizer variable rate in maize. The experiment was carried out in an area of 7.2 hectares under irrigation pivot. The treatments consisted in six strips of 20 m of width and 600 m of length. The alternatives of nitrogen fertilizer management were: 1st) variable rate in function of the soil productive potential; 2nd) variable rate in function of the vigor map obtained by aerial multispectral images; 3rd) variable rate from chlorophyll readings with manual chlorophyllometer; 4th) variable rate in function of the organic soil matter tenors; 5th) fix rate – traditional management and 6th) without nitrogen application in covering. The nitrogen level average used was 180 kg N ha⁻¹ (urea) in all the alternatives, varying between 120 to 240 kg N ha⁻¹ inside each work unit and divided in 2 applications in covering. The plant parameters presented better performance in the diagnosis of the demand of N for the maize in relation to the soil parameters. The correlation coefficients between the productivity and the parameters evaluated were in decreasing order: chlorophyll readings in the flower stage (0.75), multispectral image with 7 to 8 leaves (0.70), N accumulated in the flower stage (0.56), chlorophyll readings with 12 leaves (0.48) and soil organic matter tenors (0.44). The nitrogen fertilizer variable rate increased the efficiency of N absorption, mainly when plant parameters were used. However, the productivity obtained did not differ significantly in relation to the fix rate, probably due to the fact that the amount of N applied in the experiment was superior to the maximum technical efficiency (161 kg N ha⁻¹).

Key-words: precision farming; chlorophyll meter; nitrogen; maize; variable rate technology.

9.3 Introdução

A adubação nitrogenada tem sido uma das principais estratégias responsáveis pelo incremento da produtividade e da produção na cultura do milho, contribuindo para atender a demanda de alimentos induzida pelo aumento da população mundial (MOSIER et al., 2004). Entretanto, atualmente tem recebido mais atenção por causa do aumento dos custos de fertilizantes, maior preocupação ambiental e demanda pelo uso racional dos insumos na agricultura (SCHMIDT et al., 2002). A eficiência mundial estimada de uso do nitrogênio em cereais é baixa, estimada em 33%. Considerando os 67% de N que não são aproveitados, tem-se uma perda anual de 15,9 bilhões de dólares em fertilização nitrogenada (RAUN; JOHNSON, 1999), além dos prováveis impactos negativos ao meio ambiente. Uma das alternativas para aumentar essa eficiência seria sincronizar a aplicação de N com a demanda da cultura (RAMBO et al., 2007).

O manejo localizado da fertilização ou sítio específico é um dos principais componentes da Agricultura de Precisão (AP). Esta prática tem contribuído para o aprimoramento do manejo do solo em diversos sistemas de produção em países com agricultura desenvolvida (KOCH; KHOSLA, 2004). A técnica de aplicação de fertilizante à taxa variável, com o objetivo de aumentar a eficiência no uso de fertilizantes, tem se mostrado especialmente vantajosa na fertilização nitrogenada, proporcionando tanto incrementos na produtividade de grãos, como rentabilidade nas culturas de trigo, milho e cevada (PRADO; KANG, 1998; CAMBOURIS et al., 1999; THRIKAWALA et al., 1999; KHOSLA et al., 2002). Entretanto, a eficiência da taxa variável de N depende da identificação de regiões na lavoura, onde o incremento da dose de N poderia aumentar a produtividade e, ao mesmo tempo, a identificação de regiões, em que a redução de N fertilizante não resultaria em decréscimo da produtividade, devido ao menor potencial produtivo do solo, aumentando a eficiência do uso de N (SNYDER et al., 1999).

Segundo Pontelli (2006), estudando a correlação entre a produtividade e os atributos químicos do solo a partir de dois mapas de colheita sucessivos da mesma área, o teor matéria orgânica (MOS), isoladamente, foi o atributo que apresentou a maior correlação com a produtividade de milho. A adubação nitrogenada à taxa fixa pressupõe que existe uma uniformidade no teor de MOS e, conseqüentemente, da disponibilidade de N na lavoura. Entretanto, em áreas de AP no Sul do Brasil, tem se observado significativa variabilidade na produtividade de milho através de mapas de rendimento, atribuindo-se, em parte, à variabilidade espacial do teor de MOS, que estaria associada à disponibilidade de N

(LEMAINSKI, 2007). A distribuição espacial da MOS e a determinação de regiões de maior potencial produtivo nas lavouras poderiam fornecer subsídios importantes na tomada de decisão para aumentar a eficiência técnica e econômica da adubação nitrogenada.

Outra possibilidade seria realizar avaliações da demanda de N através de parâmetros de plantas, podendo ser considerada em tempo real, com a vantagem de ponderar as condições climáticas que determinam a mineralização da MOS, permitindo avaliar a relação entre demanda e a disponibilidade de N “in loco”. Esta pode ser diagnosticada em tempo real pela mensuração da reflectância das folhas de milho através de imagens aéreas multiespectrais (BLACKMER; SCHEPERS, 1994; SHANAHAN et al., 2001; CHANG et al., 2003; MA et al., 2005) ou de medidas indiretas do teor de clorofila (BLACKMER; SCHEPERS, 1994; ARGENTA; SILVA, 2003; RAMBO et al., 2007).

Em estudos de AP conduzidos na cultura do trigo na Inglaterra, constatou-se que a adubação nitrogenada foi a que apresentou maior retorno econômico, quando manejada sob taxa variável (GODWIN et al., 2002) e, segundo Rambo et al. (2008), a inclusão de parâmetros de planta e de solo, além do teor de MOS, para a predição de doses de N para a cultura do milho, poderia aumentar a precisão, incrementando a eficiência de uso de N, com menor custo de produção e maior proteção ambiental.

Neste contexto, este trabalho teve como objetivo avaliar o uso de atributos de solo e plantas na aplicação de N à taxa variável, buscando práticas mais eficientes de manejar o N aplicado em cobertura na cultura do milho.

9.4 Material e Métodos

O experimento foi desenvolvido durante a safra 2006/07 em uma área de 7,2 hectares de um pivô de irrigação de 48 hectares, localizada no município de Santo Augusto, Rio Grande do Sul, Brasil. Conforme a EMBRAPA (2006), o solo da região é classificado como LATOSSOLO VERMELHO Distrófico típico (LVd3). O sistema de manejo adotado é o plantio direto, há aproximadamente 15 anos, com cultivo de cereais e culturas de cobertura no inverno e culturas de soja e milho no verão. O clima da região é do tipo “Cfa2” (subtropical úmido), de acordo com a classificação climática de Köppen, com precipitações anuais oscilando de 1625 mm, e temperatura média anual de 19,2 °C, variando entre 9,3 °C e 30,4 °C. As características químicas na camada de 0 a 10 cm no início do experimento eram: MOS = 3,5%; pH = 5,5; P disponível (Mehlich I) = 25 mg dm⁻³; CTC = 12,0 cmol_c dm⁻³; argila = 550 g kg⁻¹ e cátions trocáveis (cmol_c dm⁻³) K = 0,6; Ca = 6,0; Mg = 3,0 e Al = 0,2.

Inicialmente foram realizadas amostragens de solo georeferenciadas com malha de uma amostra por hectare para avaliar a distribuição espacial da MOS dentro do pivô. Procurou-se estabelecer o sentido ideal de semeadura para que se obtivesse a maior variabilidade possível de MOS, considerada atualmente o principal indicador da disponibilidade de N (CQFS-RS/SC, 2004). Estabelecido o sentido de semeadura ideal para a realização do trabalho, procedeu-se a semeadura do híbrido de milho 2A120 (Dow Agrosience) com uma semeadora Sfil de 10 linhas, utilizando sulcador, e com uma distribuição de 75.000 sementes por hectare. Adubação de base foi realizada com 200 kg ha⁻¹ de DAP (45% P₂O₅ e 16% N) em todo o experimento, sendo realizada posteriormente uma cobertura de 100 kg ha⁻¹ de KCl (60% K₂O). Assim, todas as alternativas de manejo de N tiveram um aporte inicial de 32 kg ha⁻¹ de N, inclusive a referência sem N em cobertura. A dose de N média utilizada foi de 180 kg ha⁻¹ de N em todos os tratamentos, variável apenas dentro de cada alternativa de manejo e parceladas em duas aplicações em cobertura (4 folhas e 8 folhas completamente expandidas). Ver apêndice 25.

O experimento foi composto por 6 faixas de 20 m de largura e 600 m de comprimento, dividido em intervalos de 50 m, constituindo 12 unidades de trabalho de 1000 m² dentro de cada faixa. Cada faixa teve 40 linhas milho com espaçamento de 50 cm, sendo que a área útil correspondeu a 30 linhas centrais (Figura 22). As demais linhas foram utilizadas como bordadura. As alternativas de manejo da adubação nitrogenada estabelecida foram: 1^a) taxa variável em função da capacidade produtiva do solo (TVCP); 2^a) taxa variável em função de imagens aéreas multiespectrais (TVIM); 3^a) taxa variável em função de leituras de clorofila (TVCL); 4^a) taxa variável em função do teor MOS (TVMO) e 5^a) taxa fixa de N – manejo tradicional (TF); 6^a) sem aplicação de N em cobertura (SNC).

Os parâmetros médios encontrados dentro das 12 unidades de trabalho de cada estratégia de manejo de N foram classificadas segundo critérios da Tabela 19. A partir desta classificação, organizaram-se as quantidades de N a serem aplicadas em cada unidade de trabalho ao longo das faixas, de modo que a quantidade de N total aplicada dentro de cada faixa fosse rigorosamente igual. A fonte de N fertilizante foi uréia aplicada a lanço através do aplicador AMAZONE operado manualmente, sendo que a cada unidade de trabalho a dose de uréia aplicada poderia variar em função dos parâmetros pré-estabelecidos de cada alternativa de manejo.

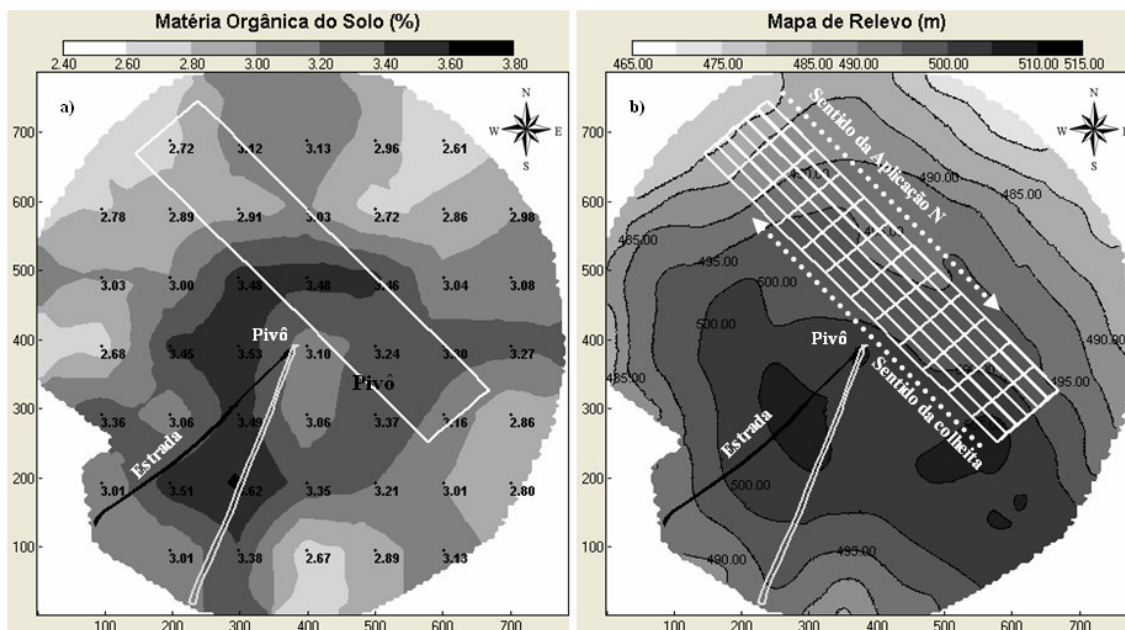


Figura 22 – Localização do experimento sobre o mapa de matéria orgânica do solo (a) e sobre mapa de relevo (b) dentro do pivô de irrigação.

Para as alternativas de adubação à taxa variável, foram estabelecidos três níveis de aplicação (abaixo da média, média, acima da média), em função dos parâmetros médios específicos de cada alternativa de manejo encontrada nas unidades de trabalho (Tabela 19). As alternativas de manejo em função da MOS e do potencial produtivo do solo foram estabelecidas com antecedência e tiveram a mesma quantidade aplicada entre a 1ª e a 2ª cobertura de N. A taxa variável em função da MOS foi estabelecida a partir de teores médios de carbono orgânico de cada unidade de trabalho, obtidos através de uma amostra composta por cinco subamostras de solo da camada 0 a 10 cm que, após coletadas, foram secas, moídas e analisadas, segundo metodologia descrita por Tedesco et al. (1995). A taxa variável em função da capacidade produtiva do solo foi estabelecida a partir de dados de produtividade do mapa de colheita da safra de soja 2005/06, realizado em 23/04/2006 com auxílio de uma colhedora Massey Ferguson MF38 equipada com sensor de rendimento (SISTEMA FIELDSTAR®). Cada média foi composta por 10 leituras de produtividade dentro de cada unidade de trabalho.

Os teores de clorofila foram avaliados através do medidor portátil Minolta SPAD-502 (clorofilômetro) dois dias antes da aplicação de N (1ª e 2ª cobertura de N) para estabelecimento da distribuição do fertilizante nitrogenado ao longo do tratamento correspondente. Em cada unidade de trabalho, foram avaliadas 15 plantas aleatoriamente, com três repetições de leitura no terço superior das folhas em dois momentos de desenvolvimento

da cultura de milho: 3ª e 7ª folhas totalmente expandidas. A mesma metodologia foi utilizada para avaliação dos teores de clorofila em 12 folhas de milho e na folha oposta à espiga na fase do florescimento.

Tabela 19 – Classificação dos parâmetros de aplicação de nitrogênio em relação às médias encontrada no experimento.

Níveis de aplicação	Matéria orgânica do solo	Potencial produtivo ¹ kg ha ⁻¹	Leituras do clorofilômetro		Índice NDVI		N aplicado kg N ha ⁻¹
			4ª folha	7ª folha	4ª folha	7ª folha	
abaixo M	< 3.6%	> 3120	< 42.0	< 57.1	< -0.44	< 0.44	240
Média	3.6 a 4.0%	2880 a 3120	42 a 43.2	57.1 a 58.0	-.0.44 a -0.38	0.44 a 0.49	180
acima M	> 4.0%	< 2880	> 43.2	> 58.0	> -0.38	> 0.49	120

¹ Quanto maior o potencial produtivo do solo maior foi a quantidade de nitrogênio aplicada.

A obtenção das imagens multiespectrais para determinação de índices de vegetação foi realizada através de uma câmera digital multiespectral acoplada a uma aeronave que sobrevoou a área experimental três dias antes das aplicações de N. As imagens geradas tiveram resolução espacial de 0,25 m² com bandas espectrais do vermelho e do infravermelho próximo. A taxa variável em função de imagens multiespectrais foi realizada através de duas fotos aéreas que mediram o índice de reflectância das plantas, conhecido como índice NDVI (Normalized Derivation Vegetation Index ou índice de vegetação por diferença normalizada). Este índice tem relação direta com a quantidade de clorofila e com a absorção de energia das plantas (MYNENI et al., 1995). As unidades de trabalho georeferenciadas referentes a esta alternativa de manejo foram localizadas dentro das imagens multiespectrais, obtendo-se o índice médio de NDVI para cada unidade de trabalho, com as quais se definiu as unidades que receberiam mais ou menos N. Esta etapa foi realizada com o suporte da empresa VECTIS e do Departamento de Engenharia Rural da UFSM.

A eficiência de absorção de N foi obtida na fase de florescimento pleno, através de amostragens dentro de cada unidade de trabalho (16/12/2006). Foram coletadas cinco plantas de milho, aleatoriamente, secas a 65° C, pesadas e moídas, com posterior análise dos teores de N contido em seus tecidos (TEDESCO et al., 1995).

O N mineral do solo também foi avaliado como parâmetro de solo através de amostragens periódicas durante o desenvolvimento do experimento. Foram realizadas amostragens na camada de 0 a 10 cm de profundidade 10 dias antes e 15 dias após a semeadura, além de imediatamente antes de cada fertilização de cobertura de N. Cada amostra foi composta por cinco subamostras dentro de cada unidade de trabalho. As amostras foram conservadas em caixa de isopor e posteriormente congeladas até as análises em laboratório, segundo metodologia descrita por Tedesco et al. (1995).

As avaliações finais do experimento consistiram na produtividade dentro de cada unidade de trabalho e na produção total de cada alternativa de manejo. Obtendo-se a produtividade total de cada alternativa de manejo, bem como o resultado decomposto em cada unidade de trabalho, com média de três repetições. Estatisticamente, foi utilizada a análise da variância, testes entre médias ($p < 0,05$) e coeficientes de correlação de Pearson analisados através do software PlotIT 3.2 (SCIENTIFIC PROGRAMMING ENTERPRISES, Haslsett, 1997).

9.5 Resultados e Discussão

As taxas variáveis de N, independente do parâmetro utilizado, promoveram incremento na produção de MS em relação à taxa fixa de N. Já a concentração de N não apresentou diferença entre as alternativas de fertilização nitrogenada, diferindo somente do tratamento sem adubação em cobertura. A quantidade de N absorvido pelo milho foi maior nos tratamentos TVCL e TVMO em relação a TVCP, TF, SNC. A eficiência de absorção de N variou de 58% na alternativa tradicional de aplicação à taxa fixa até 114% na alternativa de adubação à taxa variável, em função das leituras de clorofila (Tabela 20). Eficiência superior a 100% também foi observada por Mai et al. (2003), quando 35 kg ha⁻¹ de N, que seriam aplicados em cobertura no milho, foram aplicados em pré-semeadura, havendo um acréscimo de 8% na eficiência do manejo de N, embora isso tenha acontecido quando houve complementação de N em cobertura. Araújo et al. (2004), estudando o efeito de sistema de rotação soja/milho, não observaram efeito sobre a produtividade, mas a rotação proporcionou maior N acumulado (mais de 160 kg ha⁻¹ de N) e até 15 Mg ha⁻¹ de MS. A maior eficiência média de absorção de N em função das aplicações à taxa variável foi também observada ao longo das faixas na maioria das alternativas, exceto para a alternativa à taxa variável em função capacidade produtiva do solo (Figura 23).

Tabela 20 – Matéria seca, teor de N, N acumulado até florescimento, eficiência de absorção de N, produtividade média e conversão de kg de N em kg de milho produzido nas diferentes alternativas de manejo da adubação nitrogenada.

Alternativas de manejo ⁽¹⁾	Matéria Seca Mg ha ⁻¹	Teor de N %	N acumulado kg ha ⁻¹	Eficiência de absorção de N ¹ %	Produtividade média kg ha ⁻¹	Conversão de kg de N em kg de milho
TVCP	17,9 bc ²	1,40 a	251,4 c	70	11507 b	7,6
TVIM	19,4 ab	1,42 a	275,9 bc	84	11487 b	7,5
TVCL	21,6 a	1,48 a	320,9 a	114	12226 a	12,7
TVMO	21,2 a	1,44 a	305,8 ab	104	11562 b	8,2
TF	16,2 cd	1,47 a	235,9 c	58	12003 ab	10,3
SNC	14,7 d	1,02 b	148,0 d	-	10463 c	-
Média	18,5	1,37	257,5	72	11541	9,3
CV %	15,8	9,1	20,1	-	2,85	-

⁽¹⁾TVCP: taxa variável em função da capacidade produtiva; TVIM: taxa variável em função da imagens aéreas multiespectrais; TF: taxa fixa - manejo tradicional; TVCL: taxa variável em função das leituras de clorofila; SNC: sem aplicação de nitrogênio em cobertura e TVMO: taxa variável em função do teor matéria orgânica do solo.

⁽²⁾ Médias seguidas pela mesma letra, na coluna, não diferem entre si pelo teste de Duncan ($p < 0,05$).

⁽³⁾ Eficiência de absorção de N = $\frac{N \text{ absorvido} - N \text{ absorvido SNC}}{N \text{ aplicado em cobertura}}$

⁽⁴⁾ Conversão de kg N em kg de milho = $\frac{\text{Produtividade} - \text{Produtividade sem N}}{N \text{ aplicado em cobertura}}$

Apesar da maior eficiência de absorção de N apresentado pelas alternativas com a taxa variável, não houve diferenças significativas na produtividade média de grãos (Tabela 20). Esse resultado corrobora com Araújo et al. (2004) que, estudando o efeito de doses de N na cultura do milho, obteve a quantidade máxima de N no grão com a dose de 120 kg ha⁻¹, enquanto que o maior acúmulo de N na matéria seca ocorreu com 240 kg ha⁻¹, indicando uma tendência ao consumo de luxo de N pelas plantas de milho, conforme também relatado por Uhart; Andrade (1995). Rambo (2004), fazendo uma referência à citação de Binford (1992) e Blackmer; Schepers (1994), comenta que, geralmente, o teor de N na folha não só é capaz de detectar deficiências, mas também de demonstrar o consumo de luxo, em que o teor de N continua aumentando, e a produtividade de grãos fica estável com doses altas deste nutriente. Os autores sustentam ainda que o consumo de luxo diminui a sensibilidade de parâmetros de planta próximo à obtenção da produtividade máxima, dificultando a obtenção de níveis críticos.

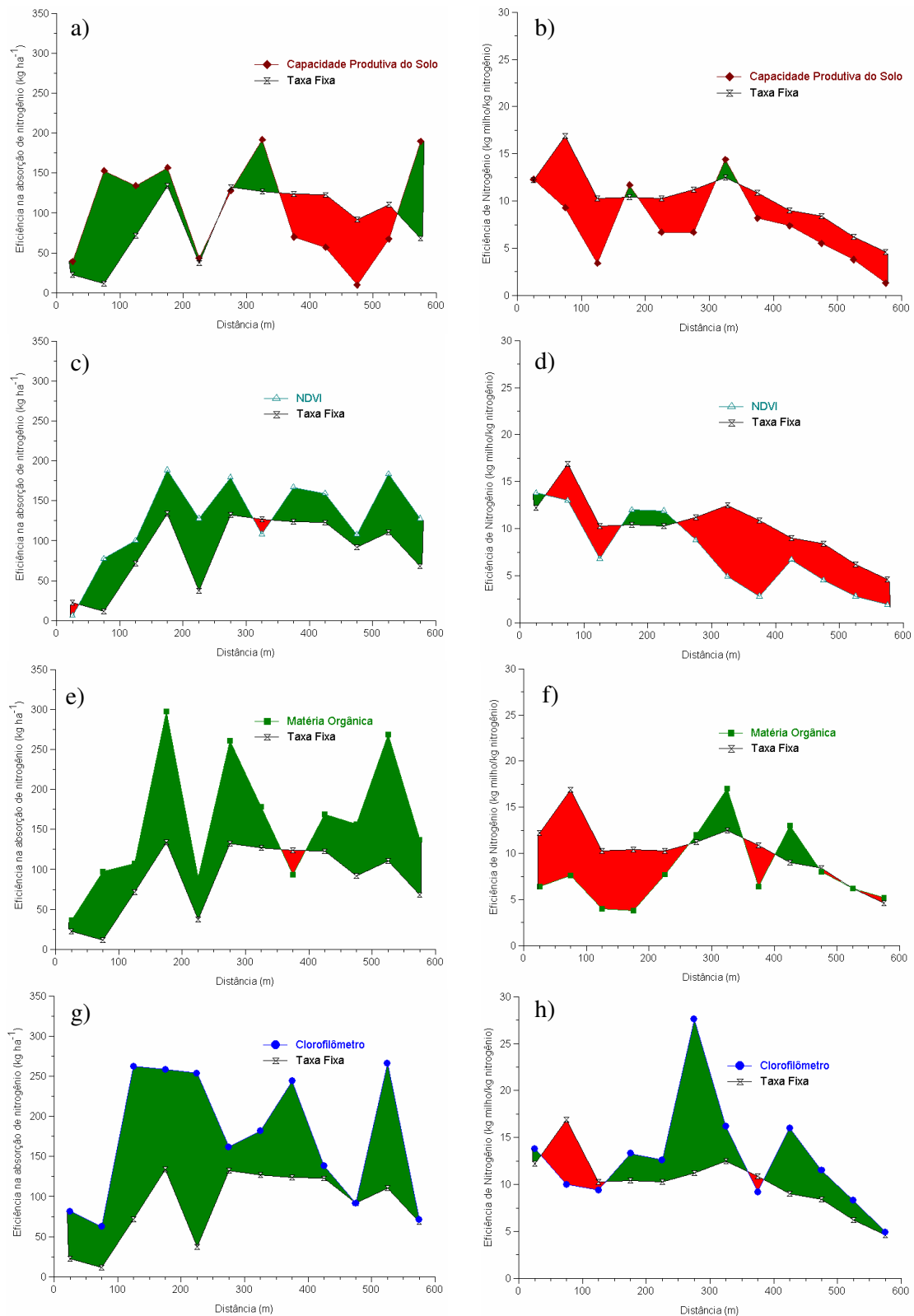


Figura 23 – Eficiência das alternativas de adubação nitrogenada na absorção de N e na produtividade de grãos em relação ao manejo tradicional com taxa fixa de N ao longo de 600 metros.

A eficiência da taxa fixa de 58% foi bem superior à média mundial de 33% (RAUN;

JOHNSON, 1999). No entanto, há de se considerar que as condições do experimento eram otimizadas, com irrigação e solo com elevado nível de fertilidade, fatores que devem ter favorecido eficiência de N. A produtividade média de 11541 kg ha⁻¹ está acima da média do RS (INDICAÇÕES..., 2006). Este fato está associado ao excelente nível de manejo utilizado na área que, segundo informações do produtor, tem obtido, em safras anteriores, produtividades superiores a 10 Mg ha⁻¹ (VAN ASS, comunicação pessoal, 2006). Informação coerente com o tratamento sem N em cobertura, em que a produtividade alcançou 10463 kg ha⁻¹, com acúmulo de N de, aproximadamente, 150 kg ha⁻¹, indicando que, havendo disponibilidade de água, há um aproveitamento elevado do N do solo e dos resíduos da cultura de cobertura antecessora (consórcio de aveia, nabo e ervilhaca).

