

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

**CICLAGEM DE NUTRIENTES E PRODUTIVIDADE DE  
GRÃOS EM SUCESSÕES DE CULTURAS SOB  
SISTEMA PLANTIO DIRETO**

**TESE DE DOUTORADO**

**Jackson Ernani Fiorin**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2008**

**CICLAGEM DE NUTRIENTES E PRODUTIVIDADE DE  
GRÃOS EM SUCESSÕES DE CULTURAS SOB  
SISTEMA PLANTIO DIRETO**

por

**Jackson Ernani Fiorin**

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

**Orientador: Prof. Dr. Telmo Jorge Carneiro Amado**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2008**

**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

**CICLAGEM DE NUTRIENTES E PRODUTIVIDADE DE GRÃOS EM  
SUCESSÕES DE CULTURAS SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO**

elaborada por  
**Jackson Ernani Fiorin**

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

**COMISSÃO EXAMINADORA:**

---

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

---

**PhD. João Mielniczuk** (UFRGS)

---

**Dra. Margarete Nicolodi** (UFRGS)

---

**PhD. Clésio Gianello** (UFRGS)

---

**Ph.D. Flávio Luiz Foletto Eltz** (UFMS)

Santa Maria, 27 de junho de 2008.

## **AGRADECIMENTOS**

À FUNDACEP pela oportunidade da realização do curso;

Ao Professor Telmo Jorge Carneiro Amado pela orientação e pela oportunidade de convivência e aprendizagem;

Ao Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo da Universidade Federal de Santa Maria e seus professores pela formação acadêmica e convivência;

Aos professores do Comitê de Orientação e das Bancas de Qualificação e Examinadora pelas contribuições para o aprimoramento deste trabalho.

Aos professores Luiz S. M. Mutti e Dalvan Reinert, pela iniciação e continuidade em pesquisa e ensinamentos em ciência do solo.

Aos colegas e funcionários da FUNDACEP, pela convivência, amizade e auxílio na realização deste trabalho.

A Granja Arns (Cruz Alta, RS) pela cedência e auxílio na condução da área experimental, em especial, ao Eng<sup>o</sup> Agr<sup>o</sup> Ulfried Arns idealizador das sucessões de culturas componente deste projeto de pesquisa;

A minha esposa Graziela e aos meus filhos Junior e Vitória pela compreensão e permanente estímulo;

A meus pais pelo apoio, incentivo e por sempre terem acreditado no aprendizado que me proporcionaram;

Aos amigos que estiveram presentes e ajudaram muito tornando possível a execução do Curso de Doutorado, aos colegas de estudo Alexandre, Rosane, Alan, Benjamim, ao Luciano Pês pelo auxílio na finalização do trabalho, entre outros, à Equipe do Setor de Uso, Manejo e Conservação de Solo e da Água da UFSM pelo auxílio, amizade e convivência;

A Deus por permitir que tudo isso tenha sido uma realidade;

A todos não citados, mas que de alguma maneira colaboraram nessa jornada, meus agradecimentos.

## RESUMO

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

### **CICLAGEM DE NUTRIENTES E PRODUTIVIDADE DE GRÃOS EM SUCESSÕES DE CULTURAS SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO**

AUTOR: JACKSON ERNANI FIORIN

ORIENTADOR: TELMO JORGE CARNEIRO AMADO

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 27 de junho de 2008.

A adoção do sistema plantio direto com a manutenção dos resíduos culturais na superfície do solo e a redução do seu revolvimento provocam um aumento do teor da matéria orgânica do solo, que, associado à localização superficial dos fertilizantes, induz a modificações na dinâmica dos nutrientes e suas relações com as plantas. Um experimento de longa duração foi conduzido de 1997 a 2007, em Cruz Alta (RS), com o objetivo de selecionar sucessões de culturas mais eficientes na ciclagem de N, P e K, acúmulo de carbono orgânico do solo e na manutenção da produtividade. O delineamento experimental foi o de blocos casualizados com quatro repetições. As sucessões de culturas são constituídas por combinações de plantas de cobertura de inverno e de verão intercaladas com culturas produtoras de grãos: (1) nabo/milho/nabo/trigo/soja; (2) aveia/milho/feijão/trigo/soja; (3) ervilhaca+adubação/milho/nabo/trigo/soja; (4) ervilhaca+adubação/milho/crotalária/trigo/soja; (5) ervilhaca/milho/nabo/trigo/soja; (6) ervilhaca/milho/crotalária/trigo/soja. Nos tratamentos 3 e 4, foram aplicados, no período de estudo, 324 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e de K<sub>2</sub>O. Com o objetivo de avaliar a resposta à adubação com NPK em sucessões de culturas com e sem adubação, por 8 anos, no 9º e 10º anos, foram realizados estudos de doses de N (0, 40, 80, 120 kg ha<sup>-1</sup>), de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> (0, 30, 60, 90 kg ha<sup>-1</sup>) e de K<sub>2</sub>O (0, 40, 80 kg ha<sup>-1</sup>), objetivando avaliar o efeito da adubação e da ciclagem de nutrientes nas diferentes sucessões de culturas. Foram avaliados a produtividade e os balanços N, P, K, determinados com base nas estimativas de entradas (adição via fixação biológica de N, adubação com P e K), saídas (exportação de N, P, K nos grãos colhidos), ciclagem N, P, K (nutrientes contidos nos resíduos culturais). As maiores adições de N, absorção, ciclagem, exportação de N, P, K e produtividade de milho, trigo e soja são observadas nas sucessões de culturas que incluem leguminosas. As sucessões nabo/nabo e aveia/feijão mostraram-se inferiores na adição de N, absorção, ciclagem, exportação de N, P, K e produtividade. As sucessões de culturas que incluem ervilhaca antes do milho e nabo forrageiro entre milho e trigo, foram mais eficientes em manter a produtividade. A ciclagem de nutrientes teve alta relação com a produtividade. As sucessões de culturas apresentaram diferentes comportamentos na expressão do rendimento para um mesmo teor do nutriente no solo. O incremento dos estoques de COS pelas sucessões de culturas variou de 0,31 a 1,00 Mg ha ano<sup>-1</sup>. A contribuição das culturas de milho, plantas de cobertura de verão, de inverno, da soja e do trigo, foi de 31,7%, 20,4%, 19,5%, 14,8% e 13,7%, respectivamente, da adição de C no período de 8 anos.

**PALAVRAS-CHAVE:** plantio direto; sucessões de culturas; ciclagem de nutrientes; adubação das culturas; seqüestro de carbono.

## GENERAL ABSTRACT

Doctor Thesis  
Soil Science Graduate Program  
Santa Maria Federal University

### NUTRIENT CYCLING AND GRAIN CROP YIELD IN CROPPING SYSTEMS UNDER NO-TILLAGE

AUTHOR: JACKSON ERNANI FIORIN  
ADVISER: TELMO JORGE CARNEIRO AMADO  
Place and Date: Santa Maria, Juno 27<sup>th</sup>, 2008

The no-tillage adoption combined with the presence of crop residues on soil surface and minimum soil disturbance increase the soil organic matter content, that associated with broadcast fertilization, change the nutrient dynamic and its relationship with plant nutrition. This study was carried out in a long term experiment (1997 to 2007) in Cruz Alta (RS) aim to select cropping systems efficient in nutrient cycling of N,P and K and maintain crop yield under no-tillage. The experimental design was randomized blocks with four replications. The cropping systems were composed by cover crops and cash crops: 1) radish oil/maize/radish oil/wheat/soybean; 2) black oat/maize/black beans/wheat/soybean; 3) common vetch/maize/radish/wheat/soybean; 4) common vetch/maize/sunhemp/wheat/soybean; 5) common vetch/maize/radish/wheat/soybean; 6) common vetch/maize/sunhemp/wheat/soybean. In treatments 3 and 4 were applied 324 kg ha<sup>-1</sup> P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> and K<sub>2</sub>O during the experimental period. The N fertilization wasn't used in all treatments. With the objective to evaluate the NPK fertilization response in 9 and 10<sup>th</sup> year were applied the N rates (0, 40, 80, 120 kg ha<sup>-1</sup>), P (0, 30, 60, 90 kg ha<sup>-1</sup>) and K (0, 30, 60, 90 kg ha<sup>-1</sup>) in maize and wheat. In soybean only residual effect was evaluated. The yields, nutrient balance trough inputs (biologic fixation of N and P and K mineral fertilization) and outputs (N, P and K exported by harvest), nutrient cycling (nutrients uptake by cover crops and commercial crops) was determined. The higher N input, nutrient uptake, nutrient exported in grain and corn, wheat and soybean yield were higher in cropping systems with legumes. The sucession of radish oil/radish oil and black oat/beans had lower N input, nutrient uptake, nutrient cycling, nutrient exported in grain and yield. The cropping systems with common vetch before maize and radish oil between maize and wheat were efficient in maintain the crop yield. The nutrient cycling had high relationship with crop yield. The cropping systems show different yield potential to the same content of soil nutrient. The increment of soil organic carbon among cropping systems ranged from 0.31 and 1.00 Mg ha<sup>-1</sup> year<sup>-1</sup>. The carbon input were 31.7%, 20.4%, 19.5%, 14.8% and 13.7% to maize, summer cover crops, winter cover crops, soybean and wheat respectively in average of 8 years.

**KEY WORDS:** No-till, cropping systems, nutrients cycling, crop fertilization, carbon sequestration.

## LISTA DE TABELAS

TABELA 1.1 – Seqüência das espécies utilizadas nas diferentes sucessões de culturas em cada ciclo de rotação e o ano agrícola correspondente .....	22
TABELA 1.2 - Data de semeadura, de manejo e/ou colheita das culturas nas sucessões e adubação utilizada nos tratamentos 3 e 4 por ocasião da semeadura da ervilhaca .....	23
TABELA 1.3 - Índices de colheita (IC) para trigo, soja e milho, por faixas de produtividades ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), determinados nos anos agrícolas 2004, 2004/05 e 2005/06, respectivamente .....	25
TABELA 1.4 - Percentagem de exportação de N, P e K em grãos de trigo, soja e milho em relação à absorção total pela cultura.....	26
TABELA 1.5 - Teores médios de N, P e K nos grãos de trigo, soja, milho e feijão .....	26
TABELA 1.6 - Adição, absorção (raízes+parte aérea) e contribuição de N pelo solo (absorção-adição) em diferentes sucessões de culturas, acumuladas em cada ciclo de rotação e no período de 10 anos.....	28
TABELA 1.7 - Absorção de P e K em diferentes sucessões de culturas, acumulada em cada ciclo de rotação e no período de 10 anos.....	31
TABELA 1.8 - Exportação de N, P e K pelas culturas de milho, feijão, trigo e soja em diferentes sucessões de culturas, acumulada em cada ciclo de rotação e no período de 10 anos.....	33
TABELA 1.9 - Ciclagem de N, P e K em diferentes sucessões de culturas, acumulada em cada ciclo de rotação e no período de 10 anos.	34
TABELA 2.1 - Produtividade de massa seca total (raízes+parte aérea) de plantas de cobertura de inverno em diferentes sucessões de culturas, em cada cultivo e o total em 5 cultivos .....	42
TABELA 2.2 - Produtividade de massa seca total (raízes+parte aérea) e de grãos de milho em diferentes sucessões de culturas, em cada cultivo e o total em 5 cultivos.....	44
TABELA 2.3 - Produtividade de massa seca total (raízes+parte aérea) de plantas de cobertura de verão ou feijão em diferentes sucessões de culturas, acumulado em cada cultivo e o total em 5 cultivos.....	45