Destaca-se ainda a maior produtividade obtida na alternativa em função das leituras de clorofila com uma produção média de 12226 ka ha⁻¹ de grãos de milho. Entretanto, essa quantidade não diferiu do manejo tradicional de N à taxa fixa de 12003 kg ha⁻¹, sendo este superior às demais alternativas avaliadas. Quanto à eficiência do N aplicado na conversão de grãos de todas as alternativas à taxa variável em relação ao manejo à taxa fixa, ao longo da faixa de 600 m, destacou-se apenas a alternativa em função das leituras de clorofila, sendo as demais alternativas com desempenho inferiores ao manejo tradicional à taxa fixa (Figura 23). Balasubramanian (1999) e Singh (2002) observaram a maior eficiência da adubação nitrogenada em sistemas monitorados com o clorofilômetro, usando níveis críticos em relação a sistemas em que foram aplicadas doses pré-determinadas de N. Segundo Peng et al. (1996), isto se deve, principalmente, à maior sincronia entre a época de aplicação de N e à sua demanda pela planta.

Os resultados de correlação obtidos no trabalho demonstraram que os parâmetros de plantas (Tabela 21) apresentaram melhor desempenho no diagnóstico da demanda de N pelo milho em relação aos parâmetros de solo (Tabela 22). Isso pode ser observado pelos coeficientes de correlação com a produtividade de grãos, onde se destaca as leituras de clorofila no florescimento de milho (0,75), as imagens aéreas multiespectrais com 7 a 8 folhas (0,70), o N acumulado até o florescimento (0,56), as leituras de clorofila com 12 folhas de milho (0,48) e somente, depois, o teor de MOS (0,44) como parâmetro de solo, seguido dos demais parâmetros avaliados. Embora a leitura de clorofila com 3 a 4 folhas tem tido relação significativa com a produtividade de grãos e com N acumulado, esta relação dobrou quando a leitura foi feita com 12 folhas e ainda foi maior no florescimento (folha oposta). Este resultado concorda com o anteriormente encontrado por Argenta et al. (2003) e conclui-se que, em nível de campo, as opções práticas promissoras foram NDVI com 7 a 8 folhas e

clorofilômetro com 12 folhas.

Tabela 21 – Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre os parâmetros de planta avaliados: leituras do teor de clorofila, NDVI, N acumulado no florescimento e produtividade, considerando os dados amostrais das 12 unidades de trabalho dentro das 6 alternativas de manejo de N.

Parâmetros de planta	1	2	3	4	5	6	7
1 Leituras de clorofila (3 a 4 folhas)	1						
2 Leituras de clorofila (7 a 8 folhas)	0,33 *	1					
3 Leituras de clorofila (12 folhas)	0,25 **	0,30 **	1				
4 Leituras de clorofila (Flores./F. oposta)	0,32 *	0,01 ^{ns}	0,56 *	1			
5 NDVI ¹ (3 a 4 folhas)	0,37 ^{ns}	0,52 ^{ns}	0,03 ^{ns}	0,00 ^{ns}	1		
6 NDVI (7 a 8 folhas)	0,25 ^{ns}	0,31 ^{ns}	-0,19 ^{ns}	0,47 ^{ns}	0,36 ^{ns}	1	
7 N acumulado no florescimento	0,25 **	0,14 ^{ns}	0,32 *	0,54 *	0,04 ^{ns}	-0,29 ^{ns}	1
8 Produtividade de grãos de milho	0,24 **	-0,03 ^{ns}	0,48 *	0,75 *	0,20 ^{ns}	0,70 **	0,56 *

¹NDVI = índice vegetativo adquirido por imagens infravermelhas aéreas.

^{ns} = não significativo; *, ** = significativo a 1% e 5%, respectivamente.

Apesar de alguns autores sugerirem a avaliação do N mineral do solo como um possível indicador da necessidade de N ao milho (GARCIA, 2005; KLAPWYK; KETTERINGS, 2006), as correlações apresentadas na Tabela 22 entre este parâmetro e a produtividade, em várias épocas de amostragem, foram muito baixas (<30%) e pouco significativas. Este fato deve estar relacionado às múltiplas reações e destino que o N no solo pode tomar, desde imobilização, lixiviação, absorção e volatilização, conferindo-lhe elevada variabilidade temporal (RAUN; JOHNSON, 1999; PURCINO et al., 2000; RAMBO et al., 2004).

Tabela 22 – Coeficientes de correlação de Pearson (r) entre diferentes parâmetros de solo: N mineral em diferentes épocas de amostragem, matéria orgânica do solo, capacidade produtiva do solo e produtividade, considerando os dados amostrais das 12 unidades de trabalho dentro das 6 alternativas de manejo de N.

Parâmetros de solo	1	2	3	4	5	6	7	8
1 N mineral ¹ (plantio)	1							
2 N mineral (3 a 4 folhas)	0,34 *	1						
3 N mineral (7 a 8 folhas)	0,14 ^{ns}	0,06 ^{ns}	1					
4 N mineral (12 folhas)	0,23 ^{ns}	0,12 ^{ns}	0,32 *	1				
5 N mineral (florescimento)	0,17 ^{ns}	0,30 *	0,20 ^{ns}	0,20 ^{ns}	1			
6 MOS ² (0 a 10 cm)	0,60 ^{ns}	0,23 ^{ns}	-0,12 ^{ns}	-0,04 ^{ns}	0,02 ^{ns}	1		
7 MOS (10 a 20 cm)	-0,02 ^{ns}	0,05 ^{ns}	-0,36 *	-0,24 **	-0,02 ^{ns}	0,73 *	1	
8 Capacidade produtiva do solo	-0,17 ^{ns}	-0,48 ^{ns}	0,60 **	0,37 ^{ns}	0,24 ^{ns}	-0,08 ^{ns}	-0,12 ^{ns}	1
9 Produtividade de grãos de milho	-0,09 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,22 ^{ns}	0,28 **	0,08 ^{ns}	0,44 *	0,26 **	0,40 ^{ns}

¹N mineral (N-NO₃⁻ + N-NH₄⁺) do solo na camada de 0 a 10 cm.

²MOS – Matéria Orgânica do Solo.

^{ns} = não significativo; *, ** = significativo a 1% e 5%, respectivamente.

A Máxima Eficiência Técnica (MET) média foi de 161 kg ha⁻¹ de N, sendo inferior à dose aplicada no experimento (180 kg ha⁻¹ de N), ou seja, a quantidade aplicada média associada ao uso do consórcio com ervilhaca no inverno e ao fornecimento de N da MOS maximizou os tetos de produtividade, não havendo diferenças na produção de grãos entre as alternativas avaliadas, mesmo havendo diferenças no aumento da absorção de N, MS e eficiência de uso do N (Tabela 20). A dose de 180 kg ha⁻¹ de N estaria dentro da faixa citada por Coelho; França (1995), que recomendam o uso de 100 a 200 kg ha⁻¹ para a cultura de milho irrigada e também de acordo com a CQFS-RS/SC (2004) para produtividades superiores a 9 Mg ha⁻¹ de grãos. Outro fator relevante foi o teto de produtividade de 10463 kg ha⁻¹ de grãos de milho alcançado sem adubação nitrogenada de cobertura (Tabela 20). Produtividades elevadas sem adubação nitrogenada também foram reportadas por Araújo et al. (2004), que alegou elevados teores de MOS, principalmente associados à irrigação que, segundo Sanchez (1976), tende a proporcionar umidade suficiente para promover a decomposição da MOS e a liberação de maiores quantidades de N. Resultados semelhantes também foram observados em experimento conduzido por Escosteguy et al. (1997). Ainda, segundo Araújo et al. (2004), a contribuição de N do solo, com a suplementação hídrica, pode ter influenciado a resposta dos tratamentos, possibilitando alta produtividade da testemunha em relação às demais alternativas de manejo avaliadas.

9.6 Conclusões

1. As alternativas de manejo da adubação nitrogenada à taxa variável aumentaram a eficiência de absorção de N. Entretanto, a maior absorção de N não refletiu no aumento da produtividade de grãos, podendo ser considerado um consumo de luxo, provavelmente em função das condições de elevada disponibilidade de água e N do experimento.
2. Os parâmetros de plantas apresentaram o melhor desempenho no diagnóstico da demanda de N pelo milho em relação a parâmetros de solo.
3. Apesar da importância de elevado teor de N mineral no solo para altas produtividades de milho, este parâmetro apresentou baixa relação com a produtividade, provavelmente em função do grande variabilidade espacial e temporal que apresenta no solo.

9.7 Agradecimentos

Agradecemos, em especial, à colaboração das Sementes Van Ass de Panambi/RS, que gentilmente disponibilizou a área de estudo, os equipamentos e recursos humanos durante o desenvolvimento do trabalho, bem como a Empresa Vectis pelo fornecimento das imagens aéreas multiespectrais.

10 CONSIDERAÇÕES FINAIS

10.1 Principais contribuições

Os capítulos apresentados foram realizados no decorrer dos cursos de Mestrado e Doutorado em Ciência do Solo, o que possibilitou uma maior abrangência de considerações sobre o manejo da adubação nitrogenada na cultura do milho. A partir do objetivo principal, os experimentos foram planejados para compreender melhor a dinâmica do N no sistema solo-resíduo-planta-atmosfera e avaliar o uso de novas práticas de manejo da adubação nitrogenada, buscando sempre informações que pudessem contribuir para o aumento da eficiência do N na cultura do milho. Sendo assim, os diferentes estudos realizados, apesar de possuírem objetivos específicos distintos, foram complementares.

O planejamento, a execução e o desenvolvimento dos trabalhos desta Tese permitiram, além da obtenção de resultados confirmatórios já reportados por outras pesquisas, também a obtenção de novos resultados. Estes levaram à elaboração de conclusões sobre possibilidades de manejo ainda pouco exploradas, que, sem dúvida, deverão ser investigadas por novas pesquisas. Além disso, mesmo que parcialmente comprovadas, tais resultados poderão melhorar significativamente a eficiência de uso do N e, seguramente, aumentar a produtividade de milho.

Algumas conclusões foram realizadas diretamente sobre os resultados alcançados e outras foram obtidas de forma indireta, a partir de reflexões sobre os desdobramentos dos trabalhos e observações particulares, tanto a nível de campo, como das revisões de literatura. Sem dúvida, o desenvolvimento desta Tese teve suas dificuldades, destacando-se o desafio de obter informações novas de um tema tão estudado como é a adubação nitrogenada no milho. No entanto, visto o atual cenário agrícola e tecnológico, com a crescente demanda por informações “novas” sobre conhecimentos antigos, analisados de uma forma diferente e fortemente alicerçada em recursos computacionais, esta dificuldade tornou-se uma aparente vantagem.

A partir de uma avaliação geral, concluiu-se que o potencial de acúmulo de N está associado às características interespecies de cada cultura de cobertura e que a taxa de decomposição está diretamente associada à relação C/N dos resíduos, podendo ser considerado um resultado confirmatório (Capítulo I). Entretanto, uma informação adicional que se pode acrescentar é que a taxa de decomposição, independente do tipo de resíduos, foi

semelhante. Contudo, as diferentes velocidades de decomposição foram associadas ao tamanho dos compartimentos decomponíveis (lábel e recalcitrante) de cada tipo de resíduo. Outro resultado é que as quantidades de resíduos adicionadas ao solo não influenciaram significativamente as taxas de decomposição, mas intensificaram os processos mineralização e imobilização de N (Capítulo I), indicando que os microorganismos, responsáveis pela decomposição, aumentam sua atividade com o aporte de resíduos, mantendo a taxa de decomposição praticamente constante, mas intensificando variavelmente seus efeitos sobre o N, sejam eles positivos (mineralização) ou negativos (imobilização).

O aporte e a dinâmica de decomposição dos resíduos influenciaram diretamente a disponibilidade de N mineral no solo, quando comparado ao não aporte de resíduos (Capítulo II). Os resíduos de ervilhaca liberam até 50% da quantidade acumulada de N nos primeiros 30 dias após o manejo (Capítulo I), promovendo elevada disponibilidade de N ao solo durante a fase inicial de desenvolvimento do milho (Capítulo II). Ao contrário do que ocorreu com os resíduos de aveia preta, que apresentaram lenta decomposição, imobilizando temporariamente parte do N do solo e o liberando, 2 a 3 meses após seu manejo (Capítulo I e II). Parte das oscilações do conteúdo de N no solo também foram associadas às condições climáticas diferenciadas nos dois anos que se realizou o experimento (Capítulo II). Assim, pode-se concluir que a disponibilidade de N mineral no solo é uma resultante de múltiplas interações entre a MOS, o aporte de resíduo, o crescimento microbiano, a absorção pelas plantas e fontes externas de N, condicionada pelas condições climáticas ao longo do ciclo do milho.

O resultado da dinâmica de disponibilidade de N no solo (oscilações) em função do aporte de resíduos ficou evidente no acúmulo de N pelo milho e pela transformação deste acúmulo em produtividade (Capítulo III). Entretanto, o maior aporte de resíduos ao solo, mesmo sendo um dos principais fatores investigados nesta Tese, não foi um fator significativo na taxa de decomposição dos resíduos (Capítulo I), nem na disponibilidade de N mineral (Capítulo II) e nem mesmo na absorção e produtividade de milho (Capítulo III). Considerando a magnitude dos níveis de resíduos avaliados (até 9 Mg ha⁻¹ de MS) não é de se esperar que em condições de lavoura comercial, com amplitudes de produção de MS inferiores, haja significância em se considerar, mesmo de forma complementar, a quantidade de resíduo na recomendação das doses de N, como atualmente é sugerido pela CQFS-RS/SC (2004).

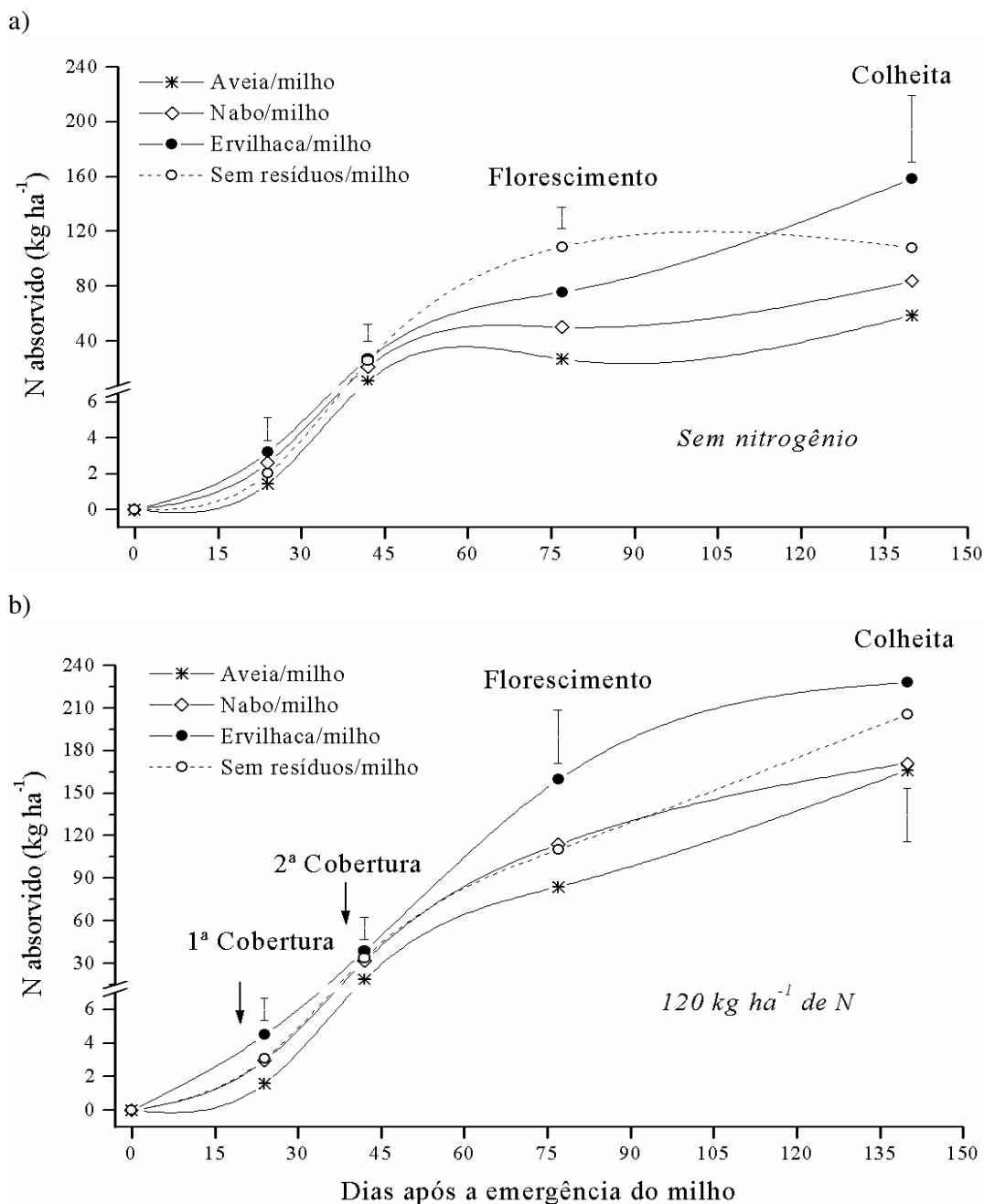
Já a qualidade dos resíduos culturais aportados ao solo influenciou fortemente as variações de disponibilidade de N no solo durante praticamente todo o ciclo da cultura do milho (Capítulo II), sendo determinante na absorção de N e na produtividade de milho (Capítulo III). Os resultados obtidos reafirmaram que a produtividade milho é diretamente

proporcional à absorção de N até o florescimento e que o milho semeado em sucessão a ervilhaca apresenta maior capacidade produtiva em relação aos resíduos de aveia preta e nabo forrageiro, mesmo com adubação nitrogenada complementar.

Outro fator a ser salientado é que produtividades de milho superiores a 9 Mg ha⁻¹ de grãos somente foram possíveis com o acúmulo superiores a 150 kg ha⁻¹ de N até o florescimento (Capítulo III), sendo que somente na sucessão ervilhaca/milho foi possível alcançar tal acúmulo, sugerindo que o N advindo da decomposição dos resíduos desta cultura permite tal fato. Porém, apesar da reconhecida capacidade de fornecimento de N dos resíduos de ervilhaca, associado à capacidade de fixação biológica desta cultura (em torno de 70% de N oriundo da atmosfera) e do elevado aporte de N ao solo (mais de 200 kg ha⁻¹ de N), a recuperação de N máxima obtida foi de 27% no primeiro ano e 5% no segundo ano (Capítulo IV). A partir destas informações, concluiu-se que a recuperação de N pelo milho após ervilhaca é baixa para ser totalmente responsável pelo aumento de produtividade, sugerindo que a ervilhaca possa ter efeitos positivos além do fornecimento de N.

Neste sentido, os resultados sugerem que a elevada disponibilidade de N na fase inicial de desenvolvimento do milho proporcionada pela sucessão ervilhaca/milho seja o fator essencial no aumento das produtividades observadas nesta sucessão. Exemplo a esse efeito, é a curva de acumulação de N em função do resíduo antecessor obtida na safra de 2003/04 (Figura 24), onde pode ser observado que a maior absorção de N na fase inicial da sucessão ervilhaca/milho proporcionou maior absorção de N nas fases seguintes e refletiu em maior produtividade, com e sem N em cobertura (Capítulo III).

Visto isto, coloca-se que a elevada disponibilidade de N no solo no início do desenvolvimento do milho (2 a 3 folhas), mesmo que a planta ainda não seja capaz de absorver grandes quantidades, deve estimular precocemente importantes respostas fisiológicas, que seriam principalmente: o acúmulo de reservas de N, fotossintatos e clorofila; aumento da concentração de enzimas responsáveis pela utilização do N dentro da planta; crescimento e aprofundamento do sistema radicular; aumento do diâmetro do caule; além da expansão da área foliar. Todas estas alterações fisiológicas são essenciais para o aumento da produção de grãos, pois aumentam a capacidade de absorção de água e nutrientes em função do maior porte de planta, associado à translocação de reservas de N de órgãos velhos para mais jovens e a manutenção da taxa de fotossíntese, capacitando as plantas para respostas fisiológicas rápidas e eficientes em termos de taxa de crescimento e eficiência de produtividade, principalmente após períodos de adversidades climáticas.



De acordo com os resultados, é possível inferir que a disponibilidade de N no solo está diretamente relacionada com a dinâmica de decomposição de resíduos controlada pela qualidade dos resíduos e influenciada pelas oscilações de umidade e temperatura. Assim, resíduos de leguminosas, com certeza, fornecem maiores quantidades de N e a cultura de milho em sucessão poderá receber menores doses complementares, podendo ser também

manejadas mais tardiamente. Já o milho semeado em sucessão aos resíduos de gramíneas, com maior relação de C/N e decomposição mais lenta, caracterizado por processos de imobilização e menor disponibilidade de N no solo, deverá ser manejado com maiores doses de N, principalmente, na fase inicial de desenvolvimento da cultura, coincidente com a fase de maior imobilização microbiana, além de que as doses em cobertura devem ser antecipadas e parceladas para contrabalancear as oscilações de disponibilidade de N no solo (Tabela 23). Na realidade, ocorrem períodos com picos de imobilização pela biomassa microbiana do solo e na seqüência, picos de mineralização, disponibilizando N para as plantas. É exatamente nas condições de imobilização que a complementação com o fertilizante nitrogenado seria eficaz, para proporcionar um fluxo contínuo de N e satisfazer a exigência da planta nas diversas fases de desenvolvimento. Baseado nestas conclusões e também nas informações de campo e da revisão de literatura, elaborou-se um esquema hipotético com diferentes cenários para o conteúdo N mineral no solo, de acordo com a qualidade do resíduo (relação C/N) e das condições climáticas (Figura 25).

Tabela 23 – Sugestão de parcelamento das doses de N na cultura do milho.

Quantidade a aplicar (kg ha ⁻¹)	Cultura antecessora	Fases da cultura (folha expandida)				
		Semeadura	2 a 3	4 a 5	6 a 7	8 a 9
< 100	Gramínea	40%	30%	30%	-	-
	Leguminosa	-	-	50%	-	50%
	Pousio	40%	-	60%	-	-
100 a 200	Gramínea	30%	30%	20%	20%	-
	Leguminosa	30%	-	40%	-	30%
	Pousio	40%	30%	-	30%	-
> 200	Gramínea	25%	25%	25%	25%	-
	Leguminosa	20%	-	40%	-	40%
	Pousio	30%	40%	-	30%	-

* Considerar resíduos de nabo forrageiro com dinâmica semelhante a resíduos de leguminosa.

** Esta tabela serve apenas com um referencial para o parcelamento das doses de N, sendo que fatores locais e condições climáticas deverão ser a principal orientação do momento mais adequado a aplicação de N.

O esquema leva em consideração que a entrada na estação de primavera/verão, em condições subtropicais, é marcada pelo aumento gradativo da temperatura e associada à adição de resíduos de inverno (fonte de carbono), estimulando o processo microbiano de mineralização e imobilização. Entretanto, esse processo é condicionado pelas condições de umidade (secamento e umedecimento do solo). Assim, as condições climáticas controlam o momento e a intensidade dos picos de mineralização ou imobilização, mas não definem qual será o predominante. Este fator é controlado pela qualidade do resíduo aportado ao solo, principalmente sua relação C/N. Essa complexidade na dinâmica do N solo é, em parte, responsável pela dificuldade na recomendação da adubação nitrogenada, sendo um dos

principais motivos que leva inúmeros trabalhos sugerirem que as recomendações sejam desenvolvidas regionalmente (“in loco”), levando em consideração as características específicas da capacidade produtiva do solo, do potencial do material genético utilizado e do nível tecnológico aplicado. Entretanto, o conhecimento da dinâmica do N, bem como de parâmetros de solo associados a parâmetros de planta, são essenciais para a otimização destas recomendações.

Sabendo-se que, para a obtenção da máxima eficiência de N, tão importante quanto conhecer a quantidade de N a ser aplicada no milho está o sincronismo entre disponibilidade de N do solo e a demanda pelas plantas de milho, procurou-se através de técnicas de agricultura de precisão avaliar o potencial de uso de parâmetros de solo e planta para estimar a variação espacial de N e manejar a adubação nitrogenada a taxa variável (Capítulo V). Constatou-se que parâmetros de plantas apresentaram o melhor desempenho no diagnóstico da demanda de N pelo milho em relação a parâmetros de solo, sugerindo que parâmetros em tempo real, como a coloração das plantas de milho, podem ser capazes de indicar a quantidade de N mais adequado a ser aplicada. Assim, acredita-se que a combinação de uma recomendação com parâmetros de solo e planta poderá ser, no futuro, mais eficiente na avaliação da necessidade de N no milho, principalmente em função da sazonalidade de disponibilidade de N entre anos e durante o próprio ciclo da cultura do milho.

Como conclusões finais, a seguir são citados os principais pontos apresentados e discutidos neste trabalho como forma de sugestão de manejo e para instigar novas pesquisas a serem realizadas para o aperfeiçoamento da recomendação de adubação nitrogenada na cultura milho para o Rio Grande do Sul e Santa Catarina:

- aumento da dose de N na semeadura, principalmente na sucessão gramíneas/milho;
- antecipação da 1ª cobertura de N na sucessão gramíneas/milho;
- revisão da necessidade da quantidade de resíduo como um referencial complementar na quantidade de N a ser aplicada;
- redução das doses de N no milho em sucessão a resíduos de leguminosas para baixas expectativas de produção;

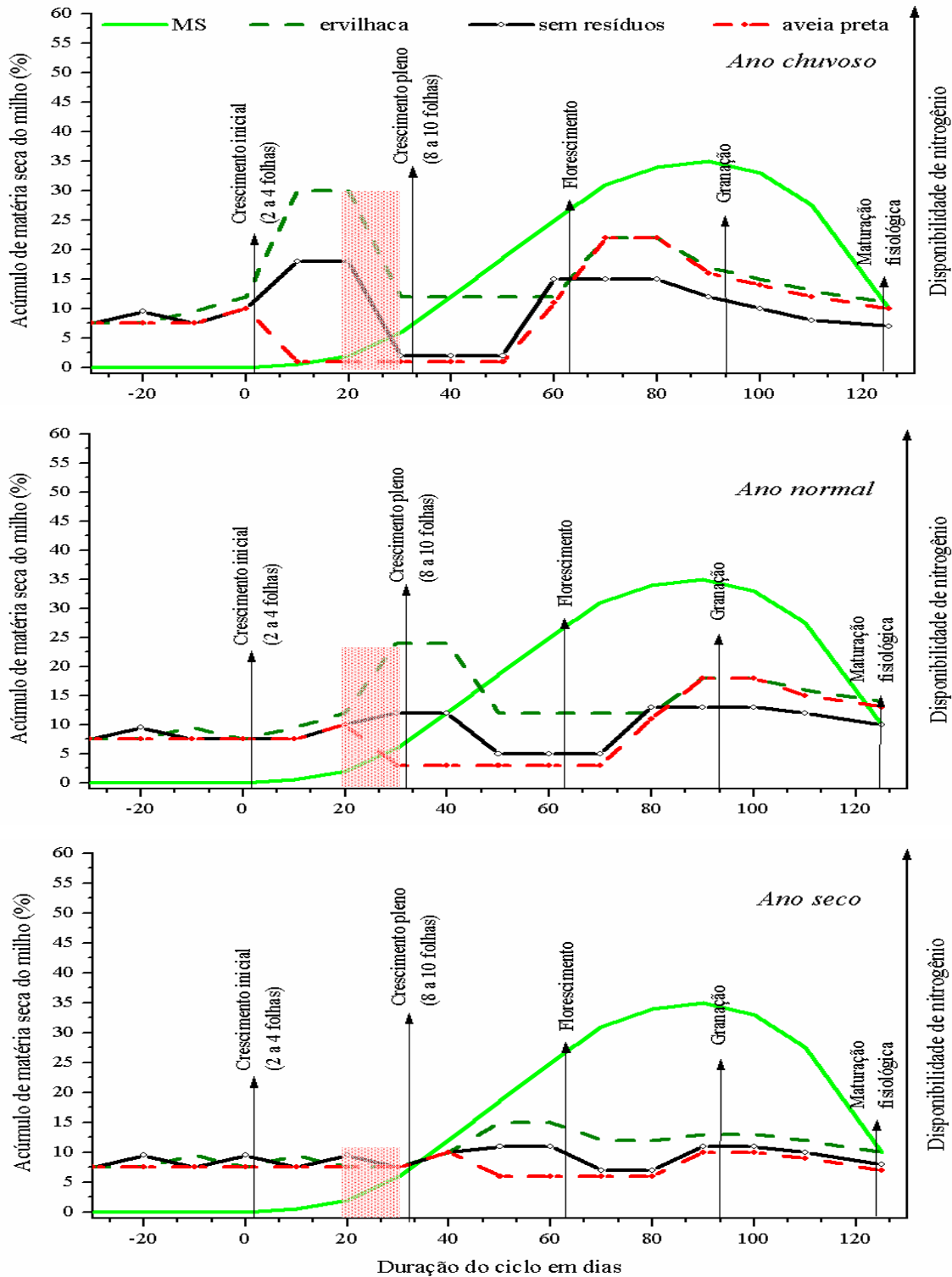


Figura 25 – Esquema hipotético das oscilações de disponibilidade de N no solo em função da qualidade do resíduo e das variações das condições climáticas durante o desenvolvimento da cultura do milho em sistema plantio direto. *Considerando que a época de manejo dos resíduos e o desenvolvimento da cultura do milho sejam equivalentes nas três condições sugeridas.

- inclusão de recomendações associadas às condições climáticas: anos secos apenas uma cobertura; anos mais chuvosos ou com manejo de irrigação, 2 a 3 coberturas em intervalos mais curtos;

- maior incentivo ao uso de leguminosas, como a ervilhaca, uma vez que a perda de produtividade com o uso de gramíneas, dificilmente, são recuperadas com adubações nitrogenadas complementares.

A partir do exposto, acredita-se que o conjunto de informações geradas por esta Tese poderá auxiliar pesquisadores e até mesmos técnicos e produtores, hoje, cada vez mais bem informados, no aumento da eficiência da adubação nitrogenada no milho. Entretanto, apesar das sugestões propostas serem positivas na melhoria do uso de N na cultura do milho, ressalva-se que as mesmas devem ser discutidas e investigadas por um número maior de pesquisadores a fim de comprovar as afirmações realizadas.

10.2 Modelo de recomendação sugerida

Baseado nos resultados obtidos experimentalmente e na literatura consultada durante o desenvolvimento desta Tese, a seguir é sugerido um modelo para recomendação de N na cultura do milho. Partiu-se da atual recomendação de adubação nitrogenada da Comissão de Química e de Fertilidade do Solo - RS/SC (2004), onde se sugere que a resposta à adubação nitrogenada esteja associada ao tipo de solo (especialmente o teor de matéria orgânica); qualidade de resíduos antecessores (leguminosa x gramíneas) e histórico de produção (expectativa de produtividade = interação entre material genético e condições climáticas locais). Entretanto, de forma a simplificar a tabela de recomendação de N para milho (CQFS-RS/SC, 2004), buscando aumentar sua eficiência de uso e melhorar sua sensibilidade, a seguir são propostos fatores numéricos para a formulação da recomendação. Além disso, sugere-se a inclusão de um fator de eficiência da adubação nitrogenada, diferindo áreas de sequeiro em relação a áreas irrigadas. Assim, propõe-se que a seguinte equação seja resolvida:

$$\textit{Quantidade a aplicar} = (\textit{Demanda} - \textit{Créditos}) / \textit{Eficiência}$$

1) Demanda =

$$(\text{Produção média de milho} - \text{ton ha}^{-1})^{(1)} \times 21^{(2)}$$

2) Créditos =

a) Em função da matéria orgânica

$$\text{Crédito da MOS} = \text{Teor de MOS}^{(3)} \times 20^{(4)}$$

b) Em função do tipo de resíduo

$$\text{Crédito de leguminosas}^{(5)} = + 40 \text{ kg ha}^{-1} \text{ de N}$$

$$\text{Crédito de gramíneas}^{(6)} = - 15 \text{ kg ha}^{-1} \text{ de N}$$

$$\text{Crédito de nabo forrageiro}^{(7)} = + 25 \text{ kg ha}^{-1} \text{ de N}$$

$$\text{Crédito de pousio}^{(8)} = + 15 \text{ kg ha}^{-1} \text{ de N}$$

3) Eficiência =

a) 50% do aplicado (sequeiro)⁽⁹⁾ – fator 0,50

b) 75% do aplicado (irrigado) – fator 0,75

Observações pertinentes:

⁽¹⁾ Produção média de milho da região e/ou da lavoura nos últimos 3 anos de cultivo de milho.

⁽²⁾ Valor médio referente à quantidade exportada ($\pm 15 \text{ kg ha}^{-1}$ de N) e restituída pela palha ($\pm 6 \text{ kg ha}^{-1}$ de N) por tonelada de grãos produzida (Silva et al., 2006).

⁽³⁾ Teor de MOS (%) referente ao resultado analítico da amostra de solo da camada de 0 a 10 cm da lavoura a ser feita a recomendação.

⁽⁴⁾ Fator médio obtido da tabela de recomendação de doses de N para a cultura do milho no RS/SC em função das faixas de matéria orgânica do solo (MOS), considerando como cultura antecessora a consorciação ou pousio (CQFS-RS/SC, 2004).

⁽⁵⁾ Considerando um produção média de matéria seca de 2 a 3 toneladas e mineralização de 50% do conteúdo de N (ver Capítulos I e II).

⁽⁶⁾ Considerando um produção média de matéria seca de 4 a 5 toneladas e imobilização de 30% do conteúdo de N. (ver Capítulos I e II).

⁽⁷⁾ Considerando um produção média de matéria seca de 5 a 6 toneladas e mineralização de 30% do conteúdo de N. (ver Capítulos I e II).

⁽⁸⁾ Considerando um produção média de matéria seca de 1 a 2 toneladas sem efeito de significativos de mineralização ou imobilização. (ver Capítulos I e II).

⁽⁹⁾ Valores sugeridos necessitando de investigações científicas para comprovação e ajuste.

Observação: A mineralização ou imobilização em função de diferentes aportes de resíduos pode ser estimada a partir de uma regra de três simples, mantendo os percentuais de mineralização ou imobilização. Entretanto, as alterações de crédito serão pouco significativas.

Na Figura 26 pode ser observado o forte grau de correlação entre a necessidade de N estimada pelo modelo de recomendação sugerido pela Tese (lavouras de sequeiro e irrigadas) em relação à necessidade de N atualmente recomendada pela CQFS-RS/SC (2004). A comparação entre estimativa e recomendação atual de N, apresentou alta correlação, melhorando a sensibilidade através das possibilidades de variações de produtividade e do tipo de solo (especialmente, o teor de matéria orgânica). Observa ainda que, a atual recomendação estaria superestimando as doses de N necessária para a obtenção de baixas produtividades.

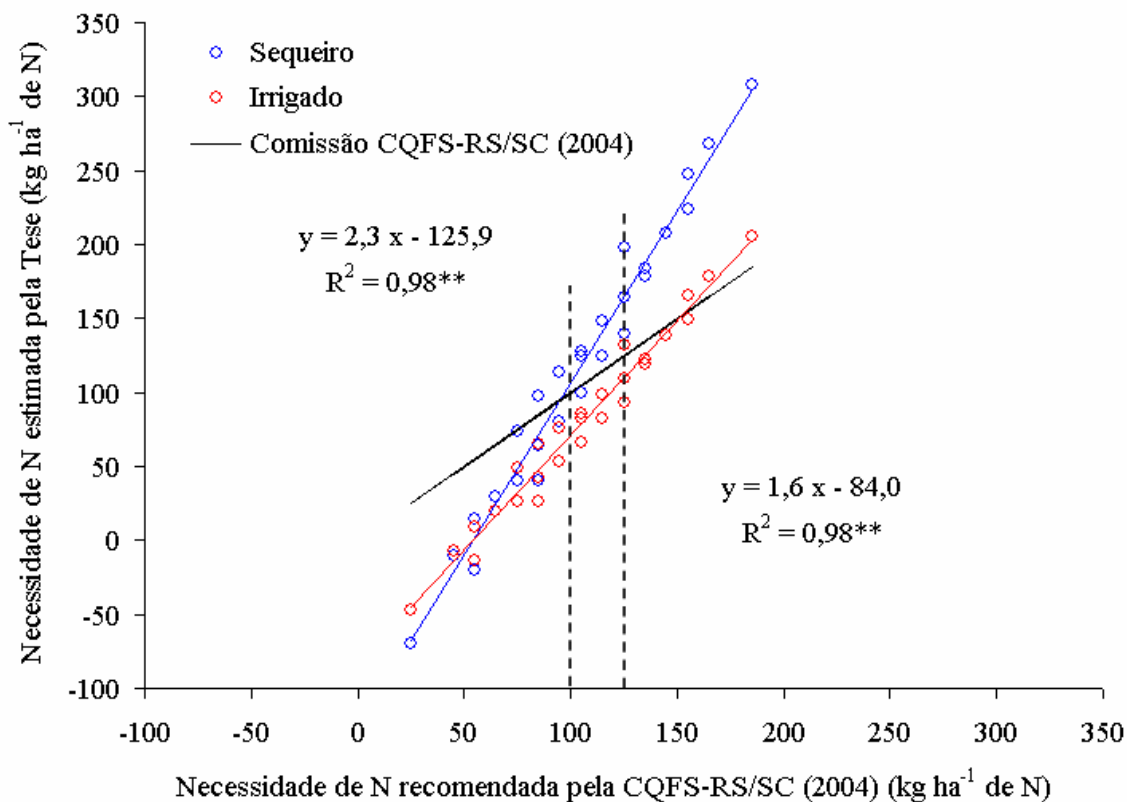


Figura 26 – Relação entre a necessidade de N recomendada pela CQFS-RS/SC (2004) e a quantidade estimada pelo modelo de recomendação sugerido pela Tese para produtividade entre 5 a 9 ton ha⁻¹ de milho, em solos com diferentes teores de matéria orgânica e culturas antecessoras. n = 27 situações. Maiores informações no Apêndice 33.

10.3 Perspectivas futuras

O conjunto de resultados relatado ao decorrer desta Tese indica que há muito a se avançar em termos de novos conhecimentos sobre o manejo da adubação nitrogenada na cultura do milho, associado, principalmente, aos novos recursos técnicos disponíveis para pesquisa, sendo alguns já ao alcance dos técnicos e produtores. Destacam-se, entre as sugestões de pesquisa nos próximos anos, as seguintes linhas de investigação:

- I. Linhas de pesquisa visando o aperfeiçoamento da necessidade de N pelo milho em Sistema Plantio Direto “consolidado”, com e sem irrigação, através de uma rede de experimentos para avaliar as curvas de resposta;

Observação pertinente: acredita-se que a consolidação do Sistema Plantio Direto, com redução do processo erosivo e o acúmulo progressivo de matéria orgânica do solo e nutrientes nas camadas mais superficiais, possa estar proporcionando uma menor resposta à adubação nitrogenada, principalmente em áreas irrigadas. Entretanto, o lançamento de novos materiais genéticos, aliado à disponibilidade de alta tecnologia, permitirá a obtenção de maiores tetos de produção e, provavelmente, dependentes de fontes complementares de N manejadas de forma adequada.

- II. Investigação da adequada época de aplicação de N em Sistema Plantio Direto em função do tipo resíduo antecedente com o uso de técnicas de marcação isotópicas (^{15}N) e dos possíveis benefícios do aumento da adubação nitrogenada de base e/ou antecipação da primeira cobertura para a fase de 2 a 3 folhas;

Observação pertinente: suspeita-se que a elevada disponibilidade de N na fase inicial do desenvolvimento da cultura do milho possa proporcionar estímulos fisiológicos essenciais para a obtenção de elevadas produtividades.

- III. Avaliação dos benefícios do N oriundo dos resíduos de ervilhaca na fase inicial e ao longo do ciclo do milho que poderiam estar associados à forma de N disponibilizada (N-NH_4^+);

Observação pertinente: apesar das plantas de milho poderem absorver tanto a forma $N-NO_3^-$ (nitrato), como $N-NH_4^+$ (amônio), alguns autores colocam que a absorção de amônio é mais eficiente para as plantas, em função do menor gasto energético de assimilação. Como o processo de mineralização resulta, primeiramente, na forma de amônio, seja da matéria orgânica nativa do solo ou dos resíduos orgânicos em decomposição, o N oriundo desses processos seria mais eficientemente utilizado pelas plantas. Entretanto, salienta-se que o tempo de duração do N na forma amônio no solo é pequeno (24 a 48 horas), sendo rapidamente nitrificado para forma de nitrato, reduzindo seus benefícios.

IV. Avaliação da relação entre o diâmetro de caule no florescimento com a produtividade;

Observação pertinente: suspeita-se haver uma elevada correlação entre a capacidade produtiva do milho com o diâmetro de seu caule, próximo ao solo. Isto estaria associado à capacidade de fluxos de nutrientes e água na fase de florescimento. A vantagem deste parâmetro em termos de pesquisa seria sua facilidade de ser executada, sendo um método mais simples e barato em relação à avaliação de produção de matéria seca.

V. Reconhecimento da importância da variabilidade espacial e temporal na disponibilidade de N e criação de metodologias para aplicações à taxa variável que considerem parâmetros de solo e planta concomitantemente.

Observação pertinente: Os resultados promissores obtidos no Capítulo V indicam que mais pesquisas sobre o uso concomitante de parâmetros de solo e planta devem ser realizadas a fim de melhorar as estimativas de quanto e quando deverão ser efetuadas as aplicações de N na cultura do milho.

11 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGOSTINETTO, D. et al. Adaptação de espécies utilizadas para cobertura de solo no Sul do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Agrociência**, v. 6, n. 1, p. 47-52, jan./abr., 2000.

AITA, C. et al. Espécies de inverno como fonte de nitrogênio para o milho no sistema de cultivo mínimo e feijão em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 18, p. 101-108, 1994.

AITA, C. Dinâmica do nitrogênio no solo durante a decomposição de plantas de cobertura: efeito sobre a disponibilidade de nitrogênio para a cultura em sucessão. In: FRIES, M.R.; DALMOLIN, R.S.D. **Atualização em recomendação de adubação e calagem: ênfase em plantio direto**. UFSM/Depto de Solos, Santa Maria, p.76-111, 1997.

AITA, C. et al. Plantas de cobertura de solo como fontes de nitrogênio ao milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 157-1165, 2001.

AITA, C.; GIACOMINI, S.J. Decomposição e liberação de nitrogênio de resíduos culturais de plantas de cobertura de solo solteiras e consorciadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 601-612, 2003.

ALVES, B.J.R. et al. Métodos Isotópicos. In: SANTOS, G.A.; CARMARGO, F.A.O. (Eds). **Fundamentos da Matéria Orgânica do Solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Gênese, Porto Alegre, p. 337-358, 1999.

AMADO, T.J.C. **Disponibilidade de nitrogênio para o milho em sistemas de cultura e preparo do solo**. 1997. 201f. Tese (Doutorado em Agronomia – Ciência do Solo) – Programa de Pós-graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1997.

AMADO, T.J.C. et al. Culturas de cobertura, acúmulo de nitrogênio total no solo e produtividade de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 23, p. 679-686, 1999.

AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J.; FERNANDES, S.B.V. Leguminosas e adubação mineral como fontes de nitrogênio para o milho em sistemas de preparo do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 24, p. 179-189, 2000.

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

AMADO, T.J.C.; SANTI, A.; ACOSTA J.A.A. Adubação nitrogenada na aveia preta: influência na decomposição de resíduos, liberação de nitrogênio e rendimento de milho sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 1085-1096, 2003.

ANDRADA, M. C.; et al. Consorciação de plantas de cobertura: III. Dinâmica do N no solo durante a decomposição da fitomassa e produtividade de milho. In: FERTBIO 2000, Santa Maria. **Anais...** Santa Maria, 2000, CD-ROM.

ANGUINONI, I. Adubação nitrogenada nos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina. In: SANTANA, M.B.M. (ed.). **Adubação nitrogenada no Brasil**. Ilhéus: CEPLAC/SBCS, p. 1-18, 1986.

ARAÚJO, L.A.N. et al. Adubação nitrogenada na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 8, p. 771-777, ago., 2004.

ARGENTA, G.; et al. Parâmetros de planta como indicadores do nível de nitrogênio na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 37, n. 4, p. 519-527, abr. 2002.

ARGENTA, G.; SILVA, P.R.F. Adubação nitrogenada em milho pelo monitoramento do nível de nitrogênio na planta por meio do clorofilômetro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 109-119, 2003.

ARGENTA, G.; SILVA, P.R.F.; BORTOLINI, C.G. Clorofila na folha como indicador do nível de nitrogênio em cereais. **Ciência Rural**, v. 31, n. 4, p. 715-722, 2001.

ARNOL, I. **Mineral nutrition of maize**. Bern, International Potash Institute, 1975. 452 p.

BALASUBRAMANIAN, V. et al. On-farm adaptation of knowledgeintensive nitrogen management technologies for rice systems. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 53, n. 1, p. 59-69, 1999.

BALUSKA, F.; VOLKMANN, D.; MENZEL, D. Plant synapses: actin-based domains for cell-to-cell communication. **Trends in Plant Science**, v. 10, n. 3, Mar., 2005.

BARTZ, H.R. Dinâmica dos nutrientes e adubação em sistemas de produção sob Plantio Direto. In: Fries, M.R. (Ed.). **Plantio Direto em solos arenosos: alternativas para a**

sustentabilidade agropecuária. Santa Maria: Universidade Federal de Santa Maria: Ed. Pallotti, p. 52-81, 1998.

BASSO, J.C. **Épocas de aplicação de nitrogênio para milho cultivado em sucessão a plantas de cobertura de solo, no sistema plantio direto**. 1999. 76f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1999.

BASSO, C.J.; CERETTA, C.A. Manejo do nitrogênio no milho em sucessão a plantas de cobertura de solo, sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 24, p. 905-915, 2000.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Características químicas do solo afetadas por métodos de preparo e sistemas de cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, p. 105-112, 1997.

BELOW, F.E. Fisiologia, nutrição e adubação nitrogenada no milho. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, v. 99, p. 7-12, set./out., 2002.

BERTOL, I. et al. Persistência de resíduos culturais de aveia e milho sobre a superfície do solo em semeadura direta. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 705-712, 1998.

BINFORD, G.D.; BLACKMER, A.M.; CERRATO, M.E. Nitrogen concentration of young corn plants as an indicator of nitrogen availability. **Agronomy Journal**, Madison, v. 84, n. 2, p. 219-223, 1992.

BLACKMER, T.M.; SCHEPERS, J.S. Techniques for monitoring crop nitrogen status in corn. Communications. **Soil Science and Plant Analysis**, v. 25, p. 1791-1800, 1994.

BLEVINS, R.L.; HERBEK, J.H.; FRYE, W.W. Legume cover crops as a nitrogen source for no-till corn and grain sorghum. **Agronomy Journal**, Madison, v. 82, n. 4, p. 769-772, 1990.

BOER, C.A. et al. Ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura na entressafra em um solo de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, p. 1269-1276, 2007.

BOLLIGER, A. et al, A. Taking stock of the Brazilian “zero-till revolution”: A review of landmark research and farmers practice. **Advances in Agronomy**, v. 91, p. 47-110, 2006.

BONGIOVANNI, R.Y. J.; LOWENBERG-DEBOER, J. Manejo de nitrógeno en maíz utilizando estimadores de respuesta sitio-específica de un modelo de regresión espacial. In

BRAGACHINI et al. (2001) **Actas del Tercer Curso de Agricultura de Precisión**, Oncativo (Argentina). INTA-Manfredi, Proyecto Agricultura de Precisión., 2001. 17 p.

BOWMAN, G., SHIRLEY, C.; CRAMER, C. **Managing Cover Crops Profitably**. 2. ed. A publication of the Sustainable Agriculture Network, Sustainable Agriculture publications. University of Vermont. Vermont. USA, 1998.

BUCHANAN, M.; KING, L.D. Carbon and phosphorus losses from decomposing crop residues in no-till and conventional till agroecosystems. **Agronomy Journal Madison**, v. 85, p. 631-638, 1993.

BUCHER, C.A. **Avaliação através de RT-PCR da expressão dos genes que codificam para enzimas de assimilação de nitrogênio em variedades de arroz**. 2007. 50f. Dissertação (Mestrado em Agronomia). UFRJ, Rio de Janeiro, 2007.

BÜLL, L.T. Nutrição mineral do milho. In: BULL, L.T.; CANTARELLA, H.(Eds). **Cultura do Milho: fatores que afetam a produtividade**. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, p. 63-146, 1993.

CABRERA, M.L.; KISSEL, D.E.; VIGIL, M.F. Nitrogen mineralization from organic residues: research opportunities. **Journal Environmental Quality**, v.34, Jan./Feb., 2005.

CALEGARI, A. et al. Adubação verde no sul do Brasil. **AS-PTA**, Rio de Janeiro, 1993. 346 p.

CAMARGO, F.A.O. et al. Nitrogênio orgânico do solo. In: SANTOS, G.A.; CARMARGO, F.A.O. (Eds). **Fundamentos da Matéria Orgânica do Solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. Gênese, Porto Alegre, 117-137, 1999.

CAMARGO, F.A.O. **Fracionamento e dinâmica do nitrogênio orgânico em solos do Rio Grande do Sul**. 1996. 151 f. Tese (Doutorado em Agronomia – Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

CAMARGO, F.A.O.; GIANELLO, C.; VIDOR, C. Nitrogen fractions in the microbial biomass in soils of Southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, p. 181-185, 1999.

CAMBOURIS, A.N.; WALIN, M.C.; SIMARD, R.R.. Precision management of fertilizer phosphorous and potassium for potato in Quebec, Canada. p. 847-858. In: P.C. ROBERT,

- R.H. RUST; W.E. LARSON (ed.) **Precision agriculture**. Proc. Int. Conf., 4th, St. Paul, MN. 19-22 July 1998. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI, 1999.
- CANTARELLA, H. Calagem e adubação do milho. In: BÜLL, L.T.; CANTARELLA, H. (Eds). Cultura do milho: fatores que afetam a produtividade. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, p. 147-198, 1993.
- CANTARELLA, H.; RAIJ, B. van. Adubação nitrogenada no Estado de São Paulo. In: SANTANA, M.B.M. **Adubação nitrogenada no Brasil**. CEPLAC, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Ilhéus, p. 47-49, 1986.
- CERETTA, C. A. Adubação nitrogenada no sistema plantio direto: sucessão aveia/milho. In: **II Curso sobre aspectos básicos de fertilidade e microbiologia do solo no sistema plantio direto**. Editora Aldeia Norte, Passo Fundo, p. 12-25, 1998.
- CERETTA, C. A. **Fracionamento de N orgânico, substâncias húmicas e caracterização de ácidos húmicos de solo em sistemas de cultura sob plantio direto**. 1995. 127f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1995.
- CERETTA, C.A. et al. Manejo da adubação nitrogenada na sucessão aveia preta/milho, no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 26, n. 1, p. 163-171, 2002.
- CERETTA, C.A. et al. Produção e decomposição de fitomassa de plantas invernais de cobertura de solo e milho, sob diferentes manejos da adubação nitrogenada. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, n. 1, p. 49-54, 2002.
- CHANG, J. et al. Corn (*Zea mays* L.) yield prediction using multispectral and multirate reflectance. **Agronomy Journal**, Madison, v. 95, p. 1447-1453, 2003.
- CHAPMAN, S.C.; BARRETO, H.J. Using a chlorophyll meter to estimate specific leaf nitrogen of tropical maize during vegetative growth. **Agronomy Journal**, Madison, v. 89, n. 4, p. 557-562, 1997.
- COELHO, A.M. Agricultura de precisão: Manejo da variabilidade espacial e temporal dos solos e das culturas. **Tópicos em Ciência do Solo**, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo v.3, p. 209-248, 2003.

COELHO, A.M. et al. Balanço de nitrogênio (^{15}N) em um LATOSSOLO VERMELHO Escuro, sob vegetação de cerrado, cultivado com milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 15, p. 187-193, 1991.

COELHO, A.M. et al. Nutrição e Adubação de Milho. Embrapa milho e Sorgo. **Sistema de Produção**. Versão eletrônica – 3ª Edição. Set/2007. em: [http:// www.cnpms.embrapa.br/deficiencia/deficiencia/html](http://www.cnpms.embrapa.br/deficiencia/deficiencia/html). Acesso em: 22 de novembro de 2008.

COELHO, A.M.; FRANÇA, G.E. de; BAHIA FILHO, A.F.C. Nutrição e adubação do milho forrageiro. In: EMBRAPA: Centro Nacional de Pesquisa de Milho e Sorgo. **Milho para silagem: tecnologias, sistemas e custo de produção**. (EMBRAPA-CNPMS. Circular Técnica, 14), Sete Lagoas, p. 29-73, 1991.

COELHO, A.M.; FRANÇA, G.E. de; BAHIA FILHO, A.F.C.; GUEDES, G.A.A. Doses e métodos de aplicação de fertilizantes nitrogenados na cultura do milho sob irrigação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 16, p. 61-67, 1992.