TABELA 2.4 - Produtividade de massa seca total (raízes+parte aérea) e de grãos de trigo em diferentes sucessões de culturas, em cada cultivo e o total em 5 cultivos.....	47
TABELA 2.5 - Produtividade de massa seca total (raízes+parte aérea) e de grãos de soja em diferentes sucessões de culturas, em cada cultivo e o total em 5 cultivos.....	48
TABELA 2.6 - Produtividade de massa seca total (raízes+parte aérea) e de grãos acumulada em cada ciclo de rotação e total no período de 10 anos nas diferentes sucessões de culturas.....	49
TABELA 3.1 - Balanço (adição-exportação) e balanço aparente (ciclagem-exportação) de N em diferentes sucessões de culturas, acumulado em cada ciclo de rotação e no período de 10 anos .....	59
TABELA 3.2 - Balanço (adição-exportação) de P e K em diferentes sucessões de culturas acumulado em cada ciclo de rotação e no período de 10 anos.....	65
TABELA 3.3 - Balanço aparente (ciclagem-exportação) de P e K em diferentes sucessões de culturas acumulado em cada ciclo de rotação e no período de 10 anos.....	66
TABELA 4.1 - Doses de N, P e K utilizadas no milho e trigo no 5º ciclo de rotação de culturas (9º e 10º anos) em diferentes sucessões de culturas do experimento cultivado há 11 anos no SPD.....	76
TABELA 4.2 - Teor de P e K do solo na condição original (0 a 10 cm), quantidades de P e K aplicados via adubação e exportados pelas culturas em 8 anos (1997-2005) e teor de P e K no solo na condição inicial (0 a 10 cm) em diferentes sucessões de culturas.....	77
TABELA 4.3 - Produtividade de grãos de milho ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) em resposta a doses de N, P e K cultivado em diferentes sucessões de culturas.....	79
TABELA 4.4 - Produtividade de grãos de trigo ( $\text{kg há}^{-1}$ ) em resposta a doses de N, P e K, cultivado em diferentes sucessões de culturas.....	82
TABELA 4.5 - Produtividade de grãos de soja em resposta a doses de N, P e K aplicados em milho e trigo cultivados em diferentes sucessões de culturas .....	84
TABELA 5.1 - Densidade do solo em diferentes sucessões de culturas..	96
TABELA 5.2 - Densidade do solo, concentração e estoque de C da área de campo nativo. (Jantalia, 2005).....	97
TABELA 5.3 - Adição de carbono em diferentes sucessões de culturas, acumulado por cultura (4 cultivos) e no período de 8 anos .....	98
TABELA 5.4 - Estoque de carbono orgânico particulado (COP, $>53 \mu\text{m}$ ), associado aos minerais (COAM, $<53 \mu\text{m}$ ) e total (COT) determinados em massa equivalente e camada equivalente de solo em diferentes sucessões de culturas.....	101



## LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1.1 - Croqui de campo parcial (duas repetições) do experimento de longa duração. Em destaque as sucessões de culturas que foram avaliadas no estudo.....	21
FIGURA 2.1 - Potencial de produtividade de massa seca de nabo forrageiro pela repetição antes e após o milho, a cada dois anos, comparativamente à sucessão que utiliza nabo uma vez, a cada dois anos, somente antes do milho, ou somente entre milho e trigo .....	43
FIGURA 3.1 - Relação entre adição e absorção, entre adição e ciclagem de N, acumuladas em diferentes sucessões de culturas, no período de 10 anos .....	56
FIGURA 3.2 - Relação entre ciclagem e absorção, entre absorção e exportação de N, acumuladas em diferentes sucessões de culturas, no período de 10 anos .....	57
FIGURA 3.3 - Relação entre a adição e a ciclagem de N com a produtividade acumulada de massa seca e de grãos em diferentes sucessões de culturas, no período de 10 anos .....	58
FIGURA 3.4 - Percentagem de exportação e ciclagem acumulada de N em diferentes sucessões de culturas no período de 10 anos .....	60
FIGURA 3.5 - Relação entre a adição e a ciclagem de N com o fornecimento de N do solo em diferentes sucessões de culturas, no período de 10 anos .....	62
FIGURA 3.6 - Relação entre a adição e a ciclagem de N com a absorção acumulada de P e K em diferentes sucessões de culturas, no período de 10 anos .....	63
FIGURA 3.7 - Relação entre a ciclagem e absorção, entre a absorção e exportação acumulada de P em diferentes sucessões de culturas, no período de 10 anos .....	64
FIGURA 3.8 - Relação entre a ciclagem e absorção, entre a absorção e exportação acumulada de K em diferentes sucessões de culturas, no período de 10 anos .....	64
FIGURA 3.9 - Percentagem de exportação e ciclagem acumulada de P em diferentes sucessões de culturas no período de 10 anos .....	67

FIGURA 3.10 - Percentagem de exportação e ciclagem acumulada de K em diferentes sucessões de culturas no período de 10 anos .....	67
FIGURA 3.11 - Relação entre a ciclagem de P e de K com a produtividade acumulada de massa seca e de grãos em diferentes sucessões de culturas no período de 10 anos .....	68
FIGURA 4.1 - Croqui de campo (detalhe da subdivisão das parcelas) do experimento de longa duração no 5º ciclo de rotação, e os tratamentos (doses) de adubação avaliados no estudo. ....	77
FIGURA 4.2 - Curva de resposta a doses de N e P na cultura do milho cultivado em diferentes sucessões de culturas (MET= Máxima Eficiência Técnica; MEE= Máxima Eficiência Econômica).....	80
FIGURA 4.3 - Relação entre o teor de P e K no solo e o rendimento relativo de grãos de milho e soja cultivados em diferentes sucessões de culturas .....	86
FIGURA 4.4 - Relação entre o teor de P e K (0-10 cm) e o rendimento relativo de grãos de milho, trigo e soja cultivados em diferentes sucessões de culturas no 1º, 6º, 8º e 10º anos.....	88
FIGURA 5.1 - Relação entre adição, ciclagem de N e adição de carbono, acumuladas em diferentes sucessões de culturas, no período de 8 anos .....	100
FIGURA 5.2 - Variação do COT do solo cultivado a partir de campo nativo por cerca de 25 anos em preparo convencional, 11 anos de SPD e após a instalação do experimento com sucessões de culturas, na camada de 0 a 20 cm, calculado pela massa equivalente .....	102

## LISTA DE APÊNDICES

APÊNDICE A - Precipitação ocorrida durante o período de 1974 a 2007. Dados da Estação Meteorológica da FUNDACEP, Cruz Alta, RS.....	116
APÊNDICE B - Valores de F Tratamento (F Trat.) e coeficiente de variação (CV) da análise de variância realizada por ciclo de rotação e o total no período de 10 anos.....	117
APÊNDICE C - Produção de grãos de feijão em diferentes sucessões de culturas, em cada ciclo de rotação e o total em 10 anos .....	118
APÊNDICE D - Valores de F Tratamento e coeficiente de variação (CV) da análise da variância da produtividade de grãos nos estudos de doses de N, P e K em milho, trigo e soja.....	119
APÊNDICE E - Produção de massa seca total (parte aérea+raízes) e ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura de verão, em resposta a doses de N, P e K aplicadas na cultura do milho em diferentes sucessões de culturas .....	120
APÊNDICE F - Valores de F Tratamento e coeficiente de variação (CV) da análise da variância da adição de carbono por diferentes culturas, o total em 4 cultivos e na sucessão de cultura.....	121
APÊNDICE G - Valores de F Tratamento e probabilidade de F da análise da variância do estoque de carbono orgânico particulado (COP, >53 $\mu\text{m}$ ), associado aos minerais (COAM, <53 $\mu\text{m}$ ) e total (COT) determinados em massa equivalente e camada equivalente de solo em diferentes sucessões de culturas.....	121
APÊNDICE H - Adição de carbono por plantas de cobertura de inverno, milho, plantas de cobertura de verão ou feijão, trigo e soja, em diferentes sucessões de culturas, em cada ciclo de rotação e o total em 4 cultivos...	122
APÊNDICE I - Relação C/N de plantas de cobertura de inverno, milho, plantas de cobertura de verão ou feijão preto, trigo e soja, em cada ciclo de rotação e a média dos cultivos.....	123

## SUMÁRIO

<b>INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>14</b>
<b>1 - ESTIMATIVAS DE ADIÇÃO, ABSORÇÃO, EXPORTAÇÃO E CICLAGEM DE NUTRIENTES POR SUCESSÕES DE CULTURAS NO SISTEMA PLANTIO DIRETO .....</b>	<b>17</b>
1.1 Introdução .....	17
1.2 Material e Métodos .....	19
1.3 Resultados e Discussão .....	28
1.4 Conclusões .....	36
<b>2 - PRODUTIVIDADE DE MASSA SECA E DE GRÃOS AFETADAS POR SUCESSÕES DE CULTURAS NO SISTEMA PLANTIO DIRETO .....</b>	<b>37</b>
2.1 Introdução .....	37
2.2 Material e Métodos .....	40
2.3 Resultados e Discussão .....	42
2.4 Conclusões .....	50
<b>3 - RELAÇÃO ENTRE ADIÇÃO, ABSORÇÃO, CICLAGEM, EXPORTAÇÃO DE NUTRIENTES E A PRODUTIVIDADE EM SUCESSÕES DE CULTURAS NO SISTEMA PLANTIO DIRETO .....</b>	<b>51</b>
3.1 Introdução .....	51
3.2 Material e Métodos .....	54
3.3 Resultados e Discussão .....	56
3.4 Conclusões .....	70
<b>4 - RESPOSTA A NITROGÊNIO, FÓSFORO E POTÁSSIO EM SUCESSÕES DE CULTURAS NO SISTEMA PLANTIO DIRETO .....</b>	<b>71</b>
4.1 Introdução .....	71
4.2 Material e Métodos .....	75
4.3 Resultados e Discussão .....	79
4.4 Conclusões .....	89
<b>5 - ACÚMULO DE CARBONO AFETADO POR DIFERENTES SUCESSÕES DE CULTURAS NO SISTEMA PLANTIO DIRETO .....</b>	<b>90</b>
5.1 Introdução .....	90
5.2 Material e Métodos .....	94
5.3 Resultados e Discussão .....	98

5.4 Conclusões .....	103
<b>6 – CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>104</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>105</b>
<b>APÊNDICES .....</b>	<b>116</b>

## Introdução Geral

A adoção do sistema plantio direto (SPD) com a redução do revolvimento e a manutenção dos resíduos culturais na superfície do solo promove o controle da erosão e importantes mudanças nas condições do solo. Com o passar do tempo verifica-se, normalmente, um aumento do teor de matéria orgânica do solo (MO), que associado à localização superficial dos fertilizantes, aumentam os estoques de nutrientes, melhoram os atributos químicos relacionados à fertilidade do solo e à nutrição das plantas. A manutenção dos resíduos na superfície faz com o que o solo se mantenha com teor de umidade mais elevado e favoreça os mecanismos de suprimento de nutrientes às raízes das plantas, que também se concentram nessa camada enriquecida em nutrientes. Outro aspecto importante é o aumento da atividade biológica do solo que é responsável pela ciclagem de nutrientes. Isso induz a modificações na dinâmica dos nutrientes e na nutrição das plantas.

A intensidade desses e outros processos num sistema de produção em plantio direto é variável em função da rotação de culturas e da inclusão de plantas de coberturas do solo, tanto de inverno como de verão e/ou de entressafra. Isso está associado à elevada produção de resíduos e à ciclagem e/ou absorção de nutrientes por essas espécies que, através do seu sistema radicular, se desenvolvem em um maior volume de solo e buscam em profundidade os nutrientes que muitas vezes estão menos acessíveis pela sua localização ou em formas menos disponíveis, deixando-os através dos seus resíduos culturais ou exsudatos das raízes disponíveis às culturas de grãos. Nesses sistemas, as perdas de nutrientes por erosão ou lixiviação são reduzidas e a eficiência do uso do nutriente é aumentada. Nesse sentido as leguminosas se destacam tanto pelo aporte de N ao solo como pela elevada produção de fitomassa, apresentando, portanto, um grande potencial em manter ou aumentar os estoques de MO e de incrementar a ciclagem de nutrientes, requisitos fundamentais para incrementar a qualidade do solo e a sustentabilidade dos sistemas agrícolas.

Várias informações já existem em relação aos efeitos de sucessões de culturas baseados em gramíneas e leguminosas sobre os estoques de MO e de nutrientes em solos sob SPD (Bayer et al., 2000; Pillon, 2000; Amado et al., 2001, Lovato, 2001, Diekow, 2003). No entanto, ainda é necessário complementar tais

informações com outras que associem a dinâmica de C com a ciclagem de nutrientes e suas relações com o rendimento, em sucessões de culturas intensivas dos sistemas produtivos da Região Sul do Brasil.

Nesse sentido, o projeto objetiva ampliar o conhecimento referente ao potencial de sucessões de culturas intensivas em aumentar a ciclagem de nutrientes, em manter ou aumentar os estoques de MO, e aumentar a eficiência do uso de nutrientes existentes em solo agrícola cuja fertilidade já foi melhorada anteriormente pelo histórico de adubações. Esse conhecimento é relevante para garantir a manutenção, a longo prazo, da produtividade de grãos no SPD em um cenário de fertilizantes finitos, escassos e com preços elevados e com demanda crescente para reduzir os impactos ambientais da agricultura comercial. Portanto, produzir mais com menos é o grande desafio da agricultura contemporânea nas próximas décadas, e esse projeto insere-se nesse contexto de redesenhar os sistemas produtivos buscando dotá-los de maior eficiência.

## **Meta**

Selecionar sucessões de culturas que, pelo seu potencial de elevada ciclagem de nutrientes, proporcionem maior eficiência do uso de nutrientes pré-existentes no solo agrícola, contribuindo para a manutenção da produtividade das culturas por um período longo de tempo com aporte restrito ou nulo de fertilizantes.

## **Hipóteses**

- É possível redesenhar as sucessões de culturas no SPD visando a melhor aproveitar os nutrientes adicionados por fertilizações pretéritas, reduzindo o impacto ambiental e os custos de produção da agricultura.

## Objetivos

- Selecionar sucessões de culturas mais eficientes na ciclagem de nutrientes, e na manutenção da produtividade no SPD.
- Quantificar a adição, a absorção, a ciclagem e a exportação de N, P, K em diferentes sucessões de culturas.
- Determinar por quanto tempo é possível manter a produtividade de culturas de grãos sem a adição de fertilizantes com o uso de culturas de cobertura com elevado potencial de ciclagem de nutrientes.
- Avaliar a relação entre a ciclagem de nutrientes, a nutrição de plantas e o rendimento de culturas sob SPD.
- Avaliar a resposta à adubação de N, P e K em diferentes sucessões de culturas sob SPD.
- Quantificar o acúmulo de carbono orgânico do solo por diferentes sucessões de culturas sob SPD.

Dentro desse contexto, a tese de doutoramento foi estruturada em cinco capítulos, da forma como segue:

- a) o capítulo 1 apresenta as estimativas de adição, absorção, ciclagem e exportação de N, P e K por diversas sucessões de culturas sob SPD, por um período de estudo de 10 anos;
- b) o capítulo 2 apresenta o comportamento das diferentes sucessões de culturas na manutenção da produtividade de massa seca e de grãos ao longo de um período de estudo de 10 anos;
- c) o capítulo 3 demonstra a relação entre adição, absorção, ciclagem, exportação de N, P e K e a produtividade em sucessões de culturas no SPD;
- d) o capítulo 4 apresenta um estudo de resposta à adubação de N, P e K, realizado no 5º ciclo de rotação de culturas (9º e 10º anos), em diferentes sucessões de culturas manejadas com e sem adubação por 8 anos (4 ciclos).
- e) o capítulo 5 quantifica o estoque de carbono orgânico do solo afetado por diferentes sucessões de culturas sob SPD após o período de estudo de 8 anos.



# **1 - ESTIMATIVAS DE ADIÇÃO, ABSORÇÃO, EXPORTAÇÃO E CICLAGEM DE NUTRIENTES POR SUCESSÕES DE CULTURAS NO SISTEMA PLANTIO DIRETO**

## **1.1 Introdução**

O plantio direto associado ao uso de sucessões de culturas baseados em gramíneas, crucíferas e leguminosas têm demonstrado ser uma das práticas mais eficazes no melhoramento de atributos de solos, principalmente sobre os estoques de matéria orgânica (MO) e de nutrientes em solos (Bayer et al., 2000; Pillon, 2000; Amado et al., 2001, Lovato, 2001, Diekow, 2003). O eficiente controle da erosão, o incremento do teor de MO, a ciclagem de nutrientes e o estímulo à atividade biológica, entre outros, promove um gradual incremento na qualidade do solo (Amado & Eltz, 2003) e na estabilidade estrutural do solo (Reichert et al., 2003), proporcionando uma maior sustentabilidade do SPD.

A intensidade desses e outros processos poderão modificar profundamente as condições em que as plantas passarão a ser cultivadas. Um sistema agrícola economicamente sustentável deverá ser baseado na rotação de culturas e na inclusão de plantas de coberturas do solo, tanto de inverno como de verão e/ou de entressafra. As plantas de cobertura do solo, de maneira geral, são espécies agressivas e rústicas, desenvolvendo-se bem em condições adversas de solo, rompendo camadas adensadas, promovendo a aeração, a estruturação e aumentando a infiltração de água. Aliado a isso, essas espécies, através do seu sistema radicular rompem o solo e buscam em profundidade os nutrientes que, muitas vezes, estão em formas menos disponíveis, os quais são liberados gradualmente dos seus resíduos nas camadas superficiais, durante o processo de decomposição, e ficam disponíveis para as culturas subseqüentes (Fiorin, 1999). No entanto, a quantidade de nutrientes contidos nos resíduos culturais é muito variável e depende das espécies cultivadas, do solo e das demais condições que afetam o desenvolvimento das plantas.

A adoção do SPD proporciona o controle da erosão, demonstrando ser prática eficiente na redução de perdas dos nutrientes por esse processo. Num sistema de produção bem manejado, e com a inclusão de plantas de cobertura na entressafra, pressupõe-se que a lixiviação poderia ser até menor, comparada a de outros sistemas de cultivos, aliado ao fato de que a presença de culturas, segundo Gonçalves et al. (2000), favorece a ciclagem de  $\text{N-NO}_3^-$  das camadas mais profundas. Aliado a isso, a maior atividade microbiana no solo cultivado no SPD é mais competitiva com o sistema radicular das plantas em absorver o N mineral do solo e, dessa forma, deixa-o menos suscetível a perdas.

No SPD, em que os resíduos permanecem na superfície do solo, é preciso determinar a intensidade do processo de imobilização/mineralização do N no solo, a fim de aumentar a eficiência da adubação nitrogenada. Na realidade, o restabelecimento entre a imobilização/liberação está intimamente ligado às condições nas quais as lavouras sob plantio direto vêm sendo conduzidas. Esse processo é válido para sucessões de culturas que adicionam altas quantidades de resíduos e pode ser acelerado em sucessões envolvendo leguminosas (Muzilli et al., 1983; Heinzmann, 1985; Derpsch et al., 1985; Bayer & Mielniczuk, 1997b; Rheinheimer et al., 1998).

As leguminosas, por fixarem N do ar em simbiose com bactérias que formam nódulos nas raízes, devem ser incluídas na rotação de culturas que, além da cobertura do solo, propiciem benefícios para as culturas economicamente mais rentáveis (Fiorin, 2007). Além das leguminosas, existem plantas de outras famílias com alta capacidade de ciclagem de nutrientes, como é o caso do nabo forrageiro (Fiorin, 1999; Rossato, 2004).

Portanto, as sucessões de culturas podem contribuir para a manutenção do equilíbrio dos nutrientes no solo e para o aumento da sua fertilidade, além de permitir melhor utilização dos insumos agrícolas. A adição regular de resíduos de adubos verdes aos vários solos tropicais contribui com a conservação do solo e da água, promovendo, principalmente, a melhoria da estrutura que favorece a aeração e a infiltração de água no solo, permitindo uma maior penetração das raízes (Lal, 1986). Além disso, propicia melhor aproveitamento de adubos químicos e redução nos custos com adubação mineral, uma vez que promove aumento da atividade biológica do solo (Hernani et al., 1995). A eficiência dessas sucessões depende da sincronização entre a ciclagem dos nutrientes e as fases de maior absorção pelas

culturas, da fixação biológica do  $N_2$  e do suprimento de nutrientes pelos resíduos das culturas na sucessão, sem prescindir da elevada produtividade das culturas.

No entanto, a maioria dos trabalhos que envolvem o uso de diferentes espécies de plantas de cobertura de solo em sucessões de culturas, somente tem avaliado o rendimento de matéria verde e seca dessas espécies (Igue et al., 1984; Derpsch et al., 1991), ou apresentam a composição química de algumas espécies (Calegari, 1990, 1995; Derpsch & Calegari, 1992). Em outros, foram determinadas as quantidades de nutrientes presentes na biomassa e passíveis de serem reciclados (De-Polli & Chada, 1989; Derpsch et al., 1991; Sá, 1993; Wisniewski & Holtz, 1997). Menos pesquisas foram realizadas para estimar as quantidades de nutrientes que são adicionadas, absorvidas, exportadas ou cicladas em sucessões de culturas a longo prazo no SPD.

O objetivo desse trabalho foi estimar a adição, a absorção, a ciclagem e a exportação de N, P e K por diversas sucessões de culturas em solo cultivado a longo prazo no SPD.