COELHO, A.M.; FRANÇA, G.E. Seja o doutor do seu milho: nutrição e adubação. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, v.71, set., p. 1-9, 1995.

COLWELL, R.M. **Determining the prevalence of certain cereal crop diseases by means of aerial photography**. Hilgardia, v. 26, p. 223-286, 1953.

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

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO – RS/SC. **Manual de adubação e de calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10. Ed. Porto Alegre: CQFS-RS/SC, 2004. 400 p.

COSTA, M.B.B. et al. **Adubação verde no Sul do Brasil**. AS-PTA, Rio de Janeiro, 1992. 342 p.

CRUZ, S. C. S. et al. Parcelamento da adubação nitrogenada na cultura do milho irrigado em sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 12, n. 4, p. 370-375, 2008.

DA ROS, C.O.; AITA, C. Efeito de espécies de inverno na cobertura do solo e fornecimento de nitrogênio ao milho em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 20, p. 135-140, 1996.

- DEBARBA, L.; AMADO, T.J.C. Desenvolvimento de sistemas de produção de milho no Sul do Brasil com características de sustentabilidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 21, p. 473-480, 1997.
- DERPSCH, R.; SIDIRAS, N.; HEINZMANN, F.X. Manejo do solo com coberturas verdes de inverno. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 20, p. 761-773, 1985.
- DOBERMANN, A.; PING, J.L. Geostatistical integration of yield monitor data and remote sensing improves yield maps. **Agronomy Journal**, Madison, v. 96, n. 1, p. 285-297, 2004.
- DORAN, J.W.; SMITH, M.S. Organic matter management and utilization of soil and fertilizer nutrients. In: Follett, R.F. et al. **Soil fertility and organic matter as critical components of production systems**. (SSSA Special Publication number 9), Madison, p.53-72, 1987.
- DRESCHER, M. **Avaliação da fertilidade e necessidade de corretivos e fertilizantes dos solos e culturas do Estado do Rio Grande do Sul, através de um sistema desenvolvido para microcomputadores**. 1991. 163f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1991.
- EBELHAR, S.A.; FYE, W.W.; BLEVINS, R.L. Nitrogen from legume cover crops for no-tillage corn. **Agronomy Journal**, Madison, v. 76, p. 51-55, 1984.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Rio de Janeiro, 412 p. 2ª Edição, 2006.
- ESCOSTEGUY, P.A.V.; RIZZARDI, M.A.; ARGENTA, G. Doses e épocas de aplicação de nitrogênio em cobertura na cultura do milho em duas épocas de semeadura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 21, p. 71-77, 1997.
- ESPÍNOLA, J.I.A. et al. Decomposição e liberação de nutrientes acumulados em leguminosas herbáceas perenes consorciadas com bananeira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 321-328, 2006.
- ESU. ANCA-SL/20-20. **User Manual**. Europa Scientific, Inc. UK, 1996.
- FANCELLI, A.L.; DOURADO NETO, D. Cultura do milho: aspectos fisiológicos e manejo da água. **Informações Agronômicas**, Piracicaba, v. 73, p. 1-4, 1996.
- FERNANDÉZ, J.E. et al. Reducing fertilization for maize in southwest Spain. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 29, p. 2829-2840, 1998.

FIGUEIREDO, C.C. et al. Sistemas de manejo na absorção de nitrogênio pelo milho em um Latossolo Vermelho no Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 3, p. 279-287, mar., 2005.

FIORIN, J.E. **Manejo e fertilidade do solo no sistema plantio direto**. Passo Fundo, Ed. Berthier, 2007. 184 p.

FLEMING, A.A.; GIDDENS, J.E.; BEATY, E.R. Corn yields as related to legumes and inorganic nitrogen. **Crop Science**, v. 21, p. 977-980, 1981.

FONTES, P.C.R. **Diagnóstico do estado nutricional das plantas**. Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2001. 122 p.

FRANÇA, G.E. de; et al.. Adubação no Estado de Minas Gerais. In: SANTANA, M.B.M. (Coord.). **Adubação nitrogenada no Brasil**. Ilhéus: CEPLAC, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 107-124, 1986.

FRANZLUEBBERS, A.J.; HONS, F.M.; ZUBERER, D.A. Seasonal change in soil microbial biomass and mineralizable C and N in wheat management systems. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 26, p. 1469-1475, 1994.

GALLAIS, A.; HIREL, B. An approach to the genetics of nitrogen use efficiency in maize. **Journal of Experimental Botany**, v. 30, p. 655-295, 2004.

GAMA-RODRIGUES, A.C.; GAMA-RODRIGUES, E.F.; BRITO, E.C. Decomposição e liberação de nutrientes de resíduos culturais de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho-Amarelo na região Noroeste Fluminense-RJ. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 1421-1428, 2007.

GARCIA, F. **Criterios para el manejo de la fertilización del cultivo de maíz**. Presentado en la Jornada "Maíz 2005" organizada por Capacitación Agropecuaria. Córdoba, 1 de Julho de 2005.

GIACOMINI, S.J. **Decomposição e liberação de nitrogênio de resíduos culturais de plantas de cobertura de solo solteiras e consorciadas**. 2001. 125f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2001.

GILLER, K. E.; WILSON, K. J. Nitrogen fixation in tropical cropping systems. **CAB International**, The Netherlands, 1993.

- GODWIN, R. J.; EARL, R.; TAYLOR, J.C. Precision farming of cereal crops: A Five-year experiment to develop management guidelines. **Project Report No. 267**, 2002.
- GONÇALVES, C.N.; CERETTA, C.A. Plantas de cobertura de solo antecedendo o milho e seu efeito sobre o carbono orgânico do solo, sob plantio direto. Viçosa, **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v. 23, p. 307-313, 1999.
- GROVE, L.T. et al. Nitrogen Fertilization of maize on oxisol of the Cerrado of Brasil. **Agronomy Journal**, Madison, v. 27, p. 261-265, 1980.
- HARRIS, G. H.; HESTERMAN, O. B. Quantifying the nitrogen contribution from alfalfa to soil and two succeeding crops using ^{15}N . **Agronomy Journal**, Madison, v. 82, p. 129-134, 1990.
- HARRISON, J.; HIREL, B.; LIMAMI, A.M. Variation in nitrate uptake and assimilation between two ecotypes of *Lotus japonicus* and their recombinant inbred lines. **Physiologia Plantarum**, v. 120, p. 124-131, 2004.
- HAUCK, R.D. Epilogue. In: HAUCK, R.D., (Ed.). Nitrogen in crop production. **Soil Science Society of America**, Madison, p. 782-787, 1984.
- HEBERT, J. Nitrogen. In: BONNEAU, M.; SOUCHER, B. (Eds.) **Constituents and properties of soil**. Academic Press, New York, p. 435-442, 1982.
- HEINRICHS, R. et al. Cultivo consorciado de aveia e ervilhaca: relação C/N da fitomassa e produtividade do milho em sucessão. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 331-340, 2001.
- HEINZMANN, F.X. Resíduos culturais de inverno e assimilação de nitrogênio por culturas de verão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 20, p. 1021-1030, 1985.
- HIREL, B. et al. Towards a better understanding of the genetic and physiological basis for nitrogen use efficiency in maize. **Plant Physiology**, v. 125, p. 1258-1270, 2001.
- HOLDERBAUM, J.F.; DECKER, A.M.; MEISINGER, J.J.; MULFORD, F.R.; VOUGH, L.R. Fall seeded legume cover crops for not-tillage corn in the humid East. **Agronomy Journal**, v. 82, n. 1, p. 117-124, 1990.
- HOLTZ, G.P. **Dinâmica da decomposição da palhada e da distribuição do carbono, nitrogênio e fósforo numa rotação de culturas sob plantio direto na região de Carambeí-PR**. 129f. Dissertação de Mestrado. Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1995.

HOOD R. et al. A comparison of direct and indirect ^{15}N isotope techniques for estimating crop N uptake from organic residues. **Plant and Soil**, v. 208, p. 259-270, 1999.

HUFFMAN, J.R. Effects of enhanced ammonium nitrogen availability for corn. **Journal Agronomy Education**, v. 18, p. 93-97, 1989.

INDICAÇÕES TÉCNICAS PARA O CULTIVO DE MILHO E DE SORGO NO RIO GRANDE DO SUL - 2006/2007. **LI Reunião Técnica Anual de Milho e XXXIV Reunião Técnica Anual de Sorgo**, Passo Fundo, RS, 11 a 13 de julho de 2006 / EMYGDIO, B. M.; TEIXEIRA, M. C. C (Orgs), Centro Nacional de Pesquisa de Trigo, Ministério de Agricultura, Pecuária e Abastecimento. – Passo Fundo: Embrapa Trigo, 2006. 184 p.

JAMA, B.A.; NAIR, P.K.R. Decomposition- and nitrogen- mineralization patterns of *Leucaena leucacephala* na *Cassia siamea* mulch under tropical semiarid conditions in Kenia. **Plant and Soil**, Netherland, v. 179, p. 275-285, 1996.

JANSSEN, B.H. Nitrogen mineralization in relation to C:N ratio and decomposability of organic materials. **Plant and Soil**, Netherland, v. 181, p. 39-45, 1996.

JANSSON, S.L.; PERSSON, J. Mineralization and immobilization of soil nitrogen. In: STEVENSON, F.J. (Ed.). **Nitrogen in agricultural soils**. ASA/SSSA, Madison, p. 225-252, 1982.

JENSEN, E.S. Nitrogen immobilization and mineralization during initial decomposition of ^{15}N -labelled pea and barley residues. **Biologic Fertility Soils**, Berlin, v. 24, p. 39-44, 1997.

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

KHOSLA, R.K., FLEMING, J.A., DELAGADO, T.M. Corn yield response to nitrogen at multiple in-field locations. **Agronomy Journal**, Madison, v. 94, n. 798-806, 2002.

KLAPWYK, J.H.; KETTERINGS, Q.M. Soil tests for predicting corn response to nitrogen fertilizer in New York. **Agronomy Journal**, Madison, v. 98, p. 675-681, 2006.

KOCH, B.; KHOSLA, R. Economic feasibility of variable-rate nitrogen application utilizing site-specific management zones. **Agronomy Journal**, Madison, v. 96, p.1572-1580, 2004.

KOENIG, R.T.; COCHRAN, V.L. Decomposition and nitrogen mineralization from legume and non-legume crop residues in a subarctic agricultural soil. **Biologic Fertility Soil**, Berlin, v. 17, p. 269-275, 1994.

KUDEYAROV, V. N. The nitrogen and carbon balance in soil. **Eurasian Soil Science**, Moscow, v. 32, p. 73-82, 1999.

KUMAR, K.; GOH, K.M. Nitrogen Release from crop residues and organic amendments as affected by biochemical composition. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**. v. 34, n. 17, p. 2441-2460, 2003.

LEMAINSKI, C.L. **Agricultura de precisão em áreas irrigadas com pivô central no Rio Grande do Sul**. 2007. 133f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

MA, B.L.; MORRISON, M.J.; DWYER, L.M. Canopy Light Reflectance and Field Greenness to Assess Nitrogen Fertilization and Yield of Maize. **Agronomy Journal**, Madison, v. 88, p. 915-920, 1996.

MACHADO, A.T. **Perspectiva do melhoramento genético em milho (*Zea mays* L.) visando eficiência na utilização do nitrogênio**. 1997. 219f. Tese de doutorado, Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 1997.

MAGDOFF, F. Understanding the Magdoff pre-sidedress nitrate test for corn. **J. Productivity Agriculture**, v. 4, p. 297-305, 1991.

MAI, M.E.M. et al. Manejo da adubação nitrogenada na sucessão aveia-preta/milho no sistema plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 1, p. 125-131, jan. 2003.

MARIN, V.A. et al. **Fixação biológica de nitrogênio: bactérias fixadoras de nitrogênio de importância para a agricultura tropical**. Obtido via base de dados da Embrapa Agrobiologia, Seropédica, RJ. Publicação online para download. Acessado em 20 fev., 2009. Disponível em: <http://www.cnpab.embrapa.br/publicacoes>.

MARTINAZZO, R. **Diagnóstico da fertilidade de solos em áreas sob plantio direto consolidado**. 2006. 84f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

MARY, B. et al. Interaction between decomposition of plant residues and nitrogen and nitrogen cycling in soil. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 181, p. 71-82, 1996.

- MIELNICZUK, J. Adubação do trigo no Brasil. In: Osório, E.A. **Trigo no Brasil**. Fundação Cargill, Campinas, v. 2, p. 291-317, 1982.
- MIELNICZUK, J. Rotação de culturas e níveis críticos de biomassa sobre o solo. In: 3º ENCONTRO SOBRE PLANTIO DIRETO NA PEQUENA PROPRIEDADE. Pato Branco, 1998. **Anais...** CD-ROM. Pato Branco, 1998.
- MINOLTA, C. **Manual for chlorophyll meter SPAD-502**. Osaka: Minolta Radiometric Instruments Divisions, 1989. 22 p.
- MITCHELL, W.H.; TELL, M.R. Winter-annual cover crops for no tillage corn production. **Agronomy Journal**, Madison, v. 69, p. 569-573, 1977.
- MONEGAT, C. **Plantas de cobertura de solo: características e manejo em pequena propriedade**. Fotomecânica Meredi ,Chapecó, 1991, 337 p.
- MONTEIRO, H.C.F.; et al. Dinâmica de decomposição e mineralização de nitrogênio em função da qualidade de resíduos de gramíneas e leguminosas forrageiras. **Revista Brasileira Zootecnia**, v. 31, n. 3, p. 1092-1102, 2002.
- MOOSE, S.P.; BELOW, F. E. Biotechnology approaches to improving maize nitrogen use efficiency, book chapter in Molecular Genetic Approaches to Maize Improvement. In: A.L. KRIZ AND B. A. LARKINS (Eds.) **Springer-Verlag**. <http://nitrogenes.cropsci.uiuc.edu>. Acesso: 30 de novembro de 2008.
- MOREIRA, F.M.S; SIQUEIRA, J.O. Transformações bioquímicas e ciclos dos elementos do solo. In: MOREIRA, F.M.S.; SIQUEIRA, J.O. (EDS). **Microbiologia e bioquímica do solo**. Editora UFLA, Lavras, 2002. 626 p.
- MOSIER, A.; SYERS, J.K; FRENEY, JR. Nitrogen fertilizer: an essential component of increased food, feed and fiber production. In: **Agriculture and the nitrogen cycle: assessing the impacts of fertilizer use on food production and the environment**. Scientific Committee on Problems of the Environment (SCOPE) Series, Island Press, v. 65, p. 3-18, 2004.
- MUZILLI, O. Cultura da soja: princípios e perspectivas de expansão. In: INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. **Plantio direto no Estado do Paraná**. IAPAR-Circular 23, Londrina, p. 11-14, 1981a.

MUZILLI, O. Desenvolvimento e produtividade das culturas. In: INSTITUTO AGRONÔMICO DO PARANÁ. **Plantio direto no Estado do Paraná**. IAPAR-Circular 23, Londrina, p. 199-203, 1981b.

MUZILLI, O. Influência do sistema de plantio direto, comparado ao convencional, sobre a fertilidade da camada arável do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 7, n. 1, p. 95-102, 1983.

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

MYNENY, R.B. et al. Optical remote sensing of vegetation: Modeling, Caveats, and Algorithms. **Remote Sensing of Environment**, v. 51, n. 1, p. 169-188, 1995.

NATIONAL RESEARCH COUNCIL [NRC]. **Precision agriculture in the 21st century: Geospatial and information technologies in crop management**. Rep. 59-0700-4-139. Washington, DC, 1997.

NEPTUNE, A. M. L. Efeito de diferentes épocas e modos de aplicação do nitrogênio na produção do milho, na quantidade de proteína, na eficiência do fertilizante e na diagnose foliar, utilizando o sulfato de amônio-¹⁵N. **Anais da Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz**, Piracicaba, v. 34, p. 515-539, 1977.

NOVAIS, M. V.; NOVAIS, R. F.; BRAGA, J. M. Efeito da adubação nitrogenada e de seu parcelamento sobre a cultura do milho, em Patos de Minas. **Revista Ceres**, Viçosa, v. 21, n. 115, p. 193-202, 1974.

OLIVEIRA, T.K.; CARVALHO, G.J.; MORAES, R.N.S. Plantas de cobertura e seus efeitos sobre o feijoeiro em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 37, p. 1079-1087, 2002.

OLSON, R.A; KURTZ, L.T. Crop nitrogen requirements, utilization, and fertilization. In: STEVENSON, F.J. Nitrogen in agricultural soils. **Soil Science Society America Journal**, Madison, p. 567-604, 1982.

OLSON, R.V. Fate of tagged nitrogen applied to irrigated corn. **Soil Science Society America Journal**, n. 44, p. 514-517, 1980.

PALM, C.A.; SANCHEZ, P.A. Nitrogen release from the leaves of some tropical legumes as affected by their lignin and polyphenolic contents. **Soil Biologic Biochemistry**, n. 23, n.1, p. 83-88, 1991.

- PARTON, W. et al. Global-scale similarities in nitrogen release patterns during long-term decomposition. **Science**, v. 315, 19 de Janeiro de 2007.
- PAUL, E.A.; CLARK, F.E. **Soil microbiology and biochemistry**. 2.ed. California, Academic Press, 1996. 340p.
- PENG, S. et al. Increased N-use efficiency using a chlorophyll meter on high-yielding irrigated rice. **Field Crop Research**, v. 47, p. 243-252, 1996.
- PHILLIPS, S.H.; YOUNG JUNIOR, H.M. **No tillage farming**. Milwaukee, Reiman Associates, 1973. 224 p.
- PLANTAE, A.F.; PARTON, W.J. The dynamics of soil organic matter and nutrient cycling. In: PAUL, E. **Soil Microbiology, ecology, and biochemistry**. 3ª edição, p. 433-464, 2007.
- PONTELLI, C.B. **Caracterização da variabilidade espacial das características químicas do solo e da produtividade das culturas utilizando as ferramentas da agricultura de precisão**. 2006. 112f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) Programa de Pós-Graduação em Agronomia – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.
- PÖTTKER, D.; ROMAN, E. S. Efeito de resíduos de culturas e do pousio de inverno sobre a resposta do milho a nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, n. 29, p. 763-770, 1994.
- POWER, J.F.; LEGG, J.O. Nitrogen-15 recovery for five years after application of ammonium nitrate to crested wheatgrass. **Soil Science Society America Journal**, n. 48, p. 322-26, 1984.
- PRADO, T.; C. KANG. Economic and water quality effects of variable and uniform application of nitrogen. **J. America Water Resource Associate**, n. 34, p. 1465-1472, 1998.
- PURCINO, A. A. C.; MAGNAVACA, R.; MACHADO, A. T.; MARRIEL, E. E. Atividade da redutase do nitrato em genótipos antigos e modernos de milho, cultivados sob dois níveis de nitrogênio. **Revista Brasileira de Fisiologia Vegetal**, Londrina, v. 6, n. 1, p. 41-46, 1994.
- PURCINO, A.A.C. et al. Como as plantas utilizam os fertilizantes nitrogenados. **Revista Cultivar**, abril de 2000.
- RAIJ, B. van. Sistema integrado de nutrição de plantas. In: Pereira, J.R.; Faria, C.M.B. **Fertilizantes: insumo básico para agricultura e combate à fome**. EMBRAPA-CPATSA/SBCS, Petrolina, p.116-123, 1995.

- RAMBO, L. et al. Testes de nitrato no solo como indicadores complementares no manejo da adubação nitrogenada em milho. **Ciência Rural**, v. 34, p. 1279-1287, 2004.
- RAMBO, L. et al. Monitoramento do nitrogênio na planta e no solo para predição da adubação nitrogenada em milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 42, n. 3, p. 407-417, 2007.
- RAMBO, L. et al. Adequação de doses de nitrogênio em milho com base em indicadores de solo e de planta. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 3, p. 401-409, mar./abr., 2008.
- RAUN, W.R.; JOHNSON, G.V. Improving nitrogen use efficiency for cereal production. **Agronomy Journal**, v. 91, p. 357-363, 1999.
- REEVES, D.W. Cover crops and rotations. In: HATFIELD, J.L.; STEWART, B.A. Crops residue management. **Advances in soil science**. Lewis publishers, Florida, p.125-172, 1994.
- RHEINHEIMER, D. S. et al. **Situação da fertilidade dos solos no Estado do Rio Grande do Sul**. (Boletim técnico 2), Departamento de Solos, UFSM, Santa Maria, 2001. 41p.
- ROBERTSON, G.P. ; GROFFMAN, P.M. Nitrogen transformations. In: PAUL, E. **Soil microbiology, ecology and biochemistry**. 3ª edição, p. 341-264. 2007.
- ROSSATO, R.R. **Potencial de ciclagem de nitrogênio e potássio pelo nabo forrageiro intercalar ao cultivo do milho e trigo sob plantio direto**. 2004. 106f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) Programa de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.
- ROY, S.; SINGH, J.S. Seasonal and spatial dynamics of plant-available N and P pools and N-mineralization in relation to tine roots in a dry tropical forest habitat. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 27, p. 33-40, 1995.
- SÁ, J.C.M. **Manejo de nitrogênio na cultura de milho no sistema plantio direto**. Passo Fundo: Aldeia Norte, 23 p., 1996.
- SALET, R.L. **Dinâmica de íons na solução de um solo submetido ao sistema plantio direto**. 1994. 110f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1994.

SALET, R.L. et al. Por que a disponibilidade de nitrogênio é menor no sistema plantio direto? In: SEMINÁRIO INTERNACIONAL DO SISTEMA PLANTIO DIRETO, 2., 1997, Passo Fundo-RS. **Anais...** Passo Fundo-RS: Aldeia Norte, p. 217-219, 1997.

SALSAC, L. et al. Nitrate and ammonium nutrition in plants. **Plant Physiology Biochemistry**, v. 25, p. 805–812, 1987.

SANCHEZ, P. **Properties and management of soils in the tropics**. John Wiley, New York, 1976. 618 p.

SANTI, A., AMADO, T. J.C.; ACOSTA, J.A.A. Adubação nitrogenada na aveia preta. I - influência na produção de matéria seca e ciclagem de nutrientes sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 1075-1083, 2003.

SANTOS, M.X. et al. Melhoramento intrapopulacional no Sintético Elite NT para solos pobres em nitrogênio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 33, p. 55-61, 1998.

SAS INSTITUTE (Cary, Estados Unidos). **SAS user's guide**: statistic. Cary, 1990. 846p.

SCHMIDT, J.P. et al. Corn yield response to nitrogen at multiple in-field locations. **Agronomy Journal**, v. 94, p. 798-806, 2002.

SCHOMBERG, H.H.; STEINER, J.L. Nutrient dynamics of crop residues decomposing on a fallow no-till surface. **Soil Science Society America Journal**, Madison, v. 63, p. 607-613, 1994.

SCHULTE, E.E.; BUNDY, L.G. Sampling soils for testing under conservation tillage. **Better Crops with Plant Food**, v. 69, p. 22-23, 1985.

SCHULTEN, H.R.; SCHNITZER, M. The chemistry of soil organic nitrogen: a review. **Biologic Fertility Soils**, Berlin, v. 26, p. 1-15, 1998.

SCIVITTARO, W.B. et al. Transformações do nitrogênio proveniente de mucuna-preta e uréia utilizados como adubo na cultura do milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, p. 1427-1433, 2003.

SHANAHAN, J.F. Use of Remote-Sensing imagery to estimate to corn grain yield. **Agronomy Journal**, v. 93, p. 583-589, 2001.

SIDIRAS, N.; PAVAN, M.A. Influência do sistema de manejo do solo no seu nível de fertilidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, p. 207-214, 1985.

- SILVA, A.A. Sistemas de coberturas de solo no inverno e seus efeitos sobre o rendimento de grãos do milho em sucessão. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 37, n. 4, p. 928-935, jul./ago., 2007.
- SILVA, E.C. et al. Absorção de nitrogênio nativo do solo pelo milho sob plantio direto em sucessão a plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 30, p. 723-732, 2006.
- SILVA, E.C. et al. Acúmulo de nutrientes em plantas de cobertura e no milho cultivado em sucessão sob diferentes doses de nitrogênio em plantio direto. **Revista Brasileira de Milho e Sorgo**, v. 5, n. 2, p. 202-217, 2006.
- SILVA, E.C. et al. Aproveitamento do nitrogênio (^{15}N) da crotalária e do milheto pelo milho sob plantio direto em Latossolo Vermelho de Cerrado. **Ciência Rural**, v.36, n.3, mai./jun., 2006.
- SILVA, E.C. et al. Manejo de nitrogênio no milho sob plantio direto com diferentes plantas de cobertura, em Latossolo Vermelho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 41, n. 3, p. 477-486, mar./abr., 2006.
- SILVA, E.C. et al. Utilização do nitrogênio (^{15}N) residual de coberturas de solo e da uréia pela cultura do milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, n. 30, p. 965-974, 2006.
- SILVA, P.R.F. et al. Estratégias de manejo de coberturas de solo no inverno para cultivo do milho em sucessão no sistema semeadura direta. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 3, p. 1011-1020, mai./jun., 2006.
- SINGH, B. et al. Chlorophyll meter and leaf color chart based nitrogen management for rice and wheat in northwestern India. **Agronomy Journal**, v. 94, p. 821-829, 2002.
- SNYDER, C. et al. Evaluating the economics of precision agriculture. p. 1621-1632. In P.C. ROBERT, R.H. RUST; W.E. LARSON (Ed.) **Precision Agriculture**. Proc. Int. Conf., 4th, St. Paul, MN. 19-22 July 1998. ASA, CSSA, and SSSA, Madison, WI, 1999.
- SOIL SURVEY STAFF. Keys to soil taxonomy. Ninth edition. **Natural Resources Conservation Service**. U.S.A Department of Agriculture, 2003.
- SPAGNOLLO, E. **Plantas de cobertura intercalares ao milho em sistemas de cultivo mínimo e convencional**. 2000. 121 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages, 2000.

STEVENSON, F.J. **Cycles of soil-carbon, nitrogen, phosphorus, sulfur, micronutrients.** John Willey & Sons, New York, 1986. 380 p.

STEVENSON, F.J. Organic forms of soil nitrogen. In: STEVENSON, F.J (Ed.). **Nitrogen in agricultural soils.** ASA/SSSA, Madison, p. 67-122, 1982b.

STIPP, S.R.; PROCHNOW, L.I. Maximização da eficiência e minimização dos impactos ambientais da adubação nitrogenada. **Informações agrônomicas**, Piracicaba, n. 124, p. 1-7, nov./dez., 2008.

SUNDERMAN, H. D.; PONTIUS, J. S.; LAWLESS, J. R. Variability in leaf chlorophyll concentration among fully-fertilized corn hybrids. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 28, n. 19, p. 1793-1803, 1997.

TEDESCO, M.J. et al. **Análises de solos, plantas e outros materiais.** Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174 p.

TEIXEIRA, L.A.J.; TESTA, V.M.; MIELNICZUK, J. Nitrogênio do solo, nutrição e rendimento do milho afetados por sistemas de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, 18:249-254, 1994.

THOMAS, G.W.; FRYE, W.W. Fertilization and liming. In: Phillips, E.R.; Phillips, S.H. **No-tillage agriculture: principles and practices.** New York: Van Nostrand Reinhold Company, p.87-126, 1984.

THRIKAWALA, S.; WEERSINK, G; KACHANOSKI; FOX, G. Economic feasibility of variable-rate technology for nitrogen on corn. **America Journal Agriculture Economy.** v. 81, p. 914-927, 1999.

TIAN, G.; KANG, B.T.; BRUSSAARD, L. Biological effects of plant residues with contrasting chemical compositions under humid tropical conditions-decomposition and nutrient release. **Soil Biologic Biochemistry Exter.**, v. 24, p. 1051-1060, 1992.

TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G.; FABIAN, A. J. Produção de fitomassa por plantas de cobertura e mineralização de seus resíduos em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, p. 421-428, 2008.

UHART, S.A.; ANDRADE, F.H. Nitrogen deficiency in maize. I. Effects on crop growth, development, dry matter partitioning, and kernel set. **Crop Science**, v. 35, p.1376-1383, 1995.

- UHART, S.A.; ANDRADE, F.H. Nitrogen deficiency in maize. II. Carbon-nitrogen interaction effects on kernel number and grain yield. **Crop Science**, v. 35, p. 1384-1389, 1995.
- URQUIAGA, S.; BODDEY, R.M.; ALVES, B.J.R. Dinâmica de N no solo. In: SIMPÓSIO BRASILEIRO SOBRE NITROGÊNIO EM PLANTAS, 1., 1990, Itaguaí. **Anais**. UFRRJ-Imprensa Universitária, Itaguaí, p.181-251, 1990.
- VARGAS, L.K.; SCHOLLES, D. Nitrogênio da biomassa microbiana, em sistemas de manejo do solo, estimado por métodos de fumigação. **Revista Brasileira de Ciência Solo**, Viçosa, v. 22, n. 3, p. 411-417, 1998.
- VARGAS, L.K.; SELBACH, P.A.; SÁ, E.L.S. Imobilização de nitrogênio em solo cultivado com milho em sucessão à aveia preta nos sistemas plantio direto e convencional. **Ciência Rural**, v. 35, n. 1, p. 76-83, jan-fev, 2005.
- VICTORIA, R.L., PICCOLO, M.C.; VARGAS, A.A.T. O ciclo do nitrogênio. In: **Microbiologia do solo**, (Eds): Cardoso, E.J.B.N; TSAI, M.; NEVES, C.P. Campinas, Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, p. 105-120, 1992.
- WANG, X., AND F.E. BELOW. Root growth, nitrogen uptake, and tillering of wheat induced by mixed-nitrogen source. **Crop Science**, n. 32, p. 997-1002, 1992.
- WASKOM, R.M. et al. Monitoring nitrogen status of corn with a portable chlorophyll meter. **Communications. Soil Science and Plant Analysis**, New York, v. 27, n. 3, p. 545-560, 1996.
- WELLS, P.L.G.; CRASWELL, E.T. Effect of nitrogen source and management on ammonia volatilization losses from flooded rice-soil systems. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v. 43, n. 2, p. 352-358, 1979.
- WHITE, C.S. et al. Nitrogen mineralization-immobilization response to field N or C perturbations: an evaluation of a theoretical model. **Soil Biology and Biochemistry**, Oxford, v. 20, n. 1, p. 101-105, 1988.
- WIEDER, R.K.; LANG, G.E. A critique of the analytical methods used in examining decomposition data obtained from litter bags. **Ecology**, n. 63, p. 1636-1642, 1982.
- WIETHÖLTER, S. **Adubação nitrogenada em triticale com base no teor de matéria orgânica do solo**. Passo Fundo: EMBRAPA-CNPT, 1993. 25 p.

WIETHÖLTER, S. **Adubação nitrogenada no sistema plantio direto**. EMBRAPA-CNPT, Passo Fundo, 1996. 44 p.

YAMADA, T.; ABDALLA, S. R. S. Como melhorar a eficiência da adubação nitrogenada do milho? **Informações Agronômicas**, Piracicaba, n. 91, p. 5-11, jul./set, 2000.

YANAI, J. et al. Effects of inorganic nitrogen application on the dynamics of the soil solution composition in the root zone of maize. **Plant and Soil**, The Hague, v.180, n.1, p. 1-9, Mar. 1996.

ZOTARELLI, L et al. **Calibração do medidor de clorofila Minolta SPAD-502 para uso na cultura do milho**. Embrapa Agrobiologia, Comunicado técnico 55, Rio de Janeiro, 2003. 4 p.

12 APÊNDICES

Apêndice 1 – Precipitação mensal ocorrida nos anos de 2003, 2004 e 2005.

Meses do ano	2003	2004	2005	Média dos últimos 30 anos ¹
----- mm -----				
Janeiro	177,8	21,7	49,8	145,1
Fevereiro	204,7	110,8	59,4	130,2
Março	342,4	94,1	55,5	151,7
Abril	190,0	101,5	271,1	134,7
Maio	691,0	80,5	183,7	129,1
Junho	170,5	72,1	106,5	144,0
Julho	113,0	72,5	56,2	148,6
Agosto	73,9	85,4	81,1	137,4
Setembro	57,0	96,3	212,5	153,6
Outubro	193,4	119,7	284,3	145,9
Novembro	228,6	147,7	57,2	132,2
Dezembro	357,0	62,2	101,9	132,5

¹ Informações obtidas da Estação Meteorológica da Universidade Federal de Santa Maria.

Apêndice 2 – Temperatura média mensal ocorrida nos anos de 2003, 2004 e 2005.

Meses do ano	2003	2004	2005	Média dos últimos 30 anos ¹
----- mm -----				
Janeiro	25,3	25,0	25,9	24,6
Fevereiro	25,1	23,0	24,3	24,0
Março	22,6	24,3	23,7	22,2
Abril	18,8	21,2	19,1	18,8
Maio	16,5	14,5	17,8	16,0
Junho	15,9	15,5	17,8	12,9
Julho	13,4	13,1	14,1	13,5
Agosto	13,5	15,2	16,8	14,6
Setembro	15,9	18,4	14,8	16,2
Outubro	20,0	18,5	18,5	18,8
Novembro	21,6	21,1	22,1	21,4
Dezembro	21,9	23,8	23,4	22,7

⁽¹⁾ Informações obtidas da Estação Meteorológica da Universidade Federal de Santa Maria.

OBS: Dados das médias dos últimos 30 anos são do período de 1961-1990.

Os valores das médias foram retirados do:
 Ministério da Agricultura e do Abastecimento – MA
 Instituto Nacional de Meteorologia – INMET
 Oitavo Distrito de Meteorologia – 8ª DISME

Apêndice 3 – Densidade aparente do solo em diferentes camadas na implantação do experimento em maio de 2003.

Repetições	Densidade aparente do solo			
	0 – 5 cm	5 – 10 cm	10 – 20 cm	20 – 40 cm
	----- g cm ⁻³ -----			
I	1,51	1,71	1,69	1,54
II	1,27	1,76	1,72	1,74
III	1,52	1,52	1,67	1,73
IV	1,22	1,76	1,63	1,69
Média	1,38	1,68	1,68	1,67

Apêndice 4 – Quantidade de matéria seca aérea das culturas de cobertura adicionada manualmente ao solo em função dos níveis de resíduos.

Cultura de cobertura	Nível de resíduos	I	II	III	Média ¹	CV%
----- Ano agrícola de 2003 -----						
----- Mg ha ⁻¹ -----						
Aveia Preta	Baixo	3,12	3,41	3,03	3,19	6,2
	Médio	5,91	5,49	7,30	6,24	15,2
	Alto	7,30	9,23	9,78	8,77	14,9
Nabo forrageiro	Baixo	3,59	3,68	3,10	3,46	9,0
	Médio	6,86	7,75	5,10	6,57	20,5
	Alto	9,74	7,95	10,24	9,31	12,9
Ervilhaca	Baixo	2,81	2,26	2,51	2,53	10,9
	Médio	5,41	5,67	5,79	5,62	3,5
	Alto	7,23	8,01	8,43	7,89	7,7
					Média	11,2
----- Ano agrícola de 2004 -----						
----- Mg ha ⁻¹ -----						
Aveia Preta	Baixo	2,85	3,26	2,37	2,83	15,8
	Médio	6,54	4,37	5,53	5,48	19,8
	Alto	8,69	9,31	8,43	8,81	5,1
Nabo forrageiro	Baixo	3,02	2,64	2,55	2,73	9,1
	Médio	6,03	6,30	5,03	5,79	11,6
	Alto	8,68	8,62	9,72	9,00	6,9
Ervilhaca	Baixo	2,72	2,70	2,51	2,64	4,4
	Médio	5,31	5,63	4,37	5,10	12,8
	Alto	8,34	7,96	7,40	7,90	6,0
					Média	10,2

¹ Média de 3 repetições.

Apêndice 5 – Relação entre a produção de matéria verde e matéria seca produzido pelas culturas de cobertura em setembro de 2003.

Bloco/Amostra	Aveia			Nabo forrageiro			Ervilhaca			
	MV	MS	MV/MS	MV	MS	MV/MS	MV	MS	MV/MS	
	--- Mg ha ⁻¹ ---			--- Mg ha ⁻¹ ---			--- Mg ha ⁻¹ ---			
Bloco 1	I	23,03	5,15	4,5	44,00	6,91	6,4	34,66	5,87	5,9
	II	22,14	6,11	3,6	45,00	7,10	6,3	36,81	5,71	6,4
	III	21,23	5,01	4,2	81,03	11,45	7,1	22,19	5,15	4,3
	IV	28,34	7,39	3,8	84,53	13,51	6,3	26,24	4,90	5,4
Bloco 2	I	27,20	6,49	4,2	73,12	9,42	7,8	23,05	4,71	4,9
	II	18,65	4,68	4,0	66,01	9,53	6,9	30,00	8,52	3,5
	III	19,12	4,81	4,0	35,77	5,72	6,2	22,98	5,09	4,5
	IV	26,15	5,98	4,4	48,34	7,15	6,8	20,13	4,36	4,6
Bloco 3	I	27,45	6,99	3,9	63,77	8,98	7,1	32,89	8,39	3,9
	II	21,72	5,61	3,9	57,36	7,39	7,8	20,58	3,91	5,3
	III	36,77	9,54	3,9	55,32	9,25	6,0	27,22	6,23	4,4
	IV	27,37	7,07	3,9	116,43	15,34	7,6	30,52	4,63	6,6
Médias	24,93	6,24	4,0	64,22	9,31	6,8	27,27	5,62	5,0	

Apêndice 6 – Variação percentual entre a produção real (MSr) e produção estimada (MSe) de matéria seca em 2004 em função do índice MV/MS obtido com as culturas de cobertura em 2003.

Amostra/Bloco	Aveia				Nabo forrageiro				Ervilhaca				
	MV	MSe	MSr	Δ%	MV	MSe	MSr	Δ%	MV	MSe	MSr	Δ%	
	----- Mg ha ⁻¹ -----				----- Mg ha ⁻¹ -----				----- Mg ha ⁻¹ -----				
Bloco 1	I	22,79	5,70	4,17	36,6	42,42	6,03	6,24	3,4	25,7	5,2	5,3	-2,9
	II	26,16	6,54	6,56	-0,3	41,74	5,66	6,14	8,4	28,1	5,6	5,6	-0,1
	III	19,36	4,84	4,75	1,8	41,79	6,03	6,15	1,9	35,9	7,2	5,4	32,0
Bloco 2	I	20,20	5,05	4,87	3,6	41,79	6,30	6,15	-2,4	35,9	7,2	5,6	27,5
	II	17,49	4,37	4,68	-6,6	24,47	3,82	3,60	-5,8	35,1	7,0	5,4	30,3
Bloco 3	I	26,07	6,52	6,36	2,4	34,78	5,30	5,11	-3,5	26,1	5,2	5,1	1,3
	II	20,25	5,06	5,19	-2,5	46,68	7,17	6,87	-4,2	24,0	4,8	4,4	9,8
	III	22,11	5,53	5,67	-2,5	29,04	4,46	4,27	-4,1	26,6	5,3	5,0	6,2
Médias	18,95	4,74	4,68	1,3	35,65	5,09	5,24	2,9	23,9	4,8	4,3	12,1	
Médias	21,49	5,37	5,22	3,8	37,60	5,54	5,53	-0,4	29,04	5,81	5,13	12,9	

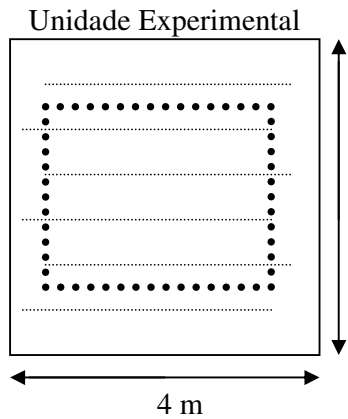
Apêndice 7 – Calendário das principais atividades desenvolvidas durante o experimento descrito no Capítulo I, II e III.

Atividades	2003	2004
Plantio das culturas de cobertura (C.C.)	17/05	22/05
Início do manejo das C.C.	07/10	23/09
Plantio de milho	18/10	14/10
Adubação nitrogenada de Base	20/10	18/10
1ª Cobertura nitrogenada	22/11	20/11
2ª Cobertura nitrogenada	10/12	08/12
Florescimento do milho	10/01	06/01
Colheita de grãos de milho	17/03	30/03

Apêndice 8 – Resultado das análises químicas do solo, em diferentes profundidades, antes da instalação do experimento em maio de 2003.

Profundidade	Argila	pH em água	Cátions trocáveis				P (Mehlich-1)	MOS	Saturação por Al ³⁺	Saturação por bases
			Al ³⁺	Ca ²⁺	Mg ⁺²	K ⁺				
----- cm -----	-- % --	-----	cmolc.dm ³	-----	-----	mg.dm ³	-----	%	-----	
0 a 5	16	4,9	0,3	1,9	0,6	94	27,0	1,4	10	52
0 a 10	16	5,0	0,3	1,7	0,5	90	21,3	1,2	11	54
0 a 20	16	4,9	0,3	1,5	0,4	70	27,0	1,1	13	50

Apêndice 9 – Croqui do experimento de campo (Estudos dos Capítulos I a IV).



..... linhas de milho
 área útil de milho

Bloco III

85 A a 0	86 A a 60	87 A a 120	88 A a 180	89 A m 0	90 A m 180	91 A m 60	92 A m 120	93 A b 120	94 A b 180	95 A b 0	96 A b 60	97 E m 120	98 E m 0	99 E m 180	100 E m 60	101 E b 180	102 E b 60	103 E b 0	104 E b 120	105 E a 180	106 E a 60	107 E a 120	108 E a 0	109 D 0	110 D 60	111 D 180	112 D 120
-------------------	--------------------	---------------------	---------------------	-------------------	---------------------	--------------------	---------------------	---------------------	---------------------	-------------------	--------------------	---------------------	-------------------	---------------------	---------------------	----------------------	---------------------	--------------------	----------------------	----------------------	---------------------	----------------------	--------------------	---------------	----------------	-----------------	-----------------

Bloco II

49 E m 60	50 E m 120	51 E m 180	52 E m 0	53 E b 120	54 E b 0	55 E b 60	56 E b 180	57 E b 60	58 E b 120	59 E a 0	60 E a 180	61 A a 120	62 A a 0	63 A a 60	64 A a 180	65 A m 120	66 A m 0	67 A m 180	68 A m 60	69 A m 60	70 A b 180	71 A b 0	72 A b 120	1 N m 60	2 N m 0	3 N m 120	4 N m 180	5 N a 180	6 N a 60	7 N a 120	8 N a 0	9 N a 0	10 N b 180	11 N b 120	12 N b 60	117 D 120	118 D 0	119 D 60	120 D 180
--------------------	---------------------	---------------------	-------------------	---------------------	-------------------	--------------------	---------------------	--------------------	---------------------	-------------------	---------------------	---------------------	-------------------	--------------------	---------------------	---------------------	-------------------	---------------------	--------------------	--------------------	---------------------	-------------------	---------------------	-------------------	------------------	--------------------	--------------------	--------------------	-------------------	--------------------	------------------	------------------	---------------------	---------------------	--------------------	-----------------	---------------	----------------	-----------------

Bloco I

Galpão de Solos
 UFSM
 500 m

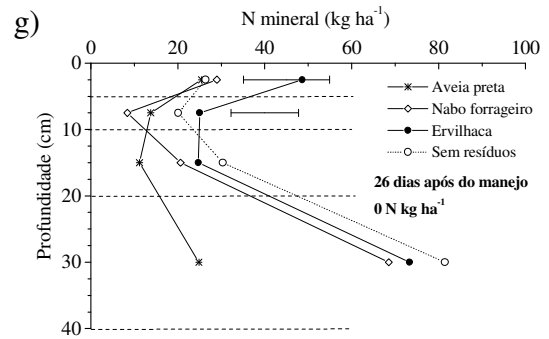
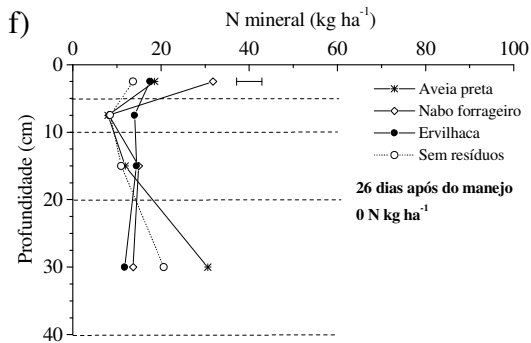
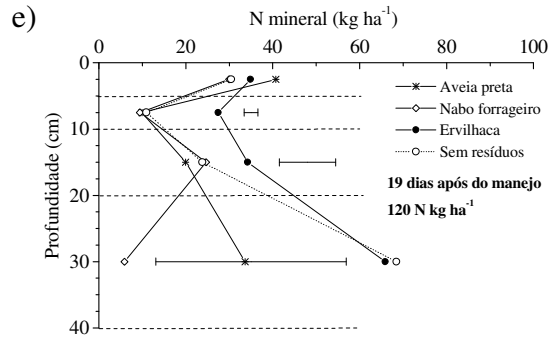
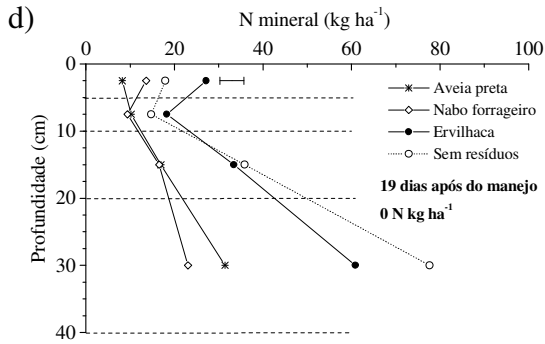
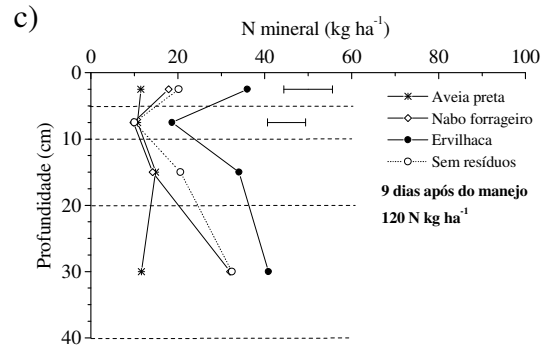
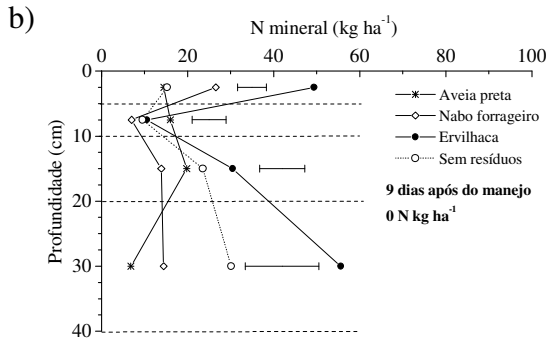
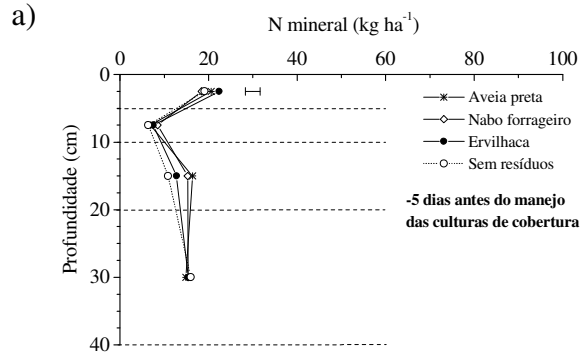


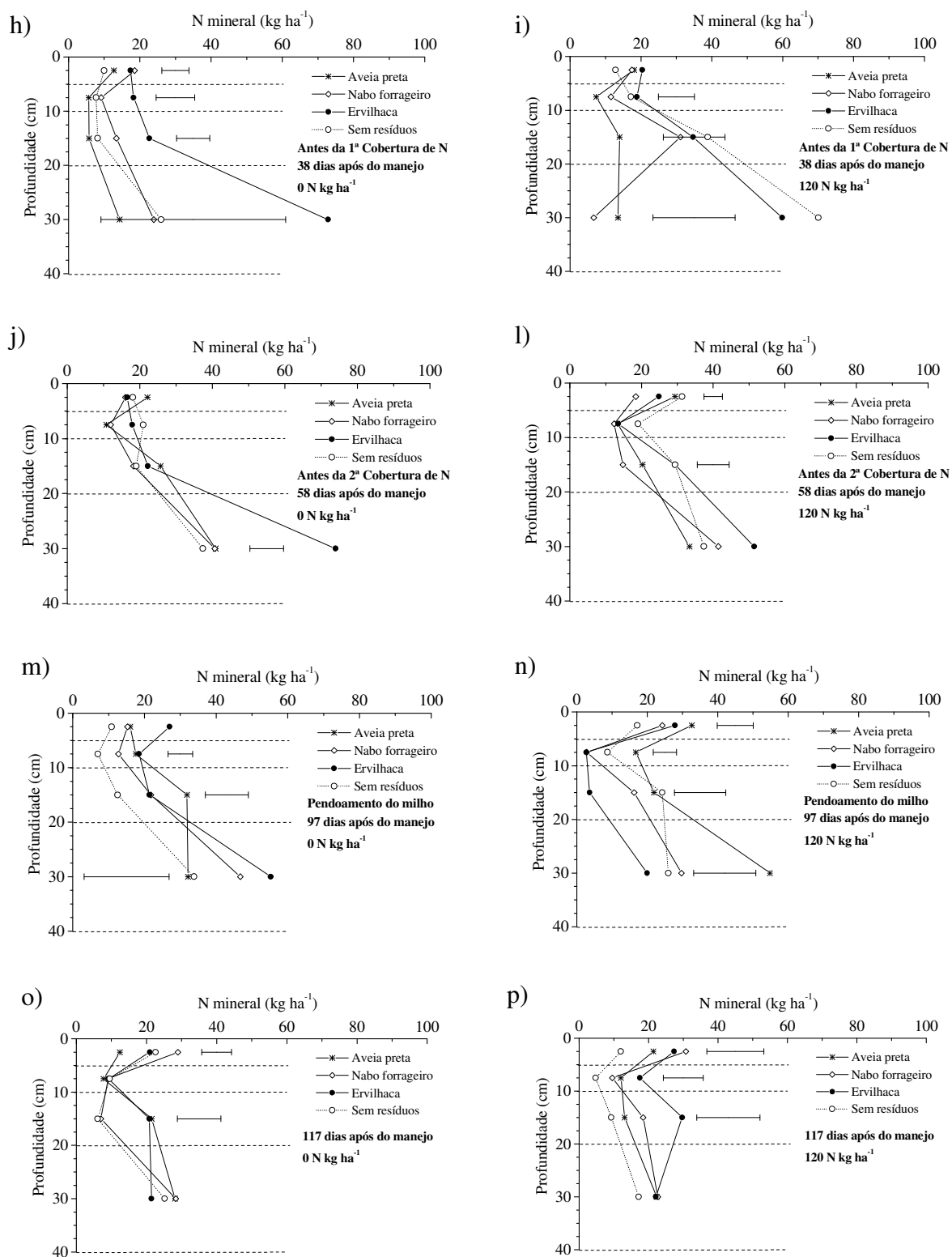
<p>Parcela principal (1º nível) Culturas de cobertura >> Aveia preta (A) >> Ervilhaca (E) >> Nabo forrageiro (N)</p>	<p>Parcela secundária (2º nível) Quantidade de resíduos >> Baixa (b) >> Média (m) >> Alta (a)</p>	<p>Parcela experimental (3º nível) Níveis de nitrogênio >> 0 kg N ha⁻¹ >> 60 kg N ha⁻¹ >> 120 kg N ha⁻¹ >> 180 kg N ha⁻¹</p>
<p>Localização: Área experimental do Depto de Solo da UFSM Santa Maria Rio Grande do Sul Brasil</p>	<p>Latitude: 29° 45' Longitude: 53° 42' Altitude média: 95 m Média do mês + frio: 9,3°</p>	<p>Média do mês + quente: 31,8° Precipitação média: 1769 mm</p>
<p>Solo: Argissolo Vermelho Distrófico arênico Clima: Subtropical úmido, Cfa2</p>	<p>Delineamento experimental: Trifatorial com parcelas subsubdivididas e tratamento adicional. (Sem resíduos (D))</p>	<p>Área útil das culturas de cobertura: 12 m² (4x3m) Área útil no milho: 10,8 m² (3 x 3,6 m) Espaço. entrelinhas: 0,90 m Área total: 6400 m² (160x40m)</p>