## 1.2 Material e Métodos

### 1.2.1 Descrição da área experimental

O trabalho foi desenvolvido de abril/1997 a maio/2007, em uma área localizada na Granja Arns, em Cruz Alta, RS, à latitude de 28°36'113" Sul, longitude de 53°42'035" Oeste e altitude média de 418 m. A área vinha sendo manejada no SPD desde 1986, e apresenta declividade média de 4,0%. Anteriormente a isso, foi utilizado o preparo convencional, com a sucessão trigo/soja por aproximadamente 25 anos, e em grande parte desse período, os resíduos de trigo eram queimados. (Benno Arns, comunicação pessoal).

O solo do local é classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico (Embrapa, 1999). Na instalação do experimento, o solo apresentava as seguintes características químicas na camada de 0 a 10 cm: 550 g  $kg^{-1}$  de argila; pH  $H_2O$  5,1; Índice SMP 5,5; 38 g  $kg^{-1}$  de M.O.; 17,2 mg  $dm^{-3}$  de P; 162 mg  $dm^{-3}$  de K; 5,0  $cmol_c$

$\text{dm}^{-3}$  de cálcio;  $2,0 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  de magnésio,  $0,7 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$  de alumínio e 50% de saturação por bases.

O clima é subtropical úmido, tipo Cfa 2a, segundo a classificação climática de Köppen (Moreno, 1961). A precipitação média anual é de 1755 mm (média do período de 1974 a 2007), dados da Estação Meteorológica da FUNDACEP, distante 4,5 km da área experimental. As chuvas são distribuídas durante o ano, mas com ocorrência de períodos de estiagem especialmente nos meses de dezembro, janeiro e fevereiro (APÊNDICE A).

O estudo utilizou-se de diferentes sucessões de culturas de um experimento de longa duração, constituídas por combinações de plantas de cobertura de inverno, de verão e/ou culturas de safrinha intercaladas com as principais culturas produtoras de grãos da região. A seqüência das culturas foi: planta de cobertura de inverno - milho - planta de cobertura de verão e/ou culturas de safrinha - trigo - soja. As plantas de cobertura de inverno foram constituídas pela: aveia preta (*Avena strigosa Schreber*), ervilhaca comum (*Vicia sativa L.*), aveia preta + ervilhaca, tremoço azul (*Lupinus angustifolius*), nabo forrageiro (*Raphanus sativus var. oleiformis*), todas sem adubação, tendo-se um tratamento de ervilhaca com adubação de P e K. As plantas de cobertura de verão e/ou culturas de safrinha foram: nabo forrageiro (*Raphanus sativus L. var. oleiformis L.*) e crotalária juncea (*Crotalaria juncea L.*) para adubação verde; feijão preto (*Phaseolus vulgaris L.*) como cultura para produção de grãos.

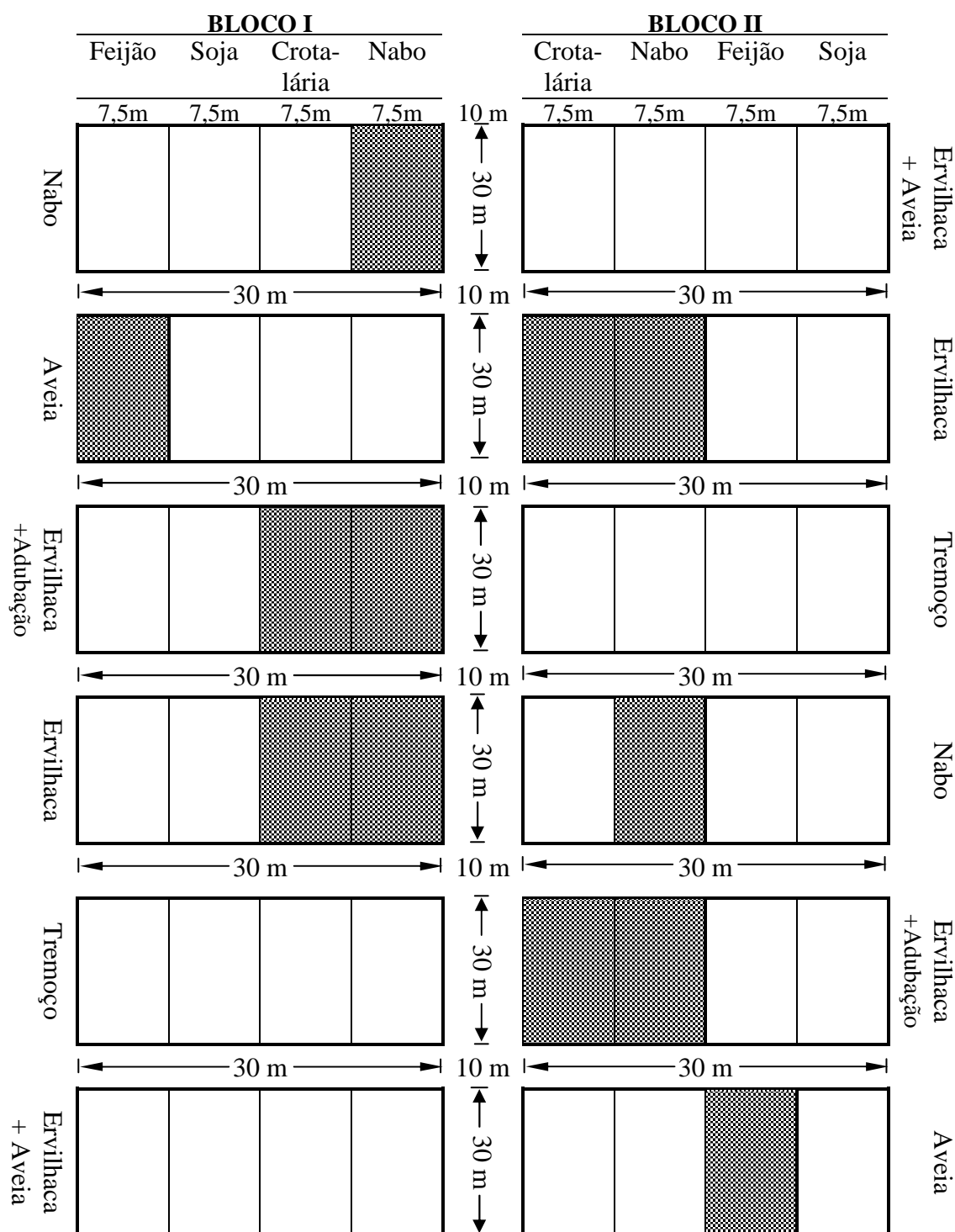
O estudo utilizou-se das seguintes sucessões de culturas (tratamentos):

- T1. Nabo–milho–nabo–trigo–soja (n/m/n/t/s);
- T2. Aveia–milho–feijão–trigo–soja (a/m/f/t/s);
- T3. Ervilhaca com adubação P+K–milho–nabo–trigo–soja ( $e^{(a)}$ /m/n/t/s);
- T4. Ervilhaca com adubação P+K–milho–crotalária–trigo–soja ( $e^{(a)}$ /m/c/t/s);
- T5. Ervilhaca–milho–nabo–trigo–soja (e/m/n/t/s);
- T6. Ervilhaca–milho–crotalária–trigo–soja (e/m/c/t/s);

<sup>(a)</sup> Adubação com fósforo e potássio na semeadura da ervilhaca

Na Figura 1.1 é apresentado o croqui de campo do experimento de longa duração e, em destaque, as sucessões de culturas que foram avaliadas no estudo. A descrição das sucessões de culturas utilizadas em cada ciclo de rotação, e o ano agrícola, é apresentada na Tabela 1.1. Nessas sucessões completam-se o ciclo da

rotação de culturas a cada 2 anos. O período do estudo foi de 10 anos ou 5 ciclos de rotação de culturas. O delineamento experimental foi o de blocos ao acaso com quatro repetições e parcelas de 7,5m x 30m (225 m<sup>2</sup>).



**Figura 1.1 - Croqui de campo parcial (duas repetições) do experimento de longa duração. Em destaque as sucessões de culturas que foram avaliadas no estudo.**

As datas de semeadura e de manejo e/ou colheita das espécies utilizadas são apresentadas na Tabela 1.2, assim como as quantidades de  $P_2O_5$  e  $K_2O$  adicionadas ao solo nos tratamentos 3 e 4 por ocasião da semeadura da ervilhaca, a cada 2 anos, com o objetivo de suprir as necessidades de P e K para o sistema de produção. Não foi utilizada adubação química com N com o objetivo de avaliar somente o efeito da ciclagem e/ou fixação de nutrientes pelas espécies.

As quantidades de sementes utilizadas das plantas de cobertura foram: aveia preta:  $80 \text{ kg ha}^{-1}$ , ervilhaca comum:  $40 \text{ kg ha}^{-1}$ , nabo forrageiro:  $15 \text{ kg ha}^{-1}$  e crotalária juncea:  $25 \text{ kg ha}^{-1}$ . O manejo e demais tratos culturais foram realizados seguindo as indicações técnicas específicas para cada cultura.

**Tabela 1.1 - Seqüência das espécies utilizadas nas diferentes sucessões de culturas em cada ciclo de rotação e o ano agrícola correspondente.**

Ciclo	Ano Agrícola	Sucessões de Culturas					
		1	2	3	4	5	6
1 <sup>o</sup>	1997	Nabo	Aveia	Ervilhaca <sup>(a)</sup>	Ervilhaca <sup>(a)</sup>	Ervilhaca	Ervilhaca
	1997-98	Milho	Milho	Milho	Milho	Milho	Milho
	1998	Nabo	Feijão	Nabo	Crotalária	Nabo	Crotalária
		Trigo	Trigo	Trigo	Trigo	Trigo	Trigo
2 <sup>o</sup>	1998-99	Soja	Soja	Soja	Soja	Soja	Soja
	1999	Nabo	Aveia	Ervilhaca <sup>(a)</sup>	Ervilhaca <sup>(a)</sup>	Ervilhaca	Ervilhaca
	1999-00	Milho	Milho	Milho	Milho	Milho	Milho
	2000	Nabo	Feijão	Nabo	Crotalária	Nabo	Crotalária
Trigo		Trigo	Trigo	Trigo	Trigo	Trigo	
3 <sup>o</sup>	2000-01	Soja	Soja	Soja	Soja	Soja	Soja
	2001	Nabo	Aveia	Ervilhaca <sup>(a)</sup>	Ervilhaca <sup>(a)</sup>	Ervilhaca	Ervilhaca
	2001-02	Milho	Milho	Milho	Milho	Milho	Milho
	2002	Nabo	Feijão	Nabo	Crotalária	Nabo	Crotalária
Trigo		Trigo	Trigo	Trigo	Trigo	Trigo	
4 <sup>o</sup>	2002-03	Soja	Soja	Soja	Soja	Soja	Soja
	2003	Nabo	Aveia	Ervilhaca <sup>(a)</sup>	Ervilhaca <sup>(a)</sup>	Ervilhaca	Ervilhaca
	2003-04	Milho	Milho	Milho	Milho	Milho	Milho
	2004	Nabo	Feijão	Nabo	Crotalária	Nabo	Crotalária
Trigo		Trigo	Trigo	Trigo	Trigo	Trigo	
5 <sup>o</sup>	2004-05	Soja	Soja	Soja	Soja	Soja	Soja
	2005	Nabo	Aveia	Ervilhaca <sup>(a)</sup>	Ervilhaca <sup>(a)</sup>	Ervilhaca	Ervilhaca
	2005-06	Milho	Milho	Milho	Milho	Milho	Milho
	2006	Nabo	Feijão	Nabo	Crotalária	Nabo	Crotalária
Trigo		Trigo	Trigo	Trigo	Trigo	Trigo	
2006-07	Soja	Soja	Soja	Soja	Soja	Soja	