Açude

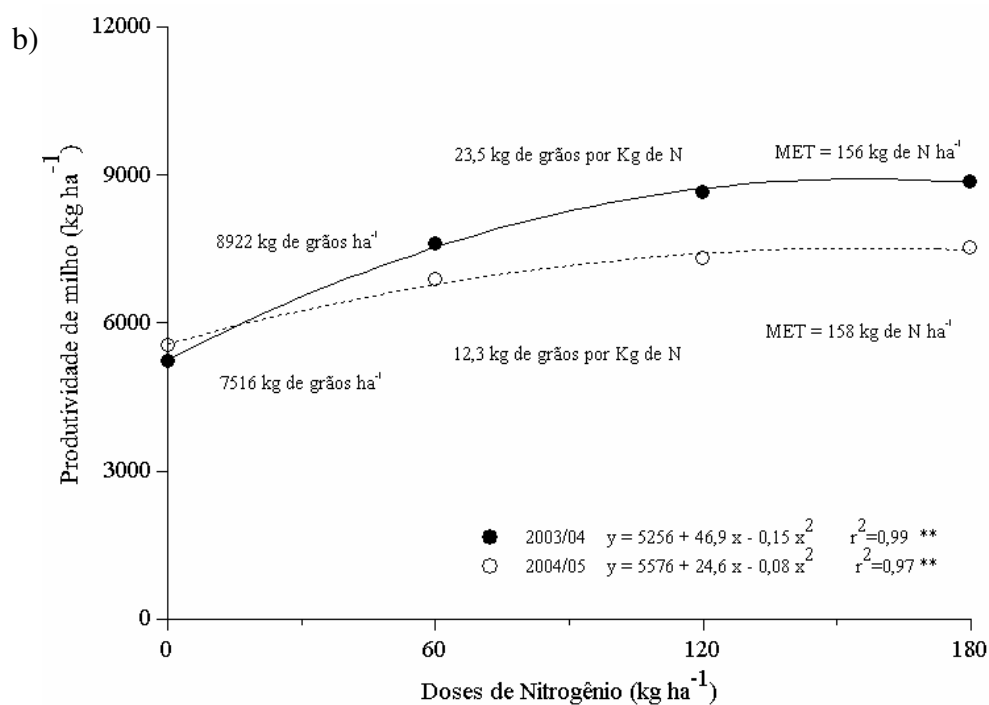
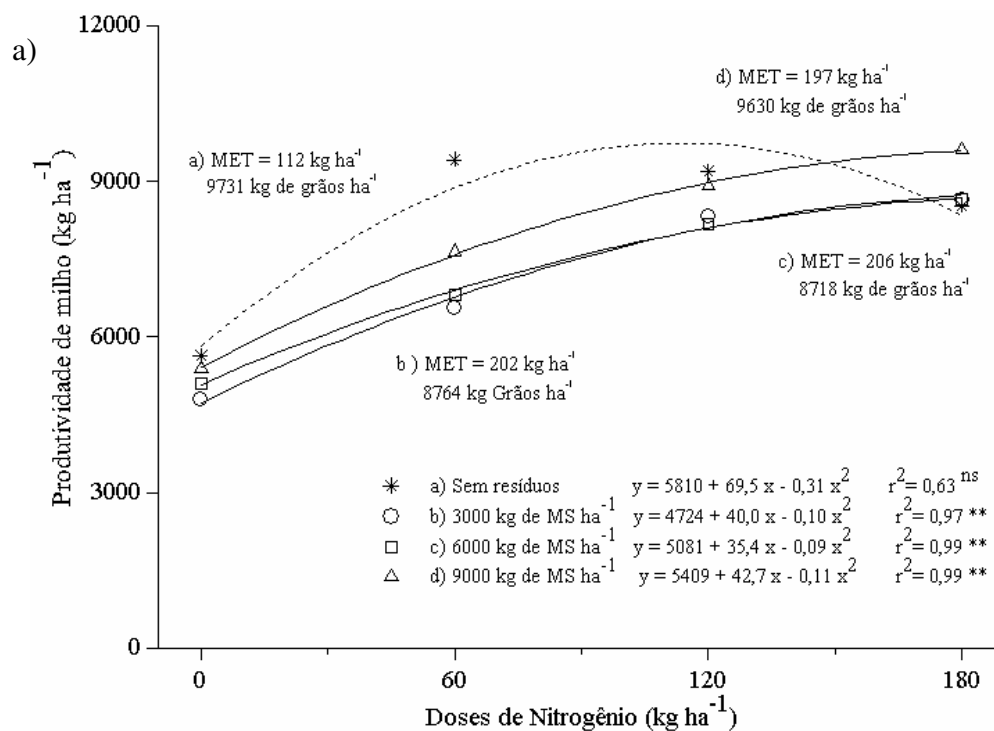


50 m

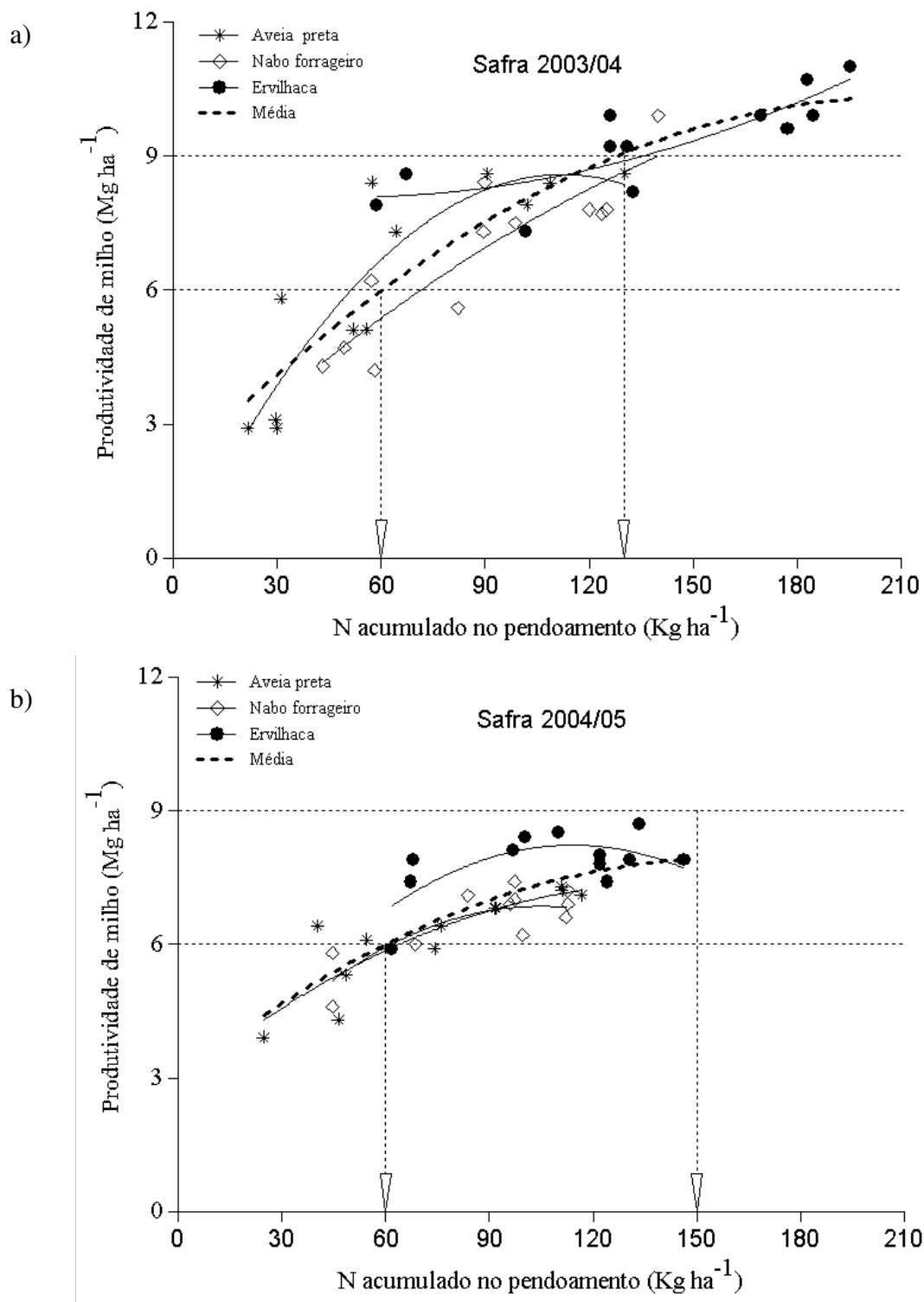




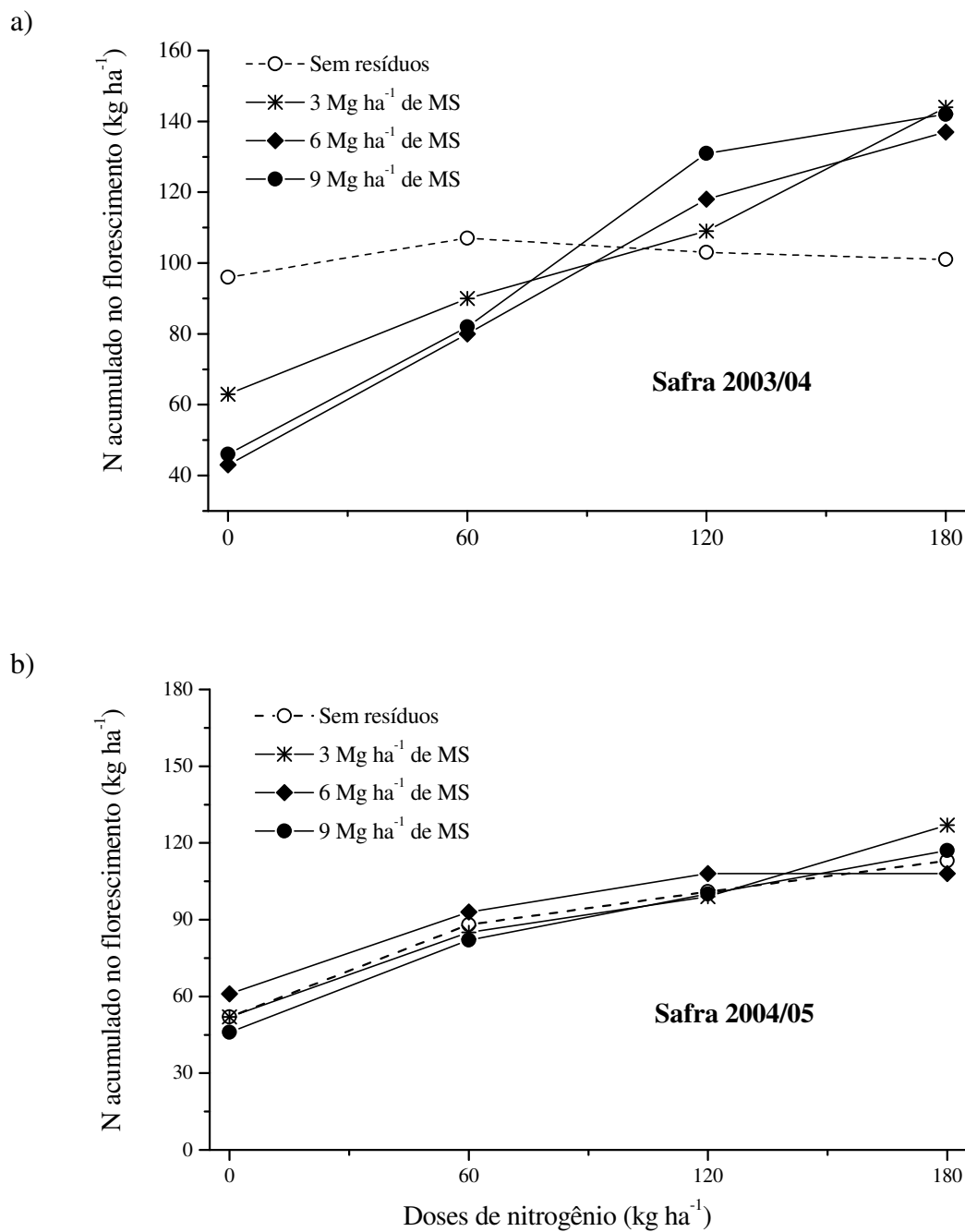
Apêndice 10 – Distribuição do N mineral ($N-NO_3^- + N-NH_4^+$) no perfil do solo durante o desenvolvimento do milho em função do aporte de diferentes resíduos de cultura de cobertura e doses de N na safra 2003/04. DMS = Diferença Mínima Significativa.



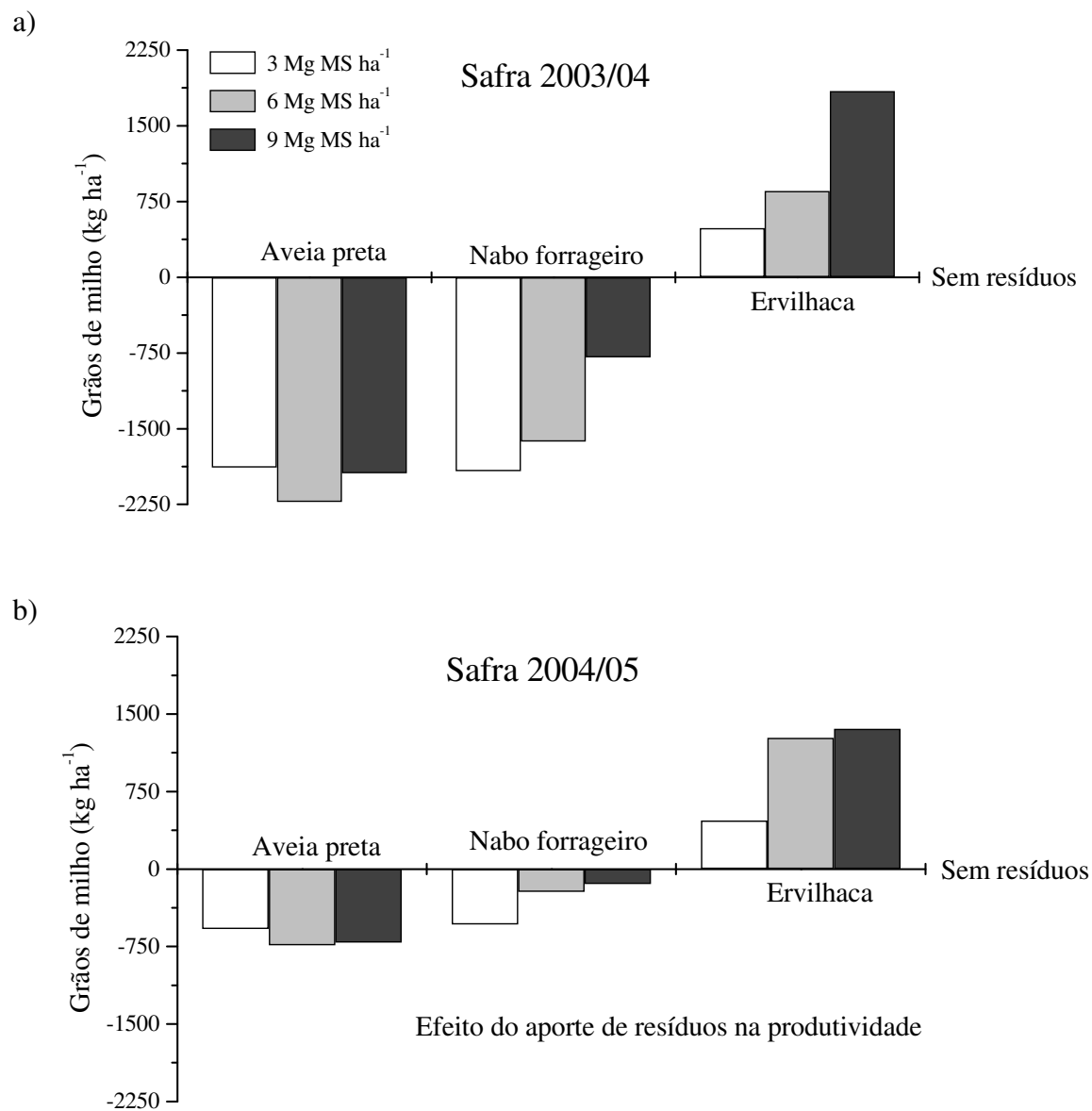
Apêndice 11 – Curvas médias de resposta a doses de N em função dos níveis de resíduos (a) e curvas médias de resposta do experimento (b).



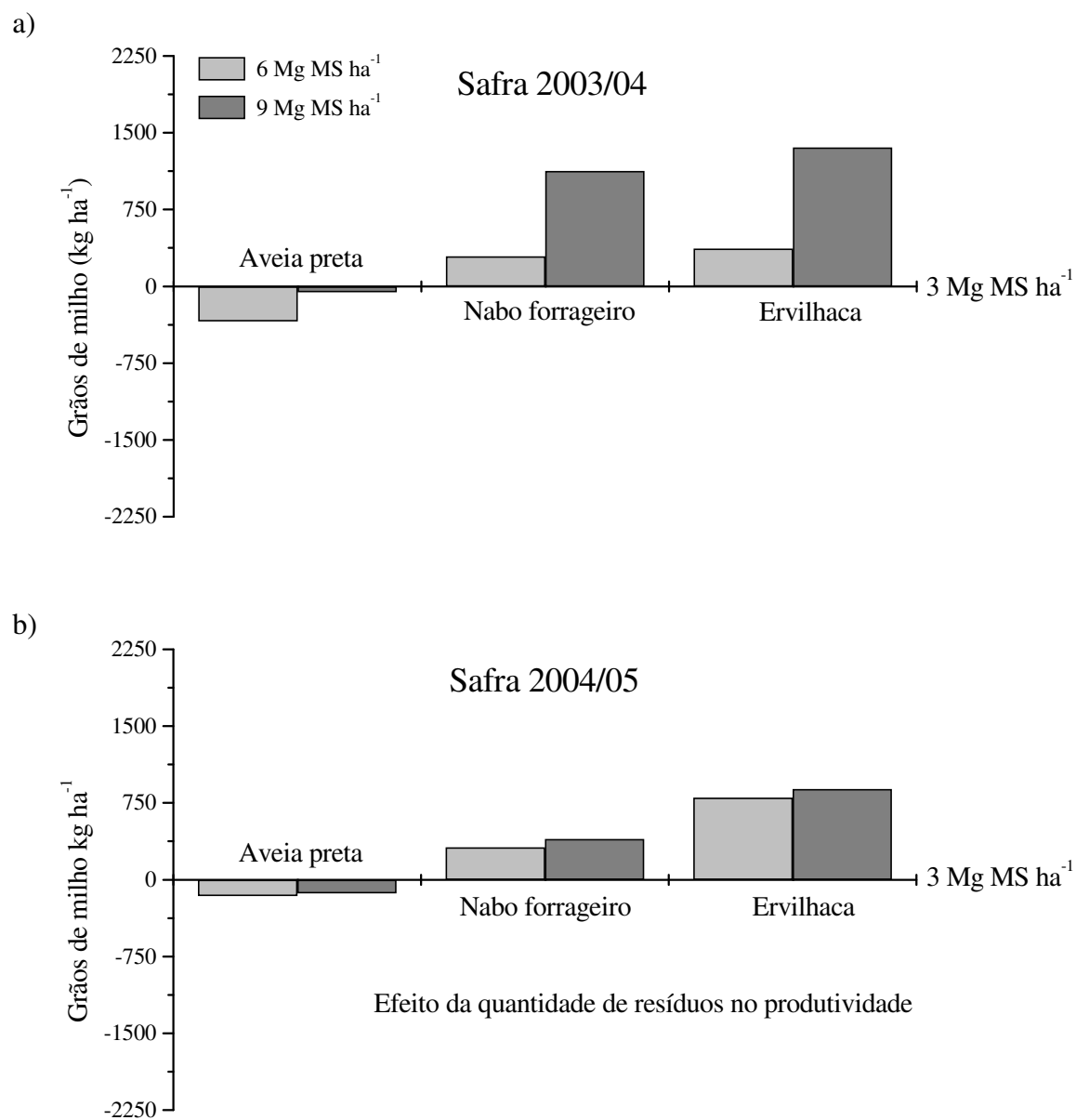
Apêndice 12 – Relação entre o N acumulado no florescimento e a produtividade de grãos de milho nas safras 2003/4 (a) e 2004/05 (b).



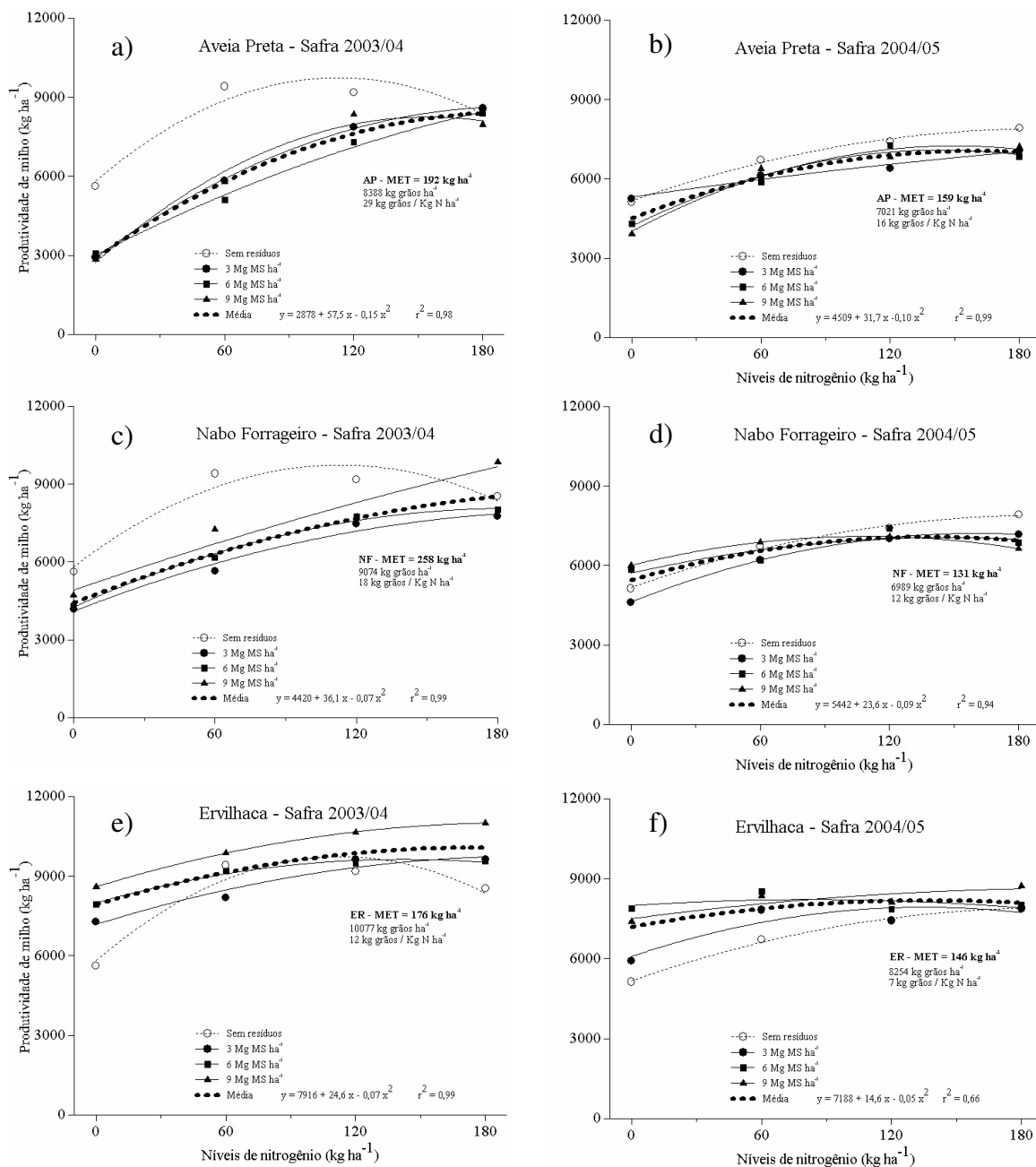
Apêndice 13 – N acumulado no florescimento de acordo com o nível de resíduos e em função das doses de N.



Apêndice 14 – Efeito do aporte de resíduos na produção de grãos de milho em relação ao tratamento sem resíduos na safra 2003/04 (a) e 2004/05 (b). Médias das doses de N.

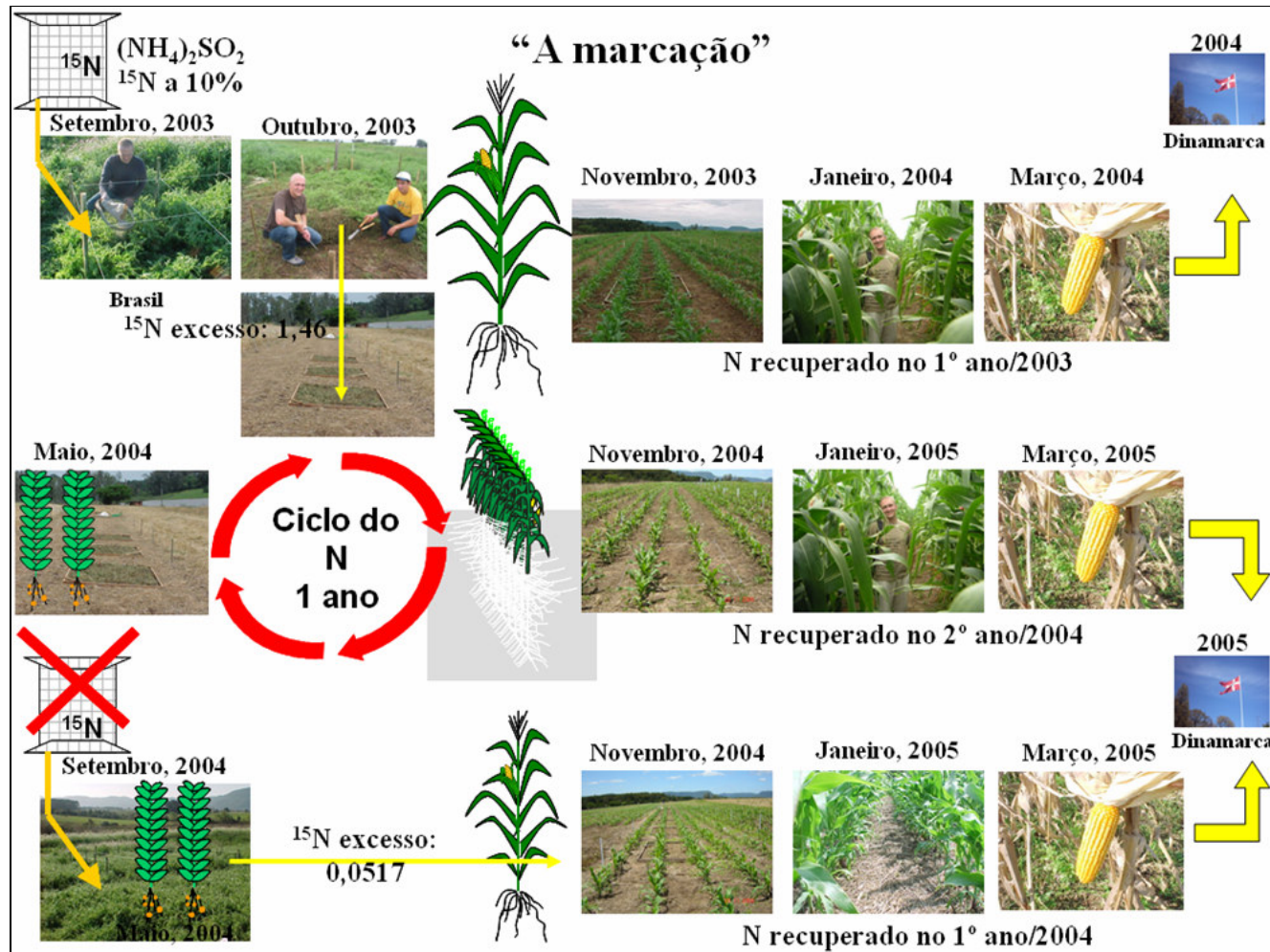


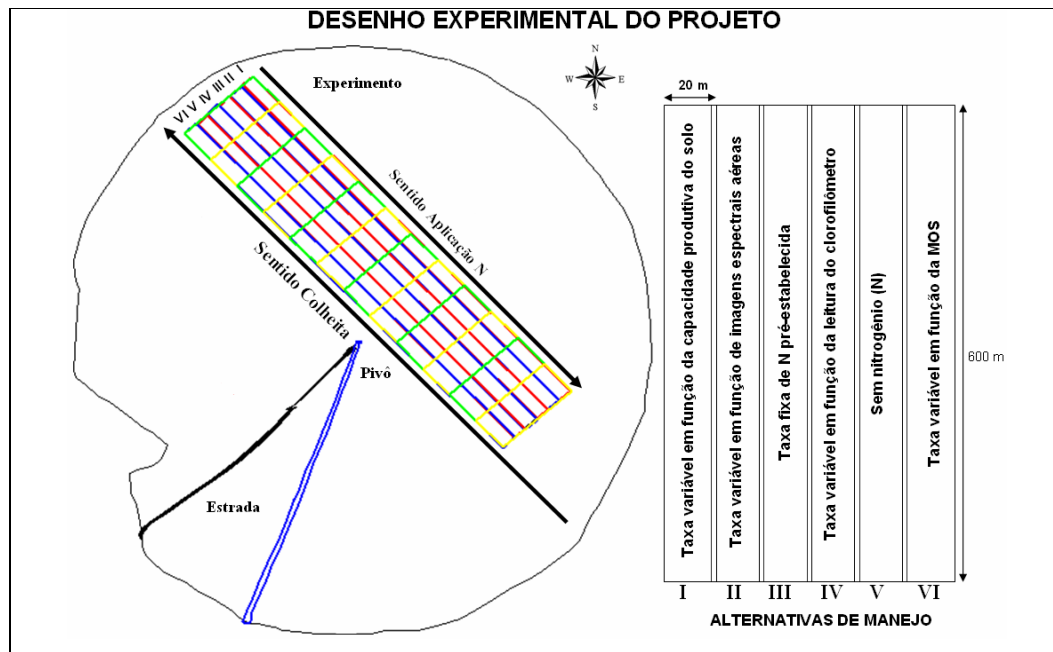
Apêndice 15 – Efeito da quantidade com o aporte de resíduos de 6 e 9 Mg MS ha^{-1} em relação ao aporte de 3 Mg ha^{-1} de MS na safra 2003/04 e 2004/05. Médias das doses de N.



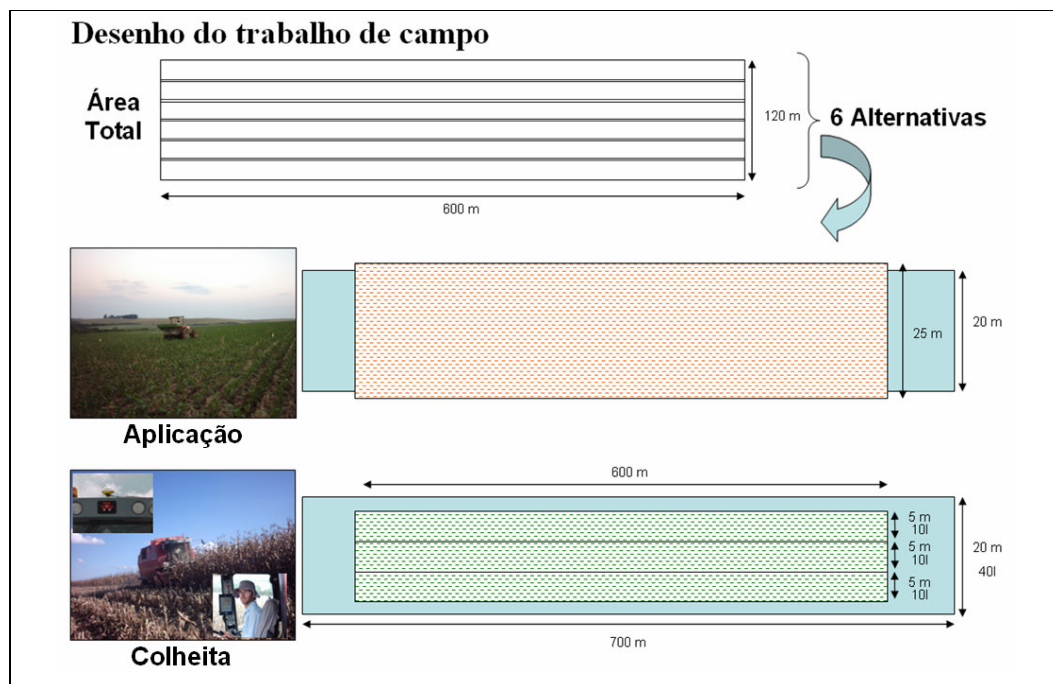
Apêndice 16 – Curvas de resposta as doses de N na cultura de milho em função dos níveis de resíduos (0, 3, 6, 9 Mg ha⁻¹ de MS) para cada cultura de cobertura na safra 2003/04 e 2004/05.

Apêndice 17 – Esquema seqüencial de marcação isotópica com ^{15}N dos resíduos de ervilhaca.

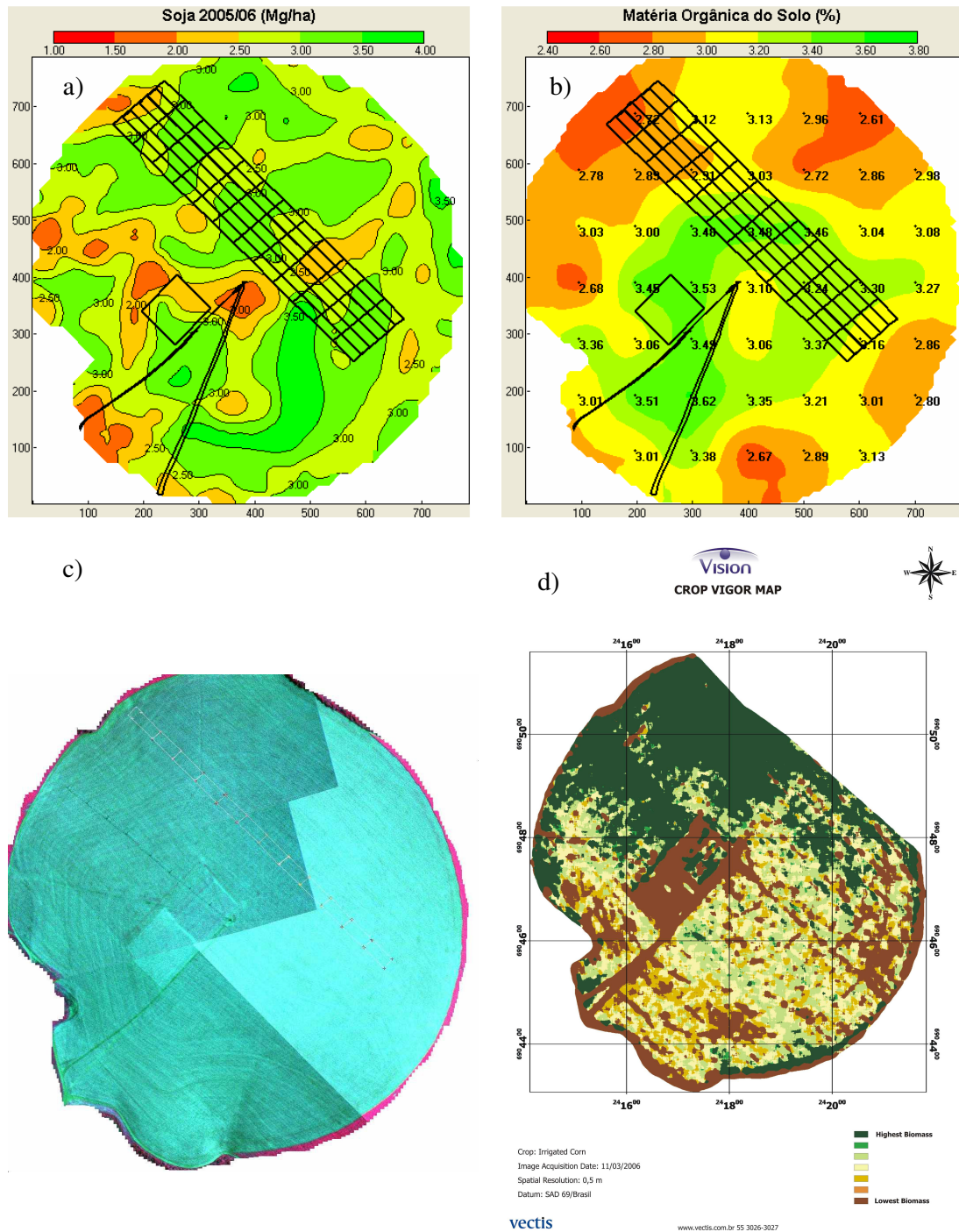




Apêndice 18 – Esquema experimental com a disposição dos tratamentos dentro do pivô, estrada de acesso ao centro do pivô e posição da torre de irrigação no momento da georeferência.



Apêndice 19 – Desenho do trabalho de campo: faixa de aplicação de N com o conjunto aplicador trator/amazone e das faixas de colheita com a automotriz MF38 equipada c/ sensor de rendimento (Sistema Fieldstar/AGCO/Massey Ferguson).



Apêndice 20 – Mapa de colheita de Soja 2005/06 (a), mapa de matéria orgânica do solo com grid de 1 hectare (b), 1º imageamento infravermelho aéreo do experimento (c) e mapa de vigor das plantas de milho elaborado pela empresa Vectis (d).

Apêndice 21 – Teores de matéria orgânica do solo médio encontrados em cada unidade de trabalho dentro da faixa de aplicação a taxa variável em função deste parâmetro.

Unidades de trabalho	Matéria Orgânica do Solo			Quantidade de N aplicada (kg ha ⁻¹)
	Profundidade		Média	
	0 a 10 cm	10 a 20 cm		
1	3,01 ¹	2,57	2,79	240
2	3,47	2,81	3,14	240
3	4,07	3,05	3,56	240
4	3,86	3,29	3,58	240
5	4,49	3,34	3,92	180
6	4,55	3,53	4,04	120
7	4,30	3,61	3,96	120
8	3,98	3,45	3,72	180
9	4,18	3,78	3,98	120
10	3,99	3,30	3,65	180
11	4,18	3,38	3,78	180
12	4,33	3,51	3,92	120
Média	4,03	3,30	3,67	-
Desvio Padrão	0,43	0,34	0,37	-
CV %	10,8	10,4	10,2	-

¹ Média de 5 subamostras de solo por unidade de trabalho.

Apêndice 22 – Produtividades médias de soja encontradas em cada unidade de trabalho dentro da faixa de aplicação a taxa variável em função do potencial produtivo do solo.

Unidades de trabalho	Produtividade média ¹	CV%
	Mg ha ⁻¹	
1	2,93 ¹	11,8
2	3,37	3,7
3	3,36	2,1
4	2,96	21,0
5	2,87	21,0
6	3,12	7,2
7	2,79	13,7
8	2,65	9,4
9	1,72	38,3
10	2,89	9,1
11	3,14	4,1
12	3,10	3,5
Média	2,91	12,1

¹ Média de 10 leituras de produtividade da safra de Soja 2005/06.

Apêndice 23 – Valores das leituras de clorofila encontrados em cada unidade de trabalho dentro da faixa de aplicação a taxa variável em função deste parâmetro.

UT ¹	4ª folhas					7ª folhas				
	Leituras do clorofilômetro			Desvio Padrão	CV%	Leituras do clorofilômetro			Desvio Padrão	CV%
	mín	máx	médio			mín	máx	médio		
1	42,4	46,1	43,8	2,0	4,6	57,8	58,3	58,0	0,3	0,5
2	39,6	43,4	41,8	2,0	4,7	58,4	60,9	58,4	1,3	2,2
3	39,7	43,5	42,0	2,0	4,9	57,0	58,8	57,0	0,9	1,6
4	40,4	41,3	40,9	0,5	1,1	55,9	59,3	59,3	1,7	2,9
5	42,0	43,7	43,0	0,9	2,1	54,7	58,1	54,7	1,9	3,4
6	42,8	43,7	43,2	0,5	1,1	57,3	60,2	58,2	1,5	2,6
7	41,4	45,6	44,0	2,3	5,1	54,7	59,8	59,3	2,8	4,7
8	40,3	44,8	43,0	2,4	5,5	54,8	56,2	54,8	0,8	1,4
9	41,5	45,3	43,6	1,9	4,4	56,8	60,2	60,2	1,7	2,9
10	42,4	43,8	43,2	0,7	1,6	56,6	59,8	56,6	1,6	2,9
11	37,0	42,3	39,0	2,9	7,4	55,3	58,7	58,7	1,7	2,9
12	36,4	45,0	41,3	4,4	10,7	54,7	60,2	57,0	2,8	4,8
Média	40,5	44,0	42,4	1,9	4,4	56,2	59,2	57,7	1,6	2,7

¹ UT = Unidade de trabalho.

Apêndice 24 – Valores de NDVI obtidos através das imagens aéreas multiespectrais encontradas em cada unidade de trabalho dentro da faixa de aplicação a taxa variável em função deste parâmetro.

UT ¹	4ª folhas					7ª folhas				
	NDVI ²			Desvio Padrão	CV%	NDVI			Desvio Padrão	CV%
	mín	máx	médio			mín	máx	médio		
1	-0,86	1,00	-0,46	0,11	-23,2	-0,27	0,83	0,51	0,11	21,5
2	-0,87	1,00	-0,46	0,16	-35,6	0,07	0,83	0,52	0,09	17,5
3	-0,84	1,00	-0,30	0,15	-52,1	0,10	0,85	0,50	0,09	19,0
4	-0,76	0,94	-0,29	0,19	-67,8	0,08	0,76	0,50	0,09	18,3
5	-0,79	0,94	-0,30	0,16	-53,2	0,13	0,79	0,51	0,09	18,1
6	-0,92	0,57	-0,38	0,14	-38,3	0,19	0,78	0,50	0,09	18,1
7	-0,93	0,24	-0,39	0,14	-36,4	0,06	0,76	0,43	0,10	22,6
8	-1,00	0,24	-0,55	0,15	-26,6	-0,04	0,74	0,42	0,10	24,4
9	-0,84	0,33	-0,44	0,12	-27,8	0,10	0,70	0,44	0,09	20,6
10	-0,66	0,33	-0,41	0,10	-25,5	0,04	0,76	0,44	0,10	22,0
11	-0,66	0,72	-0,40	0,13	-32,2	-0,01	0,68	0,39	0,10	26,1
12	-0,66	0,72	-0,39	0,15	-37,1	-0,27	0,73	0,41	0,10	24,4
Média	-0,81	0,67	-0,40	0,14	-38,0	0,01	0,77	0,46	0,10	21,0

¹ UT = Unidade de trabalho.

² NDVI = Normalized Derivation Vegetation Index (adimensional).

1º Imagem = 14/10/2006

2º Imagem = 03/11/2006

Apêndice 25 – Quantidades de N fertilizante aplicadas em cada unidade de trabalho de acordo com os parâmetros estabelecidos em cada alternativa de manejo.

		Unidades de trabalho											
		1	2	3	4	5	6	7	8	9	10	11	12
		kg ha ⁻¹ de N											
Capacidade produtiva	Base	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
	1 ^a C	75	105	105	45	75	105	45	45	45	75	105	75
	2 ^a C	75	105	105	45	75	105	45	45	45	75	105	75
	Total	180	240	240	120	180	240	120	120	120	180	240	180
NDVI	Base	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
	1 ^a C	105	105	45	45	45	45	75	105	105	75	75	75
	2 ^a C	45	45	75	45	45	75	105	105	75	75	105	105
	Total	180	180	150	120	120	150	210	240	210	180	210	210
Taxa Fixa	Base	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
	1 ^a C	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75
	2 ^a C	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75	75
	Total	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180	180
Leituras de clorofila	Base	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
	1 ^a C	45	105	75	105	75	45	45	75	45	75	105	105
	2 ^a C	105	105	105	45	75	45	75	75	75	45	45	105
	Total	180	240	210	180	180	120	150	180	150	150	180	240
Sem N em cobertura	Base	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
	1 ^a C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	2 ^a C	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
	Total	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
Matéria orgânica do solo	Base	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30	30
	1 ^a C	105	105	105	105	75	45	45	75	45	75	75	45
	2 ^a C	105	105	105	105	75	45	45	75	45	75	75	45
	Total	240	240	240	240	180	120	120	180	120	180	180	120

1^a C = 1^a Cobertura (20/10/2006).

2^a C = 2^a Cobertura (04/11/2006).

Apêndice 26 – Metas e quantidades de N aplicadas em cada cobertura nitrogenada.

Relação	Meta	1 ^a Cobertura			2 ^a Cobertura		
		Aplicado kg ha ⁻¹ de N	Desvio	CV%	Aplicado kg ha ⁻¹ de N	Desvio	CV%
Abaixo M	45	40,7	6,4	15,6	43,6	6,6	15,0
Média	75	76,0	13,6	17,9	77,0	6,1	7,9
Acima M	105	108,5	16,9	15,6	108,2	12,1	11,2
Geral	75	75,1	5,3	7,0	76,3	3,2	4,2

¹ Relação D/D = Relação entre demanda e disponibilidade de N.

Apêndice 26 – Metas e quantidades totais de N aplicadas no experimento.

Relação D/D ¹	Metas			Quantidades aplicadas			
	Base	Coberturas	Totais	Base ²	1ª Cobertura	2ª Cobertura	Total
kg ha ⁻¹ de N							
Abaixo M	30	90	120	33,1	40,7	43,6	117,5
Média	30	150	180	33,1	76,0	77,0	186,1
Acima M	30	210	240	33,1	108,5	108,2	249,8
Experimento	30	150	180	33,1	75,1	76,3	184,5

¹ Relação D/D = Relação entre demanda e disponibilidade de N.

² Adubação média de base: 207 kg ha⁻¹ de DAP, 16% de N, Desvio Padrão: 12,4 e CV: 6%.

Apêndice 27 – Leituras de clorofila em cada alternativa de manejo a taxa variável no estádio da 4ª e 7ª folha de milho.

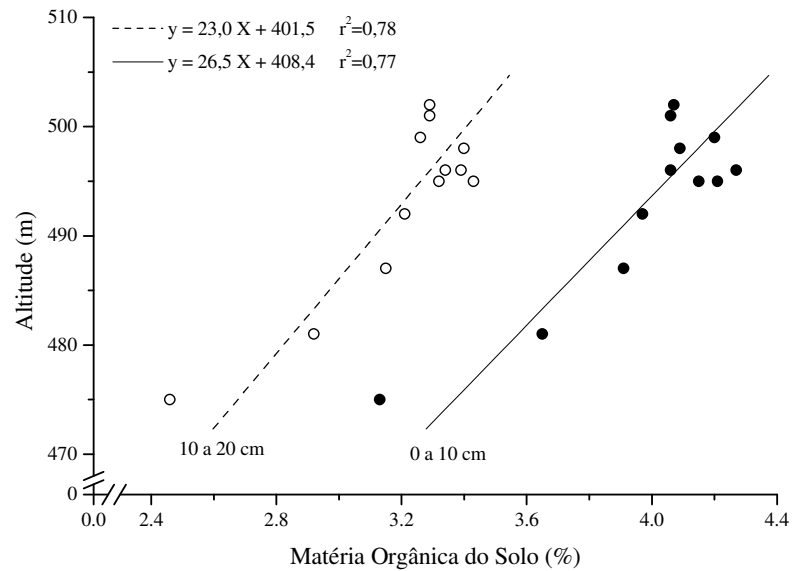
Estratégias	Época das leituras									
	4ª folha					7ª folha				
	mín	máx	χ	DP ¹	CV%	mín	máx	χ	DP	CV%
Capacidade produtiva	38,6	46,5	41,7	1,9	4,5	49,0	60,2	56,4	2,3	4,1
NDVI	37,5	47,0	42,3	2,1	5,0	51,7	61,0	56,7	2,1	3,8
Taxa fixa	35,1	49,3	42,1	2,4	5,8	45,5	60,4	56,2	2,9	5,1
Clorofilômetro	36,4	46,1	42,4	2,3	5,4	54,7	60,9	57,7	1,8	3,1
Sem N	35,7	47,8	41,4	3,1	7,5	52,5	60,7	57,4	2,2	3,9
Matéria orgânica	35,3	47,4	43,0	2,4	5,6	54,3	61,8	58,5	1,9	3,3
Médias	36,4	47,4	42,2	2,4	5,6	51,3	60,8	57,2	2,2	3,9

¹ DP = Desvio padrão.

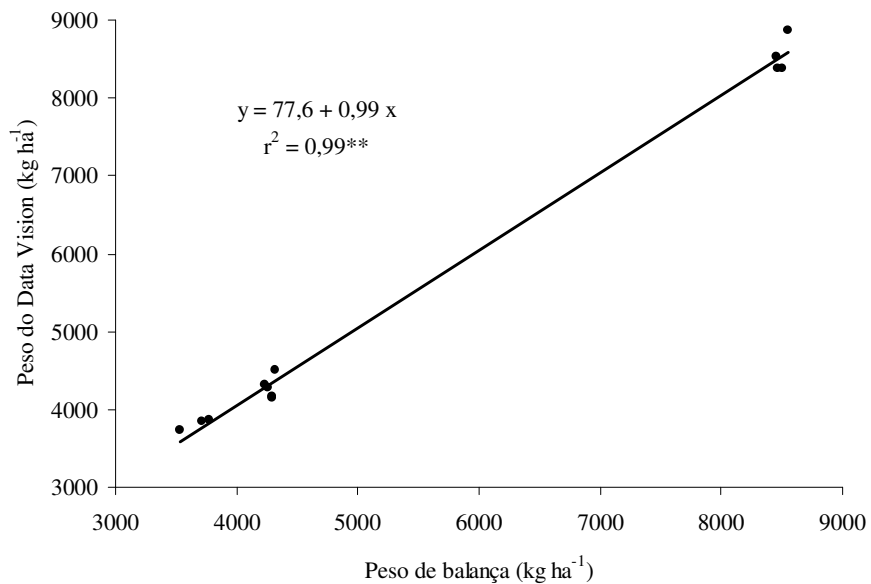
Apêndice 28 – Leituras de clorofila em cada alternativa de manejo a taxa variável no estádio da 12ª folha de milho e na folha oposta a espiga (florescimento).

Estratégias	Época das leituras									
	12ª folha					Florescimento				
	mín	Máx	χ	DP	CV%	mín	máx	χ	DP	CV%
Capacidade produtiva	51,2	63,9	56,5	3,4	6,0	58,3	66,5	62,0	2,1	3,3
NDVI	51,8	61,5	57,1	2,5	4,3	57,5	65,6	62,6	2,0	3,1
Taxa fixa	54,5	62,9	58,4	2,1	3,6	57,2	66,5	62,7	2,4	3,8
Clorofilômetro	53,0	61,4	57,8	2,1	3,6	59,4	66,1	62,7	1,7	2,8
Sem N	48,8	60,9	55,8	3,2	5,7	44,8	61,6	55,5	3,7	6,7
Matéria orgânica	55,2	64,1	59,2	1,8	3,1	60,0	67,8	63,7	1,9	3,0
Médias	52,4	62,5	57,5	2,5	4,4	56,2	65,7	61,5	2,3	3,8

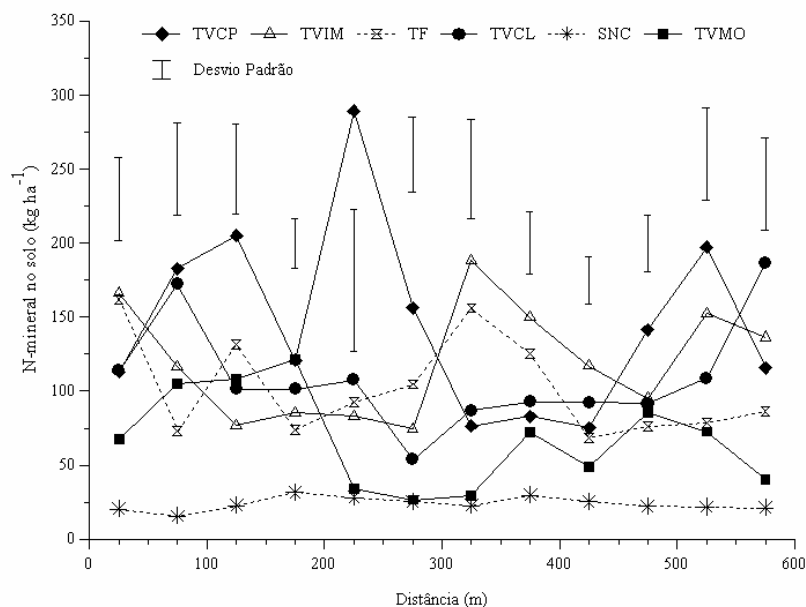
¹ DP = Desvio padrão.