<sup>(a)</sup> Adubação com fósforo e potássio na semeadura da ervilhaca

**Tabela 1.2 - Data de semeadura, de manejo e/ou colheita das culturas nas sucessões e adubação utilizada nos tratamentos 3 e 4 por ocasião da semeadura da ervilhaca.**

Descrição	1° Ciclo		2° Ciclo		3° Ciclo		4° Ciclo		5° Ciclo	
Culturas	----- Datas de semeadura, de manejo e/ou colheita das culturas -----									
Atividades	Semeadura	Manejo Colheita	Semeadura	Manejo Colheita	Semeadura	Manejo Colheita	Semeadura	Manejo Colheita	Semeadura	Manejo Colheita
Plantas Cobertura de Inverno	17/04/97	14/08/97	19/04/99	07/09/99	30/04/01	10/09/01	08/05/03	15/09/03	27/04/05	06/09/05
Milho	29/08/97	13/02/98	09/09/99	21/01/98	14/09/01	28/01/02	17/09/03	28/01/04	08/09/05	08/02/06
Cultura ou Plantas Cobertura Verão	14/02/98	06/06/98	16/02/00	21/06/00	08/02/02	28/05/02	09/02/04	16/06/04	18/02/06	25/05/06
Trigo	26/06/98	11/11/98	23/06/00	15/11/00	10/06/02	13/11/02	18/06/04	14/11/04	10/06/06	09/11/06
Soja	12/11/98	31/03/98	17/11/00	15/04/01	15/11/02	23/04/03	15/11/04	05/04/05	14/11/06	10/04/07
Adubação	----- Doses de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> e K <sub>2</sub> O adicionadas ao solo nos tratamentos 3 e 4 -----									
Doses	84 e 84 kg ha <sup>-1</sup>		80 e 80 kg ha <sup>-1</sup>		80 e 80 kg ha <sup>-1</sup>		80 e 80 kg ha <sup>-1</sup>		Sem adubação	

## 1.2.2 Avaliações

### 1.2.2.1 Produtividade de grãos

A produtividade de grãos das culturas de milho, trigo, soja e feijão preto foi avaliada em todos os cultivos. Os resultados foram expressos em  $\text{kg ha}^{-1}$  a 13% de umidade.

### 1.2.2.2 Produtividade de massa seca

A avaliação da produtividade de massa seca da parte aérea das plantas de cobertura, de inverno e de verão, foi realizada em todos os cultivos, próximo ao estádio de pleno florescimento das espécies imediatamente antes do manejo das mesmas (Tabela 1.2). Amostrou-se uma área de  $1 \text{ m}^2$ , em 3 subamostras por parcela. As plantas foram secas em estufa a  $55^\circ\text{C}$  até atingirem peso constante para a determinação da massa seca, expressando-se os resultados em  $\text{kg ha}^{-1}$ . Após a avaliação da produção de massa seca foi realizado o manejo químico seguido do manejo mecânico (rolo-faca) das plantas de cobertura.

A avaliação da produtividade de massa seca da parte aérea de trigo, soja e milho foi realizada nos anos agrícolas 2004, 2004/05 e 2005/06, respectivamente. A fitomassa foi determinada pela coleta de resíduos da parte aérea, no estádio da maturação fisiológica, amostrando-se uma área útil em cada parcela. As plantas foram secas em estufa a  $55^\circ\text{C}$  até atingirem peso constante para a determinação da massa seca, expressando-se os resultados em  $\text{kg ha}^{-1}$ . A produção de fitomassa na parte aérea das culturas nos outros anos agrícolas foi estimada pelo índice de colheita, que representa a relação entre a produtividade de grãos e a produção de fitomassa na parte aérea das culturas. Determinou-se o índice de colheita médio, por faixa de produtividade, com uma base de dados de 120, 120 e 210 observações de trigo, soja e milho, obtidas nos anos agrícolas de 2004, 2004/05 e 2005/06, respectivamente (Tabela 1.3). No caso do feijão preto, utilizou-se um índice de colheita de 0,50.



**Tabela 1.3 - Índices de colheita (IC) para trigo, soja e milho, por faixas de produtividades ( $\text{kg ha}^{-1}$ ), determinados nos anos agrícolas 2004, 2004/05 e 2005/06, respectivamente.**

Trigo		Soja		Milho	
Produtividade	IC	Produtividade	IC	Produtividade	IC
< 1400	0,36	< 1400	0,37	< 3200	0,38
1400-2400	0,40	1400-2400	0,44	3200-5200	0,45
> 2400	0,43	> 2400	0,48	> 5200	0,50

Sobre os valores da produção de massa seca da parte aérea foi acrescida a contribuição do sistema radicular das espécies cultivadas. A contribuição do sistema radicular baseou-se em valores médios de índices obtidos em outros trabalhos (Bayer, 1996; Da Ros, 2004; Santos, 2006), utilizada, foi a seguinte: milho 27,5%; forrageiras ou espécies não-melhoradas (aveia preta, nabo forrageiro, ervilhaca e crotalária): 25%; culturas comerciais (soja, trigo e feijão): 20% .

A partir das estimativas das produtividades de fitomassa foram calculados os valores em cada cultivo, e o total em 5 cultivos para cada espécie, e o acumulado em cada ciclo de rotação e no período de 10 anos para cada sucessão de cultura.

### 1.2.2.3 Cálculo de nutrientes adicionados, absorvidos, exportados e ciclados

A estimativa da adição de N pela fixação biológica de N atmosférico (FBN) das espécies leguminosas (ervilhaca, crotalária, soja e feijão) foi realizada com base na absorção total (parte aérea + raízes) de N pelas culturas. Considerou-se que 78% do N obtido pela cultura da soja foi proveniente da fixação biológica (Vargas & Hungria, 1997). Na estimativa da adição pela fixação biológica da ervilhaca, de acordo com resultados obtidos por Jantalia (2005), considerou-se que 76% do N foi devido a contribuição da FBN. No caso do feijão preto, considerou-se que 40% do N foi obtido pela contribuição da FBN. Na crotalária, por não dispor de uma estimativa específica para a cultura, utilizou-se os mesmos parâmetros obtidos para a ervilhaca. A adição de P e K através da adubação nos tratamentos 3 e 4 por ocasião da semeadura da ervilhaca, acumulada no período de 10 anos, foi de  $324 \text{ kg ha}^{-1}$  de  $\text{P}_2\text{O}_5$  e  $\text{K}_2\text{O}$ .

O cálculo de N, P, K absorvidos e a adição de C pelas plantas de cobertura de inverno e de verão foi realizado submetendo-se a massa seca após moagem a análise para a determinação do teor de N, P, K e C, segundo metodologia descrita por Tedesco et al. (1995). A absorção de N, P, K nas culturas de trigo, soja e milho foram estimados baseando-se na sua relação com a quantidade de nutrientes exportados (análise de grãos). Para isso, utilizou-se a relação percentual da exportação em relação à absorção total obtida por Pauletti (1998) apresentadas na Tabela 1.4. Esses valores são muito semelhantes aos encontrados na literatura. No caso do feijão preto, utilizou-se os mesmos parâmetros da cultura da soja. Foram acrescentados a contribuição do sistema radicular das culturas, conforme metodologia anteriormente descrita.

**Tabela 1.4 - Percentagem de exportação de N, P e K em grãos de trigo, soja e milho em relação à absorção total pela cultura.**

Cultura	N	P - P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K - K <sub>2</sub> O
	----- % -----		
Trigo	71,91	81,82	17,59
Soja	74,80	76,37	58,75
Milho	60,99	79,76	20,82

Fonte: Pauletti (1998).

O cálculo de N, P, K exportados pelas culturas produtoras de grãos, baseou-se nas análises de grãos das culturas de trigo, soja e milho realizadas nos anos agrícolas 2004, 2004/05 e 2005/06, respectivamente (Tabela 1.5).

**Tabela 1.5 - Teor médio de N, P e K nos grãos de trigo, soja, milho e feijão.**

Cultura	N	P - P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K - K <sub>2</sub> O
	----- kg t <sup>-1</sup> -----		
Trigo	21,00	9,39	5,52
Soja	63,60	9,16	21,36
Milho	14,75	7,44	5,28
Feijão	38,00	14,43	24,00

A contribuição de N pelo solo foi estimada através da subtração do total de N absorvido e adicionado nas diferentes sucessões de culturas.

A partir das estimativas da quantidade de N, P e K adicionados, absorvidos e exportados, foram calculados os valores da ciclagem de nutrientes e do saldo entre a adição e a exportação, em cada ciclo de rotação e sucessões de culturas. Nas culturas produtoras de grãos, a ciclagem foi considerada como o total de nutrientes absorvidos menos a exportação de nutrientes. No caso das plantas de cobertura, a ciclagem corresponde ao total de nutrientes absorvidos pela parte aérea acrescido da contribuição do sistema radicular.

Os resultados expressos em  $\text{kg ha}^{-1}$  de N,  $\text{P}_2\text{O}_5$  e  $\text{K}_2\text{O}$ , foram calculados para cada espécie, sucessões de culturas, acumulada em cada ciclo de rotação e no período de 10 anos.

### 1.2.3 Análise estatística

Na análise de variância dos resultados, quando os valores de F (Tratamento) foram significativos ao nível de 5 % de probabilidade, submeteu-se ao Teste de Duncan ( $p < 0,05$ ), usando o pacote estatístico SAS (SAS, 1989).

Na análise estatística dos resultados de adição, absorção, exportação, ciclagem de nutrientes foram avaliados a interação entre as sucessões de culturas e os ciclos de rotação. Os parâmetros estatísticos ( $F_{\text{Tratamento}}$  e coeficiente de variação) são apresentados no APÊNDICE B.

### 1.3 Resultados e Discussão

A adição, absorção e estimativa da contribuição de N pelo solo (absorção-adição) em diferentes sucessões de culturas acumuladas em cada ciclo de rotação, e no período de 10 anos, são apresentadas na Tabela 1.6. Observa-se que houve interação significativa entre as sucessões de culturas e os ciclos de rotação. Isso mostra que o comportamento da adição, absorção e estimativa da contribuição de N pelo solo nas sucessões de culturas foi diferente em cada ciclo de rotação.

**Tabela 1.6 - Adição, absorção (raízes+parte aérea) e contribuição de N pelo solo (absorção-adição) em diferentes sucessões de culturas, acumuladas em cada ciclo de rotação e no período de 10 anos.**

Sucessões de Culturas	1º Ciclo 1997-99	2º Ciclo 1999-01	3º Ciclo 2001-03	4º Ciclo 2003-05	5º Ciclo 2005-07	Total no Período 1997-2007	
----- kg ha <sup>-1</sup> -----							%
----- Adição de N -----							
T1. n/m/n/t/s <sup>(1)</sup>	146,8e <sup>(2)</sup>	182,9 c	178,6 c	74,9 d	141,7 e	725 e	95,6
T2. a/m/f/t/s	128,1 e	198,0 c	184,5 c	82,9 d	164,3 d	758 e	100,0
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	317,2 c	304,0 b	304,8 b	212,2 b	235,6 b	1374 c	181,3
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	407,1 a	444,6 a	497,5 a	243,6 a	280,6 a	1873 a	247,1
T5. e/m/n/t/s	261,7 d	322,4 b	309,8 b	168,3 c	198,6 c	1261 d	166,4
T6. e/m/c/t/s	371,5 b	413,4 a	489,1 a	191,5 bc	262,2 a	1728 b	228,0
----- Absorção de N -----							
T1. n/m/n/t/s	687,4bc	583,2 b	444,6 c	317,6 d	418,7 c	2452 c	121,3
T2. a/m/f/t/s	376,1 d	478,3 c	432,9 c	317,6 d	415,6 c	2021 d	100,0
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	755,8 a	666,4ab	629,9 b	631,2 a	565,7 a	3249 a	160,8
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	687,7 bc	718,4 a	796,1 a	538,7 b	554,1 ab	3295 a	163,0
T5. e/m/n/t/s	717,7 ab	691,9 a	644,4 b	481,9 c	513,8 b	3050 b	150,9
T6. e/m/c/t/s	642,3 c	671,8ab	774,8 a	451,7 c	521,6 b	3062 b	151,5
----- Contribuição de N pelo Solo -----							
T1. n/m/n/t/s	540,6 a	400,2 a	266,0 de	242,7 c	277,0 b	1727 b	136,7
T2. a/m/f/t/s	247,9 c	280,3 b	248,4 e	234,7 c	251,3 b	1263 d	100,0
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	438,6 b	362,4 a	325,0 ab	419,0 a	330,1 a	1875 a	148,5
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	280,7 c	273,8 b	298,6 bc	295,1 b	273,5 b	1422 c	112,6
T5. e/m/n/t/s	456,0 b	369,5 a	334,7 a	313,5 b	315,3 a	1789 ab	141,7
T6. e/m/c/t/s	270,7 c	258,4 b	285,8 cd	260,2 c	259,4 b	1335 cd	105,7

<sup>(1)</sup> n – nabo forrageiro; a – aveia; e – ervilhaca; f – feijão; c – crotalária; m – milho; t – trigo; s – soja

<sup>(a)</sup> Adubação com fósforo e potássio na sementeira da ervilhaca

<sup>(2)</sup> Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo Teste de Duncan (P<0,05)

As maiores adições de N foram observadas nas sucessões de culturas que incluem leguminosas. De maneira geral, as sucessões T4 e T6 foram superiores às demais, pois essas sucessões incluem leguminosas tanto no inverno, antecedendo a cultura do milho, como no verão ou entressafra, entre o milho e o trigo. As sucessões T3 e T5 apresentaram valores de adições de N intermediária. Avaliando o efeito das sucessões de culturas nas adições de N, acumuladas no período de 10 anos, nas condições sem adubação com P e K, observa-se uma superioridade de 66,4% e 128,0%, respectivamente nas sucessões e/m/n/t/s (T5) e e/m/c/t/s (T6), quando comparado à sucessão a/m/f/t/s (T2).

As sucessões n/m/n/t/s (T1) e a/m/f/t/s (T2) apresentaram os menores valores de adição de N, estatisticamente semelhantes entre si. Nessas sucessões, a contribuição é devida principalmente à fixação biológica de N pela soja, já que, segundo a literatura, a contribuição da fixação biológica de N no feijão é de somente 30% a 50% do N demandado pela cultura. Aliado a isso, nas condições experimentais, a cultura do feijão não teve desenvolvimento e produtividade de massa e de grão satisfatórios, para resultar em adição de N significativa.

No período de 10 anos, houve efeito significativo da utilização da adubação com P e K (T3 e T4) na adição de N (Tabela 1.6). Esse efeito foi da ordem de 9,0% e 8,4%, respectivamente nas sucessões e/m/n/t/s (T5) e e/m/c/t/s (T6).

Avaliando os resultados de absorção de N acumulados no período de 10 anos (Tabela 1.6), observa-se uma superioridade nas sucessões com adubação com P e K (T3 e T4), em 6,5% e 7,6%, respectivamente às sucessões e/m/n/t/s (T5) e e/m/c/t/s (T6). Isso está associado, provavelmente, a maior produtividade de massa seca observada nessas sucessões.

A sucessão a/m/f/t/s (T2) apresentou os menores valores de absorção de N, estatisticamente inferior às demais sucessões. Isso está associado a essas sucessões por apresentarem as menores adições de N, em virtude da pequena contribuição da fixação biológica de N pelas culturas utilizadas. Na sucessão n/m/n/t/s (T1) embora os valores de absorção de N estejam numa situação intermediária no 1º e 2º ciclos de rotação, observa-se um comportamento de redução na absorção de N. Isso está associado ao fato de que a utilização simultânea do nabo forrageiro como planta de cobertura de inverno, antecessora ao milho, e de verão ou entressafra, entre milho e trigo, e de forma contínua ao longo

do período de 5 ciclos de rotação, reduziu o potencial de produtividade de massa seca da espécie (dados apresentados no Capítulo 2).

No período de 10 anos, a absorção de N nas condições sem adubação com P e K, observa-se uma superioridade de 50,9%, 51,5% e 21,3%, respectivamente nas sucessões e/m/n/t/s (T5), e/m/c/t/s (T6) e n/m/n/t/s (T1), quando comparado à sucessão a/m/f/t/s (T2).

A estimativa da contribuição de N pelo solo, acumulada no período de 10 anos, variou de 126,3 a 187,5 kg ha ano<sup>-1</sup> (Tabela 1.6). Observa-se que as sucessões de culturas que incluem nabo forrageiro entre as culturas de milho e trigo foram superiores. Entretanto, os maiores valores da contribuição de N do solo foram observados nas sucessões que associam ervilhaca antes do milho e nabo forrageiro entre o milho e o trigo (T3 e T5), atribuídos provavelmente a uma alta adição proporcionada pela ervilhaca e à eficiente ciclagem pelo nabo forrageiro.

A adição de P e de K, obtida através da adubação aplicada nas sucessões e<sup>(a)</sup>/m/n/t/s (T3) e e<sup>(a)</sup>/m/n/t/s (T4), por ocasião da semeadura da ervilhaca, com o objetivo de suprir as exportações, acumulada no período de 10 anos, foi de 324 e 324 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O.

A absorção de P e K, acumuladas em cada ciclo de rotação e no período de 10 anos, nas diferentes sucessões de culturas, estão apresentadas na Tabela 1.7. Observa-se que houve interação significativa entre as sucessões de culturas e os ciclos de rotação. Isso evidencia que o efeito das sucessões de culturas na absorção de P e K foi diferente em cada ciclo de rotação.

De maneira geral, o comportamento dos valores de absorção de P (Tabela 1.7), nas diferentes sucessões de culturas foi muito semelhante aos da absorção de N. Avaliando os resultados acumulados no período de 10 anos, observa-se uma superioridade nas sucessões com adubação com P e K (T3 e T4), em 8,6% e 13,5%, respectivamente às sucessões e/m/n/t/s (T5) e e/m/c/t/s (T6). A estimativa de absorção do P variou de 54,9 a 81,5 kg ha ano<sup>-1</sup>. A superioridade nas sucessões T3 e T4 está associada, provavelmente, aos efeitos residuais da utilização da adubação com P e K. De modo semelhante à absorção de N, os menores valores de absorção de P foram observados nas sucessões a/m/f/t/s (T2) e n/m/n/t/s (T1).

No período de 10 anos, a absorção de P nas condições sem adubação com P e K, observa-se um incremento de 30,6%, 30,8% e 4,4%, respectivamente nas sucessões e/m/n/t/s (T5), e/m/c/t/s (T6) e n/m/n/t/s (T1), quando comparado à

sucessão a/m/f/t/s (T2).

**Tabela 1.7 - Absorção de P e K em diferentes sucessões de culturas, acumulada em cada ciclo de rotação e no período de 10 anos.**

Sucessões de Culturas	1º Ciclo 1997-99	2º Ciclo 1999-01	3º Ciclo 2001-03	4º Ciclo 2003-05	5º Ciclo 2005-07	Total no Período 1997-2007		
	----- kg ha <sup>-1</sup> -----							%
	----- Absorção de P-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -----							
T1. n/m/n/t/s <sup>(1)</sup>	156,6b <sup>(2)</sup>	128,6 bc	98,7 d	88,8 d	100,6 d	573 c	104,4	
T2. a/m/f/t/s	103,6 c	121,4 c	110,4 d	97,5 d	116,0 c	549 c	100,0	
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	179,6 a	153,2 ab	141,8 c	167,0 a	137,0 ab	779 a	141,9	
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	171,3 a	168,1 a	184,6 a	148,4 b	142,9 a	815 a	148,5	
T5. e/m/n/t/s	171,3 a	150,9 ab	144,9 c	125,4 c	124,4 bc	717 b	130,6	
T6. e/m/c/t/s	154,1 b	151,7 ab	163,4 b	121,3 c	127,8 bc	718 b	130,8	
	----- Absorção de K-K <sub>2</sub> O -----							
T1. n/m/n/t/s	836,6a	659,1 ab	394,2 c	306,7 d	386,4 d	2583 d	145,2	
T2. a/m/f/t/s	367,9 c	401,1 c	353,5 c	317,6 d	338,7 e	1779 e	100,0	
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	766,3 a	688,5 a	578,6 b	696,7 a	529,7 a	3260 a	183,2	
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	600,2 b	652,1 ab	656,3 a	474,6 b	433,1 c	2816 c	158,3	
T5. e/m/n/t/s	809,7 a	690,2 a	614,7 ab	486,1 b	483,9 b	3084 b	173,4	
T6. e/m/c/t/s	551,0 b	563,6 b	598,1 b	366,1 c	380,0 de	2459 d	138,2	

<sup>(1)</sup> n – nabo forrageiro; a – aveia; e – ervilhaca; f – feijão; c – crotalária; m – milho; t – trigo; s – soja

<sup>(a)</sup> Adubação com fósforo e potássio na sementeira da ervilhaca

<sup>(2)</sup> Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo Teste de Duncan (P<0,05)

No entanto, a absorção de K (Tabela 1.7) acumulada no período de 10 anos, foi superior nas sucessões de culturas que incluem nabo forrageiro entre as culturas de milho e trigo, especialmente quando associados à utilização da ervilhaca antes do milho (T3 e T5). Isso deve-se à alta capacidade do nabo forrageiro em absorver esse nutriente. A absorção de K variou de 177,9 a 326,0 kg ha ano<sup>-1</sup>. Observa-se uma superioridade nas sucessões com adubação com P e K (T3 e T4), em 5,7% e 14,5%, estatisticamente significativo, respectivamente às sucessões e/m/n/t/s (T5) e e/m/c/t/s (T6).