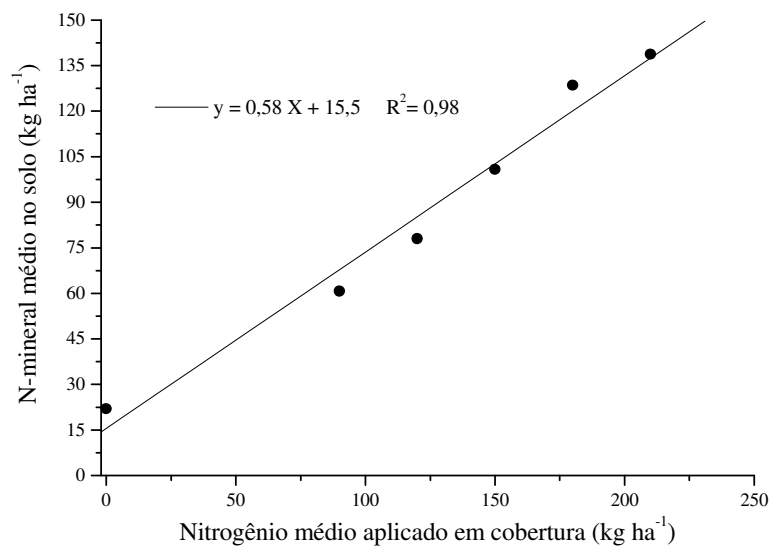
Apêndice 29 – Relação entre o teor de matéria orgânica do solo e a altitude da área na seqüência de amostragens ao longo dos 600 metros do experimento.



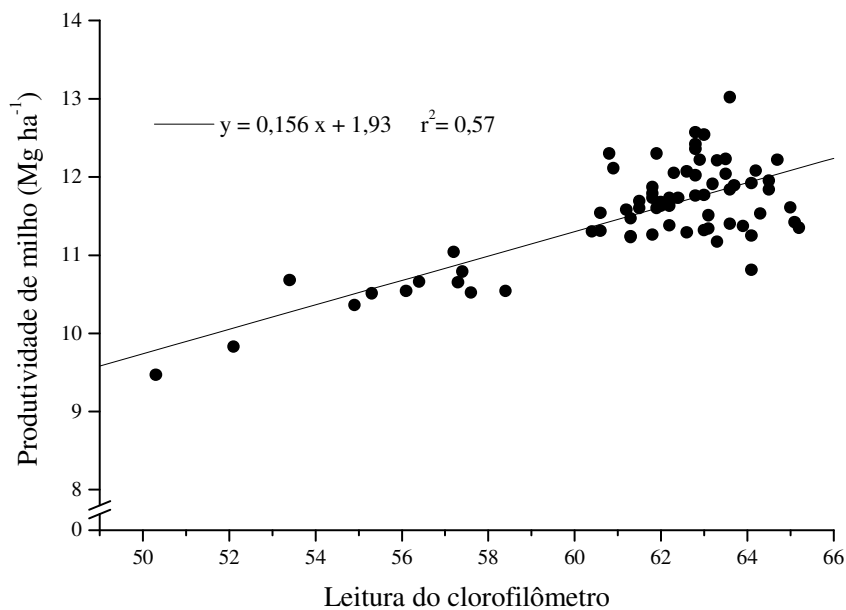
Apêndice 30 – Relação entre o peso estimado pelo computador de bordo da máquina (Data Vision) e peso real de balança. Média de 12 repetições.



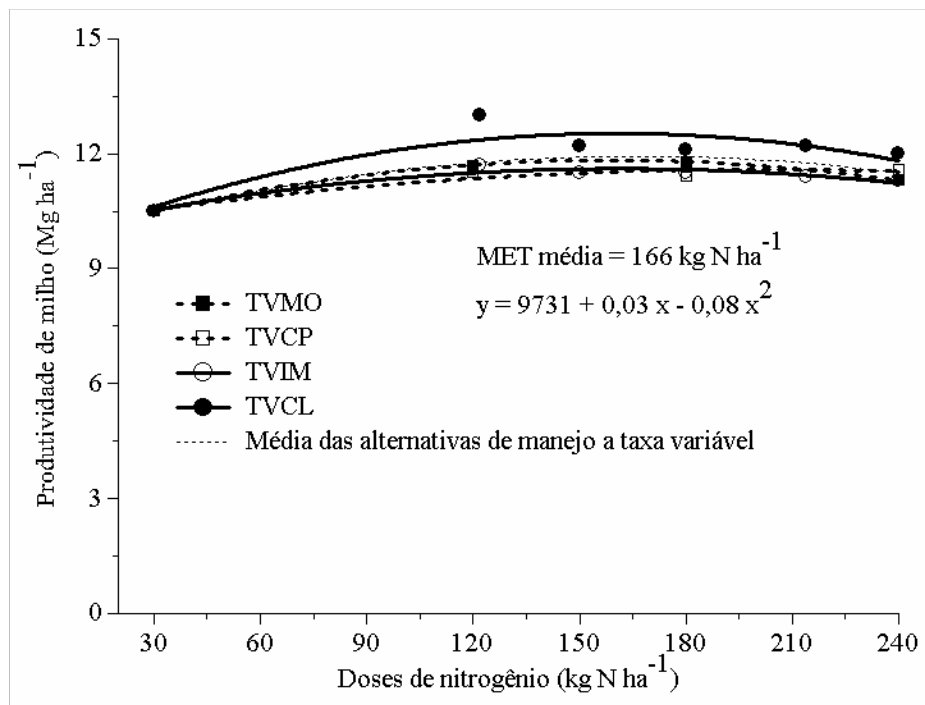
Apêndice 28 – Variação ao longo de 600 metros do conteúdo de N mineral na profundidade de 0 a 40 cm nas diferentes alternativas de manejo 20 dias após a 2ª cobertura de N, TVCP: taxa variável em função da capacidade produtiva do solo; TVIM: taxa variável em função de imagens multiespectrais aéreas; TF: taxa fixa - manejo tradicional; TVCL: taxa variável em função da leitura do clorofilômetro; SNC: sem aplicação de N em cobertura e TVMO: taxa variável em função do teor matéria orgânica do solo. DMS (p<0,05).



Apêndice 29 – Relação entre o N aplicado e as quantidades de N-mineral no solo a camada de 0 a 40 cm de profundidade 20 dias após a 2ª cobertura de N.



Apêndice 31 – Relação entre as leituras do clorofilômetro no florescimento e a produtividade de milho.



Apêndice 32 – Curvas de resposta da adubação nitrogenada obtida para cada alternativa de manejo e média geral do experimento.

Apêndice 33 – Comparativo de doses de N no milho estimadas pela recomendação da CQFS-RS/SC (2004) e a estimativa proposta pelo conjunto de informações gerado por esta Tese de Doutorado.

Expectativa de produtividade (ton ha ⁻¹)	Teor de MOS %	Cultura antecedente	Estimativa pela Comissão 2004	Estimativa pela proposta de Tese	
				Sequeiro ¹	Irigado ²
				kg ha ⁻¹ de N	
5	2,5	Leguminosa	65	30	20
		Pousio	95	80	53
		Gramínea	125	140	93
	3,5	Leguminosa	45	-10	-7
		Consórcio ou pousio	75	40	27
		Gramínea	105	100	67
	5,0	Leguminosa	25	-70	-47
		Consórcio ou pousio	55	-20	-13
		Gramínea	85	40	27
7	2,5	Leguminosa	95	114	76
		Pousio	125	164	109
		Gramínea	155	224	149
	3,5	Leguminosa	75	74	49
		Consórcio ou pousio	105	124	83
		Gramínea	135	184	123
	5,0	Leguminosa	55	14	9
		Consórcio ou pousio	85	64	43
		Gramínea	115	124	83
9	2,5	Leguminosa	125	198	132
		Consórcio ou pousio	155	248	165
		Gramínea	185	308	205
	3,5	Leguminosa	105	128	85
		Consórcio ou pousio	135	178	119
		Gramínea	165	268	179
	5,0	Leguminosa	85	98	65
		Consórcio ou pousio	115	148	99
		Gramínea	145	208	139

¹ Considerando uma eficiência de 50% do N aplicado.

² Considerando uma eficiência de 75% do N aplicado.

Apêndice 34 - E-Mails Essenciais!

Deixo registrado aqui alguns dos mais de 500 e-mails recebido e enviados durante os 7 meses de peleja pelos pampas da Dinamarca. Esses e-mails representaram muito para mim nos momentos difíceis, longe da família e dos amigos. Assim, fica o meu reconhecimento a todos que de alguma maneira deram suas contribuições espontâneas de afeto e carinho, restando a mim apenas repassar isso a outras pessoas que se encontrarão em situação semelhante, uma vez que estas atitudes não podem ser pagas em “espécie”.

E-mail 1:

On 02/06/2005, JACKSON ERNANI FIORIN <jacksonfiorin@mail.ufsm.br> wrote:

OLA ALAN

ESPERO QUE ESTEJA TUDO BEM COM VOCE... É CLARO DE SAUDE E DINHEIRO.

O "RESTO"... EMBORA PAREÇA SER UM POUCO DIFICIL NUM PRIMEIRO MOMENTO, MAS NA VERDADE NÃO É, POIS A CADA OBSTÁCULO SUPERADO, TEMOS A CERTEZA DE QUE A NOSSA CAPACIDADE VAI ALÉM DA NOSSA IMAGINAÇÃO.

FALO ISTO PORQUE ESTE PERIODO DE ADAPTAÇÃO PARA VOCE NÃO DEVE SER MUITO FACIL, MAS TENHA A CERTEZA QUE TEM MUITOS TORCENDO POR VOCE AQUI.

TENHAS CERTEZA QUE ESTA OPORTUNIDADE E A EXPERIENCIA QUE VOCE ESTA VIVENCIANDO VALE A PENA.

VOCE É UM VENCEDOR.

UM ABRAÇO

DO COLEGA E AMIGO

JACKSON

No dia 07/02/2005 14:31:57 alan@dsr.kvl.dk escreveu o seguinte sobre o assunto Re: notícias:

Olá Jackson,

Obrigado pelo apoio. Sempre é bom ouvir uma voz amiga nas horas de extrema dificuldade. Sem dúvida, estes primeiros dias estão sendo terríveis.

A saudade é grande e como se não bastasse eu tenho entendido muito pouco o inglês. A cidade é legal (diferente), fria e antiga. Tudo está escrito em dinamarquês. Quando se fala com uma pessoa na rua, a primeira língua é dinamarquês. Tenho poucos amigos, não há calor humano aqui, principalmente quando não se consegue se expressar.

Tenho saudade de tudo e de todos, mas serei forte. Sem dúvida voltarei mudado, pois estou aprendendo que meus bens mais valiosos são a minha família e os meus amigos.

Durmo toda a noite envolvido em meu "pala" de tanta falta sinto do nosso Rio Grande, das rodas chimarrão, da música campeira e de bom pedaço de carne assada, coisas tão simples, mas que tem feita grande falta para mim. Tenha certeza que podemos ser um país pobre em divisas, mas somos ricos em amizade e afeto.

Um forte abraço de seu colega e amigo,

Alan
Copenhagen, Denmark.

----- Forwarded message from santial@mail.ufsm.br -----

Date: Mon, 07 Feb 2005 15:39:06 -0200

From: Antônio Luis Santi santial@mail.ufsm.br

Reply-To: Antônio Luis Santi santial@mail.ufsm.br

Subject: Re: Re: noticias

To: alan@dsr.kvl.dk

Olá!

Sempre é bom receber notícias dos amigos e acho que no seu caso isso é ainda mais importante. Como muitos estou torcendo por você e mesmo no anonimato da distância dando um apoio a sua decisão de ir além dos pagos Riograndense. As coisas devem estar um tanto difíceis ai nesse primeiro momento, mas acredite que passando isso você vai conseguir o que poucos tem coragem, se adaptar em qualquer parte desse mundo globalizado.

As coisas andam bem por aqui, viajo muito com os negócios da empresa e pra variar o Telmo não gosta mas aposto em meu futuro e não deixarei as oportunidades passarem em vão. Acredito que isso será importante para mim. As vezes estamos num lugar totalmente abitado e de fácil comunicação (digo pela língua) mas nem sempre bem interpretados e aplaudidos pela nossa coragem. É por essas razões que torço por ti e naquilo que me for possível lhe darei força porque construir um futuro rompendo paradigmas frente a nossos mestres e famílias nem sempre se dá sem dor e sem abrir mãos de coisas até então preciosas.

Vivente, sempre que quiser pode contar com o amigo, mesmo que a roda de mate está longínqua e a carne não respingue na brasa nesses pagos gelados da Dinamarca. Sempre mudamos com o tempo, no dia-a-dia ficamos mais rudes, mais sensatos e a cima de tudo mais humanos com aqueles que demonstram o afeto de um abraço, de uma palavra, da presença da saudade.

Muitos são rudes ao ponto de esquecer de nossos sonhos e de que temos direito ao reconhecimento profissional, a conhecer novos mundos e outras pessoas. Outros se regozijam pelo nosso sucesso e desafio. Espero poder ser um amigo que se enquadre nesse último páreo e possa lhe estar sempre apoiando em sua jornada.

Sempre que puder estarei escrevendo, mesmo que no campo filosófico, uma mensagem de encorajamento, pois tenho certeza que o que nós humanos mais queremos é sermos tratador com carinho, simplicidade e amor.

Que meu abraço se estenda até os pagos da Dinamarca a esse gaúcho perdido e entreverado nas pelepas da vida.

Abraços do amigo
Santi

**-- No dia 08/02/2005 07:16:37 alan@dsr.kvl.dk escreveu o seguinte sobre o assunto Fwd:
Re: Re: noticias:**

Ju,

Sei que hoje é terça-feira e que possivelmente, vc somente lerá esta mensagem do Antônio no final de semana, mas quando vê-lo, lembre-se de dar um abraço por min nele.

Beijos,

Alan

On 02/08/2005, Antônio Luis Santi <santial@mail.ufsm.br> wrote:

Alan!

Fiquei emocionado pela sua declaração. Saiba que me senti muito feliz por você me considerar seu amigo. Sei que quando estavas aqui estávamos sempre na correria e " não encontravamos tempo" para estreitar nossas amizades. As vezes nos damos conta de quem são nossos amigos quando eles estão distantes.

Aqui o carnaval está fervendo porém eu não sai nenhuma noite, estou trabalhando com as coisas da empresa e da tese. Prometo manter contato com freqüência e sempre lhe dar uma força extra para que atinja seus objetivos e não se sinta sozinho nessa empreitada.

Amanhã teclo mais.

Um grande abraço do amigo

-- No dia 27/03/2005 17:31:27 alan@dsr.kvl.dk escreveu o seguinte sobre o assunto Um gaúcho com orgulho na Denmark_Alan:

Santi! Meu amigo!

Gostaria que soubesse que você entrará para história, pois colocarei aquele e-mail que enviaste-me como um anexo em minha dissertação (agora Tese). É uma forma de registrar um momento importante e difícil para mim aqui na Dinamarca e também os incentivos que tive de muitos amigos. Agora, mais adaptado, já entro na Universidade como diria um Gaudério: "De cola erguida e batento espora". Algumas vezes no english sai o "tchê", já sendo minha marca registrada. Tenho tido trabalho para explicar que o Mate é diferente do chá de coca e porque em minha porta tem uma bandeira verde, vermelha e amarela, bem maior que a bandeira brasileira. Mas isso é uma simples forma de matar a saudade de minha Querência Amada.

No mais um forte abraço,

Alan Acosta

Copenhagen, Denmark

Um gaúcho com orgulho

On 03/28/2005, Antônio Luis Santi <santial@mail.ufsm.br> wrote:

Amigo!

Quando ando meio distante dos computadores fico meio apreensivo por não poder me comunicar com algumas das pessoas que sei que são de fato amigos e que é gostoso conversar.

Aqui no Sul do Brasil (e talvez em qualquer lugar do mundo) às vezes ficamos só mesmo em meio a tantas pessoas pois nem sempre somos compreendidos o mesmo compreendemos as pessoas.

Sei que na vida seremos apenas mais um se apenas deixarmos a vida passar, mas que, poderemos entrar para a história guardadas nos corações de muitas pessoas quando nos doarmos um pouco ao cultivo da amizade.

Espero sempre regar as flores que plantei no jardim de minha vida (as amizades).
Tenha uma ótima semana.

Antônio Luis Santi

.....

E-mail 2:

On 02/01/2005, Luis Alex Acosta <luisalexacosta@sbcglobal.net> wrote:

Hi Alan,

How's going? How're you doing?

I'm fine and studying a lot and you?? How you're felling about your first days in Denmark. The classes is nice?? You're understanding everthing?? For here I'm studying at morning and at night every week and more Saturday morning. I'm have computer repair classes at nights of Thusday, Thursday and Saturday another days I have english class.

Have good week.

Bye,

Alex

Replay:

Olá Alex,

Hoje vou escrever em português, pois, sem dúvida, estes primeiros dias estão sendo terríveis.

A saudade é grande e como se não bastasse eu tenho entendido muito pouco o inglês. A cidade é legal (diferente), fria e antiga. Tudo está escrito em dinamarquês. Quando se fala com uma pessoa na rua, a primeira língua é dinamarquês. Tenho poucos amigos, não há calor humano aqui, principalmente quando não se consegue se expressar.

Realmente, estou contando os dias para ir embora.

Todas as noites tinha sonhos ou pesadelos em inglês, não era muito fácil, mas tudo bem. Achei que não poderia ter sonhos piores e esses poderiam ajudar. Somente achei... Esta noite sonhei com o nosso quarto em Santa Bárbara, quando nós éramos crianças, a cor verde clara, o pai e mãe conversando na cozinha, nós estávamos jogando travesseiros um no outro, pude sentir tudo. Foi horrível, pois quando acordei, eu notei que estava a mais de 5.000 milhas de distância de minha casa, de meus amigos, de nossos pais, da Juliana e da Júlia.

Tenho saudade de tudo e de todos. Sem dúvida voltarei mudado, pois estou aprendendo que meus bens mais valioso são a minha família e os meus amigos. Durmo toda a noite envolvido em meu "pala" de tanta falta sinto

do meu Rio Grande, das rodas chimarrão, da música campeira e de bom pedaço de carne assada, coisas tão simples, mas que tem feito grande falta para mim. Tenha certeza que podemos ser um país pobre em divisas, mas somos ricos em amizade e afeto.

Talvez não faça muita falta para você estas pequenas coisas, mas para mim é tudo o que possuo de valor e é por eles que agüentarei este isolamento, aprenderei inglês, completarei o trabalho e voltarei para casa em agosto. Se fosse minha escolha voltaria agora mesmo.

Sei que são as primeiras semanas, mas elas existem e não deixaram de existir.

Desculpe-me pelo desabafar, mas você é meu único irmão e como você mesmo me disse a 10 anos atrás, quando chequei na casa de estudante: "quando a coisa apertar a única pessoa que você realmente poderá contar será em pessoas do mesmo sangue"

Um abraço gelado de seu irmão, (5 graus abaixo de zero e menos de 9 horas de luminosidade natural)

No mais, espero mandar novo e-mail em inglês, pedindo esclarecimento sobre algumas dúvidas.

Alan

Copenhagen, Denmark.

.....
E-mail 3:

Olá pessoal,

Como está o Brasil? Muito quente?

Cheguei bem aqui em Copenhagen. Tudo é bastante diferente e principalmente devido a quantidade pessoas de nacionalidades. OK

Aqui tudo está em ordem. Eu cheguei bem a Denmark. Tudo foi muito bom durante o meu vôo, mas bastante diferente do esperado. Em São Paulo, houve overburden (venderam mais passagens do que o número de poltronas) em meu avião para London. Mas como eu tinha feito o check in 3 horas antes do vôo o meu lugar estava garantido. Estão o pessoal da British airways pediu que eu cedesse meu lugar para pessoas nativas da Inglaterra que estavam muito zangadas. Como eu não tinha pressa e tudo era e é novidade eu não me importei em ceder o lugar. Em troca ganhei uma estadia em uma suíte no Marriott hotel em São Paulo, com toda a alimentação paga e uma troca da classe econômica para a classe executiva em outro vôo. Como se não bastasse, pelo incomodo da troca do vôo, a British airways fez questão de dar um cheque no valor de 250 libras (equivale a mais de R\$1200,00). Parece mentira, mas é a pura verdade. Pelo jeito começamos com o pé direito aqui. O engraçado foi eu viajar a primeira em classe executiva, foi simples maravilhoso e muito diferente.

Não tive nenhum problema no aeroporto com a Erva Mate. Graças a Deus. Mads estava me esperando com uma temperatura em torno de 2 a 3 graus abaixo de zero e também estava nevando. Que Welcome.

Já conheci muita gente, a secretaria internacional KVL, a universidade e outras partes que serão importantes em minha estadia aqui.

A minha moradia é agradável. Tenho muitos diferentes vizinhos e de várias partes do mundo: Grécia, Alemanha, Lituânia, Bélgica, China, Espanha, Portugal, Austrália, Suíça. Isso em menos de uma semana. Realmente o choque cultural está sendo muito grande. Estou estudando inglês direto, pois sua falta é bastante limitante para tudo. Já gaguejo o português e sonho em inglês.

Comprar qualquer coisa é difícil, pois além do meu inglês ruim, tudo está escrito em dinamarquês. O Mads está me ajudando em tudo. Mas acredito que em mais alguns dias estarei apto a fazer tudo sozinho.

Acho que não vai ser fácil a vida aqui. Mas, sem dúvida, é uma grande oportunidade de ampliar meus conhecimentos, sejam eles técnicos, culturais, pessoais, econômicos,... Sem dúvida, já estou com saudade de todos e tudo, estou tentando não pensar nisso agora. Terei muitas novidades quando retornar.

Se quiserem mandar uma mensagem meu e-mail aqui é: alan@dsr.kvl.br

Um abraço,

Alan

.....

E-mail 4:

Hi Alex and Michele,

I'm sorry for delay in to ask your e-mail, but last week I was very busy in laboratory. I began my work of incubation and at the begin it has very work. I think than will be a good work and my advisor Andreas is liking of my performance. I think than my 6 years of experience in laboratory in the Brazil are doing the difference. I am overcome the problem with language with it is good performance.

Congratulations Alex for your also good performance computer repair class. I think than you like and you will can earn lot money in future. We hope.....

Here, the time has passed quickly. Soon Juliana will arrive (three months....) and after I come back to Brazil with my backpack full of interesting experiences.

I started my work as deliver newspapers in last week. I liked. It's a hard work (during my first night work, my water to drink froze), but it is also good money (more or less 50 reais/hours). I would can earn between 600 a 1200 reais for months or more...But I think than 1200 reais is good relationship work/money. In spire of hard, I hope go on. It will be a good experience of life to me.

Curiosity of the last week: The Copenhagen Post headline: "If you want to stay, you have to pay": Copenhagen is the world's second most expensive city. Only Oslo is dearer.

Have a good Sunday,

Your brother,
Alan
Copenhagen, Denmark

.....

E-mail 5:

Carta enviada para uma escola a pedido de meu primo:

Olá meu primo Luthiano!!!!

É com muito prazer que respondo sua carta, pois estou com muita saudade de escrever algumas palavras em português e também lembrar um pouquinho do tempo em que eu estudava em Santa Bárbara.

Foi um período de minha infância que eu tenho muitas saudades. Tinha muitos amigos, jogava futebol todo dia, não havia computadores, celulares, internet, mas nós éramos muito felizes com nossas simples brincadeiras.

Muito jovem fui estudar em Santa Maria. Não foi fácil morar longe de casa, da comida da mamãe, do abraço dos amigos. Morei junto com jovens estudantes de muitos lugares do Rio Grande do Sul. Vi muitas coisas boas e outras ruins. Mas tenho orgulho de ter superado esse momento e ter feito grandes amizades.

Agora estou aqui na Dinamarca, mais longe ainda da família. É uma experiência incrível, mas também muito difícil, pois agora tenho mais um desafio, que é conviver com diferentes pessoas de diferentes países e línguas completamente diferentes também.

Tenho estudado e trabalho muito, mas a lição mais importante que tenho aprendido é a importância que a minha família e meus amigos tem em minha vida. Assim, logo que retornar, gostaria de dar forte abraços em todos.

Meu conselho para você e seus colegas é que aproveitem essa fase da vida para estudar, brincar, jogar, pular, correr, gritar e sempre tenham em mente a seguinte frase: “Problemas são para deixar na cabeça, tenham sempre um sorriso no rosto e isso garantirá paz em seus corações”.

Good luck in your studies!

Teu primo,

José Alan de Almeida Acosta
Copenhagen, Denmark
14 de junho de 2005.

.....

E-mail 6:

Last letter from Spaniensgade

Dear friends,

This is not a “good bye” letter but a “see you in THE FUTURE”, because in Spaniengade I got a new family. All of you will be with me forever in my mind. Gi, Minos, José, Monica, Kasha, Alan, Vladi, Algi, André and Raimundo you were my friends, brothers, sisters every thing that a nice family could ask for.... (I’m crying already)...

Good luck my friends!! I love you all

For all the others International Students from KVL, my friends good luck and hope too see you...

For the new Spaniengade family be friends enjoy this house its not pretty but is the best house in Copenhagen. Make parties, games, dinners, HAVE A LOT OF FUN but cooperate all together.

....

Life is a joke so always a big Smile

Sérgio Batista

June 24, 2005

Azores - Portugal

Hello dear friends,

I am the last student to leave of the funny Spaniengade House, Copenhagen. It was not easy to live alone this last month. The house got so much sad after all left. But, the life is like a river, never stop to run. I think that I don’t need to write a lot because the Batista’s letter says all. Thus, I just would like to say a “see you in THE FUTURE” and all will be Welcome in house, Santa Maria, Rio Grande do Sul, South Brazil.

Alan

The last member of the Spaniengade Team

August 12, 2005

Brazil – Rio Grande do Sul

PS1. Minos Maricón, you left without to say good-bye! Anyway, you forgot your “Kasasa” (Cachaça), but don’t worry. We drank all for you, thank you very much.

PS2. My “old” now is jacosta@mail.ufsm.br or josealanacosta@hotmail.com

VITA

José Alan de Almeida Acosta, filho de José Luiz Acosta e Teresinha de Jesus de Almeida Acosta, nasceu em 8 de agosto de 1980, em Santa Bárbara do Sul, Rio Grande do Sul, Brasil.

Estudou o 1º grau na Escola Municipal Egydio Vécio, Santa Bárbara do Sul. Aos 14 anos foi selecionado pelo Colégio Técnico Industrial de Santa Maria/UFSM, onde formou em Técnico em Mecânica Industrial em 1998. Em 1999 ingressou na 63ª Turma de Agronomia da Universidade Federal de Santa Maria, graduando-se como Engenheiro Agrônomo em 2003. Em março de 2004 iniciou seus estudos de Mestrado em Ciência Solo no Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal de Santa Maria. Em julho 2004 foi selecionado pelo Programa *ALBAN* (Programa Europeu de Bolsas de Alto Nível para América Latina) para executar Mestrado Sandwich de 6 meses na The Royal Veterinary and Agriculture University, Copenhague, Dinamarca. Em Agosto de 2005, obteve aprovação para passagem direta ao Curso de Doutorado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal de Santa Maria.