Na sucessão n/m/n/t/s (T1) embora os valores de absorção de K sejam maiores no 1º e 2º ciclos de rotação, observa-se uma diminuição da absorção de N ao longo do estudo. Isso está associado ao fato de que, à utilização simultânea do nabo forrageiro como planta de cobertura de inverno, antecessora ao milho, e de verão ou entressafra, entre milho e trigo, e de forma contínua ao longo do período de

10 anos, reduz o potencial de produtividade da espécie (dados apresentados no Capítulo 2) e, conseqüentemente, a absorção de K.

De modo semelhante à absorção de N e P, os menores valores de absorção de K foram observados nas sucessões a/m/f/t/s (T2). No período de 10 anos, a absorção de K nas condições sem adubação com P e K, observa-se um incremento de 73,4%, 38,2% e 45,2%, respectivamente nas sucessões e/m/n/t/s (T5), e/m/c/t/s (T6) e n/m/n/t/s (T1), quando comparado à sucessão a/m/f/t/s (T2).

A exportação de N, P e K pelas culturas produtoras de grãos, acumulada em cada ciclo de rotação e no período de 10 anos, nas diferentes sucessões de culturas, estão apresentadas na Tabela 1.8.

**Tabela 1.8 - Exportação de N, P e K pelas culturas de milho, feijão, trigo e soja em diferentes sucessões de culturas, acumulada em cada ciclo de rotação e no período de 10 anos.**

Sucessões de Culturas	1º Ciclo 1997-99	2º Ciclo 1999-01	3º Ciclo 2001-03	4º Ciclo 2003-05	5º Ciclo 2005-07	Total no Período 1997-2007	
----- kg ha <sup>-1</sup> -----							%
----- Exportação de N -----							
T1. n/m/n/t/s <sup>(1)</sup>	249,3ab <sup>(2)</sup>	257,5ab	249,4 b	178,5 b	234,1 c	1169 b	109,5
T2. a/m/f/t/s	195,5 c	242,7 b	253,6 ab	136,3 c	239,5 bc	1068 c	100,0
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	264,2 a	266,6 a	264,4 ab	240,6 a	271,6 a	1307 a	122,4
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	257,0 ab	270,0 a	279,4 a	238,0 a	270,0 a	1314 a	123,0
T5. e/m/n/t/s	259,4 ab	268,7 a	272,4 ab	225,2 a	261,1 ab	1287 a	120,5
T6. e/m/c/t/s	236,1 b	272,0 a	268,4 ab	226,5 a	265,8 a	1269 a	118,8
----- Exportação de P-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -----							
T1. n/m/n/t/s	72,9 ab	64,8 a	62,7 c	62,9 b	66,8 c	330 c	114,6
T2. a/m/f/t/s	54,2 c	56,0 b	64,3 c	43,3 c	70,2 bc	288 d	100,0
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	76,7 a	68,8 a	69,2 bc	84,0 a	80,7 ab	379 a	131,6
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	73,1 ab	69,5 a	72,7 ab	82,9 a	82,9 a	381 a	132,3
T5. e/m/n/t/s	75,5 a	70,9 a	76,9 a	78,9 a	78,5 ab	381 a	132,3
T6. e/m/c/t/s	68,7 b	68,6 a	68,8 bc	77,2 a	77,1 ab	360 b	125,0
----- Exportação de K-K <sub>2</sub> O -----							
T1. n/m/n/t/s	82,6 a	85,3 ab	83,2 b	60,3 b	77,6 c	389 b	105,7
T2. a/m/f/t/s	70,4 b	80,7 b	91,5 ab	45,1 c	80,6 bc	368 c	100,0
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	86,5 a	87,7 ab	87,9 ab	81,1 a	90,3 a	434 a	117,9
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	84,7 a	89,3 a	93,4 a	80,1 a	90,0 a	438 a	119,0
T5. e/m/n/t/s	85,1 a	88,6 a	91,0 ab	75,9 a	85,9 abc	427 a	116,0
T6. e/m/c/t/s	78,1 a	89,9 a	89,5 ab	76,4 a	86,7 ab	421 a	114,4

<sup>(1)</sup> n – nabo forrageiro; a – aveia; e – ervilhaca; f – feijão; c – crotalária; m – milho; t – trigo; s – soja

<sup>(a)</sup> Adubação com fósforo e potássio na sementeira da ervilhaca

<sup>(2)</sup> Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo Teste de Duncan (P<0,05)



Observa-se que em, todos os casos, houve interação significativa entre as sucessões de culturas e os ciclos de rotação. Isso mostra que o comportamento da exportação de N, P e K pelas sucessões de culturas foram diferentes nos ciclos de rotação.

A exportação de nutrientes está diretamente associada à concentração desses nos grãos e à produtividade das culturas. Analisando os resultados acumulados no período de 10 anos, o comportamento das exportações de nutrientes nas diferentes sucessões de culturas foi semelhante para N, P e K. Com exceção da exportação de P na sucessão e/m/c/t/s (T6), os maiores valores de exportação de N, P e K, foram observados nas sucessões e/m/n/t/s (T3 e T5) e e/m/c/t/s (T4 e T6), estatisticamente semelhantes entre si. Com base nisso, destaca-se que não houve efeito da adubação com P e K na exportação de nutrientes nessas sucessões de culturas.

Os menores valores de exportação de N, P e K foram observados nas sucessões a/m/f/t/s (T2) e n/m/n/t/s (T1), estatisticamente inferiores e diferentes entre si. No período de 10 anos, nas condições sem adubação com P e K, observa-se uma superioridade na exportação de nutrientes (média de N, P K), em 22,9%, 19,4% e 9,9%, respectivamente nas sucessões e/m/n/t/s (T5), e/m/c/t/s (T6) e n/m/n/t/s (T1), quando comparado à sucessão a/m/f/t/s (T2). Isso é devido à maior produtividade de grãos de milho, trigo e soja e, conseqüentemente, maior exportação de nutrientes acumulada nessas sucessões de culturas.

A ciclagem de N, P e K pelas culturas produtoras de grãos, acumulada em cada ciclo de rotação, e no período de 10 anos, nas diferentes sucessões de culturas, estão apresentadas nas Tabelas 1.9. Observa-se que, em todos os casos, houve interação significativa entre as sucessões de culturas e os ciclos de rotação. Isso mostra que o comportamento da ciclagem de N, P e K pelas sucessões de culturas foram diferentes nos ciclos de rotação.

De maneira geral, o comportamento da ciclagem de N, P e K foi muito semelhante aos resultados de absorção desses nutrientes (Tabela 1.6 e 1.7). Isso se deve ao fato de que sucessões mais eficientes na absorção de nutrientes do solo têm uma grande probabilidade de apresentarem maiores valores de ciclagem de nutrientes.

**Tabela 1.9 - Ciclagem de N, P e K em diferentes sucessões de culturas, acumulada em cada ciclo de rotação e no período de 10 anos.**

Sucessões de Culturas	1º Ciclo 1997-99	2º Ciclo 1999-01	3º Ciclo 2001-03	4º Ciclo 2003-05	5º Ciclo 2005-07	Total no Período 1997-2007		
	----- kg ha <sup>-1</sup> -----							%
----- Ciclagem de N -----								
T1. n/m/n/t/s <sup>(1)</sup>	438,1ab <sup>(2)</sup>	325,6 b	195,2 c	139,1 f	184,6 c	1283 d	134,6	
T2. a/m/f/t/s	180,6 c	235,6 c	179,3 c	181,3 e	176,1 c	953 e	100,0	
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	491,6 a	399,8 ab	365,5 b	390,6 a	294,2 a	1942 ab	203,8	
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	430,8 b	448,4 a	516,7 a	300,7 b	284,1 a	1981 a	207,9	
T5. e/m/n/t/s	458,3 ab	423,2 a	372,0 b	256,7 c	252,8 b	1763 c	185,0	
T6. e/m/c/t/s	406,2 b	399,8 ab	506,5 a	225,2 d	255,8 b	1793 bc	188,1	
----- Ciclagem de P-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -----								
T1. n/m/n/t/s	83,7 b	63,7 b	36,0 d	25,8 e	33,9 d	243 c	93,1	
T2. a/m/f/t/s	49,4 c	65,4 b	46,1 d	54,3 c	45,8 c	261 c	100,0	
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	103,0 a	84,3 ab	72,6 c	83,0 a	56,3 ab	399 a	152,9	
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	98,1 a	98,6 a	111,9 a	65,5 b	60,1 a	434 a	166,3	
T5. e/m/n/t/s	95,8 ab	80,0 ab	68,1 c	46,5 d	45,9 c	336 b	128,7	
T6. e/m/c/t/s	85,5 b	83,1 ab	94,6 b	44,0 d	50,7 bc	358 b	137,2	
----- Ciclagem de K-K <sub>2</sub> O -----								
T1. n/m/n/t/s	754,0 a	573,8 ab	311,0 c	246,4 c	308,8 cd	2194 d	155,6	
T2. a/m/f/t/s	297,5 c	320,3 c	262,0 d	272,5 c	258,1 e	1410 f	100,0	
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	679,7 a	600,7 a	490,6 b	615,6 a	439,4 a	2826 a	200,4	
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	515,5 b	562,8 ab	562,8 a	394,4 b	343,1 c	2379 c	168,7	
T5. e/m/n/t/s	724,6 a	601,6 a	523,7 ab	410,1 b	397,9 b	2658 b	188,5	
T6. e/m/c/t/s	472,8 b	473,7 b	508,6 b	289,7 c	293,3 de	2038 e	144,5	

<sup>(1)</sup> n – nabo forrageiro; a – aveia; e – ervilhaca; f – feijão; c – crotalária; m – milho; t – trigo; s – soja

<sup>(a)</sup> Adubação com fósforo e potássio na sementeira da ervilhaca

<sup>(2)</sup> Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo Teste de Duncan (P<0,05)

As sucessões e/m/n/t/s e e/m/c/t/s foram semelhantes estatisticamente entre si na ciclagem de N, P e diferentes na ciclagem de K, quando comparadas dentro da situação com adubação (T3 e T4) ou sem adubação (T5 e T6) de P e K. É importante ressaltar que as sucessões e/m/n/t/s, apesar de apresentarem uma adição de N inferior estatisticamente à sucessão e/m/c/t/s (Tabela 1.6), mostraram-se equivalentes na ciclagem do nutriente.

Avaliando os resultados de ciclagem de N e P, acumuladas no período de 10 anos, verifica-se uma superioridade nas sucessões com adubação com P e K (T3 e T4). Esse incremento foi de 10,2% e 10,5% para ciclagem de N, de 18,8% e 21,2% para ciclagem de P, respectivamente, nas sucessões e/m/n/t/s e e/m/c/t/s.

A maior eficiência da sucessão e/m/n/t/s é demonstrada também pelos altos valores na ciclagem de K, mostrando-se superior estatisticamente à sucessão e/m/c/t/s. Nesse caso, a superioridade na ciclagem de K das sucessões com adubação com P e K (T3 e T4), foi de apenas 6,3% na sucessão e/m/n/t/s e de 16,7% na sucessão e/m/c/t/s, quando comparadas, a situação em que não se utilizou adubação com P e K (T5 e T6).

Com base no descrito anteriormente, destaca-se, em primeiro lugar, o efeito de superioridade pela utilização da adubação e, em segundo lugar, o potencial do nabo forrageiro na ciclagem de nutrientes. Nas sucessões que utilizam a ervilhaca no inverno e nabo forrageiro entre milho e trigo, acredita-se haver um sinergismo de espécies o que provavelmente pode estar aumentando a ciclagem dos nutrientes no solo.

A sucessão a/m/f/t/s (T2) apresentou os menores valores de ciclagem de N e K, estatisticamente inferior às demais sucessões de culturas, e semelhante à sucessão n/m/n/t/s na ciclagem de P. Na sucessão n/m/n/t/s (T1), embora os valores de ciclagem de nutrientes estejam numa situação intermediária no 1º e 2º ciclos de rotação, observa-se um comportamento de redução na ciclagem. Isso está associado ao fato de que, à utilização simultânea do nabo forrageiro como planta de cobertura de inverno, antecessora ao milho, e de verão ou entressafra, entre milho e trigo, e de forma contínua ao longo do período de 5 ciclos de rotação, reduz o potencial de produção de massa seca da espécie.

No período de 10 anos, considerando as condições sem adubação com P e K, as sucessões e/m/n/t/s (T5), e/m/c/t/s (T6) e n/m/n/t/s (T1) apresentaram uma ciclagem de +85,0%, +88,1% e +34,6%, para o N, de +28,7%, +37,2% e -6,9%, para o P, de +88,5%, +44,5% e +55,6%, para o K, quando comparadas à sucessão a/m/f/t/s (T2). Considerando-se os valores médios da ciclagem de nutrientes, pode-se estimar que, nas condições do estudo, as sucessões e/m/n/t/s (T5), e/m/c/t/s (T6) e n/m/n/t/s (T1) proporcionaram uma ciclagem de N, P e K, equivalente a 358 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de uréia (45% de N), 174 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de superfosfato simples (18% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>) e 383 kg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> de cloreto de K (60% de K<sub>2</sub>O).

## 1.4 Conclusões

- As maiores adições de N, absorção, ciclagem e exportação de N, P, K são observadas nas sucessões de culturas que incluem leguminosas tanto no inverno (ervilhaca), antecedendo a cultura do milho, como no verão ou entressafra (crotalária) entre o milho e o trigo.

- As sucessões de culturas e/m/n/t/s, apesar de apresentarem valores de adição de N relativamente menores quando comparadas à sucessão e/m/c/t/s, foram eficientes na absorção, na ciclagem e na exportação de N, P, K.

- As sucessões n/m/n/t/s e a/m/f/t/s mostraram-se inferiores na adição de N, absorção, ciclagem e exportação de N, P, K .

## **2 - PRODUTIVIDADE DE MASSA SECA E DE GRÃOS AFETADAS POR SUCESSÕES DE CULTURAS NO SISTEMA PLANTIO DIRETO**

### **2.1 Introdução**

A dinâmica dos nutrientes no solo é resultado da interação de vários fatores, e no SPD esses fatores são alterados em velocidade e/ou intensidade, principalmente pelo menor revolvimento do solo e pela manutenção dos resíduos culturais na superfície do solo (Fiorin, 2007).

Na fase de implantação do SPD, as melhorias nas condições físicas, químicas e biológicas do solo geralmente não se expressam na produtividade das culturas, especialmente naquelas exigentes em N, pois a redução do revolvimento resulta numa menor taxa de mineralização do N orgânico do solo (Bayer, 1996) e dos resíduos vegetais das culturas. O N é, dos nutrientes essenciais às plantas, o que sofre um maior número de transformações biogeoquímicas no sucessão solo-planta (Stevenson, 1994; Camargo & Sá, 2004), sendo todas as transformações no solo mediadas por microrganismos (Victória et al., 1992). Devido ao não revolvimento do solo e à manutenção dos resíduos vegetais na superfície do solo sob SPD, ocorre alteração na dinâmica e na transformação das formas de N no solo (Amado et al., 2002).

A imobilização microbiana do N do solo ocorre quando são adicionados resíduos de plantas cuja relação entre o C orgânico mineralizável e o N supera a relação C/N dos microrganismos. Assim, a relação C/N e a quantidade de C mineralizável são os principais atributos dos resíduos culturais que irão condicionar a intensidade do processo de imobilização de N no solo. A imobilização de N reduz a produção das culturas quando elas são implantadas sobre resíduos culturais pobres em N, principalmente nas não leguminosas, pois elas não têm a capacidade de fixar  $N_2$  da atmosfera, em simbiose com rizóbios, e são menos eficientes do que os microrganismos em absorver esse nutriente (Da Ros, 1993; Basso & Ceretta, 2000; Giacomini, 2001 e Amado et al., 2003). Dessa maneira, dependendo do programa de

sucessão de culturas, pode haver ocorrência de mineralização ou imobilização líquida de N no solo.

No SPD, em que os resíduos permanecem na superfície do solo, é preciso determinar a intensidade do processo de imobilização/mineralização do N no solo, a fim de aumentar a eficiência da adubação nitrogenada. Na recomendação da adubação nitrogenada, é importante caracterizar a influência do tempo de adoção do SPD. Na fase inicial de implantação da sucessão (até 4 a 5 anos), segundo Sá (1996), predominam os processos de imobilização de N no solo. Dessa forma, torna-se necessário o manejo adequado da adubação nitrogenada, pela utilização de maiores doses de N. Após alguns anos de adoção do SPD, ocorre um aumento nos conteúdos de carbono (MO) que conduz ao aumento do reservatório de N potencialmente mineralizável. Nessa fase, é restabelecido um equilíbrio entre a imobilização/liberação e, segundo Sá (1996), após 9 a 12 anos de SPD, observa-se maior liberação de N à sucessão, com menor resposta à adubação nitrogenada mineral.

No entanto, o restabelecimento entre a imobilização/liberação está intimamente ligado às condições nas quais as lavouras sob SPD vêm sendo conduzidas. Esse processo pode ser acelerado em sucessões de culturas que envolvem leguminosas e adicionam altas quantidades de resíduos (Muzilli et al., 1983; Heinzmann, 1985; Derpsch et al., 1985; Bayer & Mielniczuk, 1997ab; Rheinheimer et al., 1998). No entanto, nem todo o N mineralizado a partir do resíduo de leguminosas pode ser considerado como disponível às culturas, visto haver a necessidade de um sincronismo entre a mineralização do resíduo e a demanda de N pelas plantas, o que nem sempre ocorre. Mas, apesar disso, tem-se registros de significativas contribuições de N por leguminosas, como por exemplo o fornecimento de 40 a 90 kg N ha<sup>-1</sup> ao milho em sucessão à ervilhaca (Amado, 1997; Pons et al., 1984). Esse fato resulta numa considerável redução de custos de produção, já que a necessidade de N fertilizante é significativamente menor (Amado, 1997).

Os microrganismos do solo desempenham papel fundamental no ciclo biogeoquímico do P e na sua disponibilidade para as plantas, mediante o fluxo de P pela biomassa microbiana, a solubilização do P inorgânico, a mineralização do P orgânico e a associação entre plantas e fungos micorrízicos (Paul & Clark, 1996). Sucessões agrícolas com menor perturbação do solo conseguem manter maiores teores de P na biomassa microbiana (Brookes et al., 1984; Rheinheimer et al., 2000).

O manejo do solo pode ser, portanto, fator determinante no fluxo de P por intermédio da biomassa microbiana, sendo necessária melhor compreensão sobre sua dinâmica e sua contribuição para a nutrição das plantas. Dessa forma, o conteúdo e o fluxo de P por meio da biomassa microbiana desempenham importante papel como reservatório de P, podendo atingir valores equivalentes ou, às vezes, superiores à absorção desse nutriente pelas plantas (Brookes et al., 1984; Singh et al., 1989).

Com a aplicação de adubos fosfatados e conseqüente adsorção aos colóides, o manejo do solo tem papel importante no prolongamento da sua disponibilidade, pois algumas práticas podem ser adotadas para diminuir a sua adsorção específica, como o não revolvimento do solo, controle da erosão e a manutenção da cobertura vegetal do solo. Também, pelo não revolvimento do solo, os fertilizantes fosfatados aplicados acumulam P nas camadas superficiais e o de camadas profundas é ciclado pelas plantas para a superfície (Selles et al., 1997; Rheinheimer, 2000). Com isso, ocorre primeiramente a saturação dos sítios mais ávidos e o remanescente é redistribuído em frações retidas com menor energia e, por isso, maior capacidade de dessorção, aumentando a sua disponibilidade às plantas (Barrow et al., 1998; Rheinheimer & Anghinoni, 2001). A deposição de resíduos culturais na superfície do solo diminui a sua superfície de contato com o solo e, assim, a decomposição pela biomassa microbiana é desacelerada, resultando na mineralização gradual e parcial desses compostos, aumentando o conteúdo de MO e P orgânico (Rheinheimer, 2000) e de ânions orgânicos, e esses podem aumentar a competição pelos sítios de adsorção, diminuindo a retenção do P (Hue, 1991). Assim, no SPD, há uma redução nas perdas de P por erosão e, devido à localização da adubação fosfatada nas camadas superficiais, do acúmulo de MO e do aumento da biomassa microbiana, ocorre acumulação do P orgânico. Por isso, a manutenção da cobertura do solo também por plantas vivas no SPD impede que o P orgânico mineralizado passe para formas menos lábeis.

No SPD, os resíduos culturais, ao serem mineralizados, liberam nutrientes que podem ser aproveitados pela cultura subsequente (Borkert et al., 2003). O K contido na palha da superfície do solo em sucessões de culturas em SPD pode tornar-se uma fonte expressiva de K para nutrição da cultura subsequente (Foloni & Rosolem, 2004). No entanto, a velocidade de liberação de nutrientes dos resíduos culturais durante o processo de decomposição depende da localização e da forma

em que esses nutrientes se encontram no tecido vegetal. O K, que se encontra em componentes não estruturais e na forma iônica no vacúolo das células das plantas (Marschner, 1995), é rapidamente lixiviado logo após o manejo das plantas de cobertura, com pequena dependência dos processos microbianos. No caso do P, cuja maior parte encontra-se na planta associada a componentes orgânicos do tecido vegetal (Marschner, 1995), sua liberação está intimamente ligada ao processo de decomposição pelos microrganismos do solo.

Nesse sentido, é necessário repensar a seqüência de culturas dentro dos diversos sistemas de produção. O uso de plantas de cobertura do solo, tanto de inverno como de verão e/ou na entressafra, não deveria competir com as culturas econômicas, mas modificar as condições em que as culturas de grãos são cultivadas, e reduzir os custos e/ou aumentar a rentabilidade (Fiorin, 2007). Isso deve ser considerado no planejamento da rotação de culturas e é decisivo para o sucesso de um sistema de produção. Dessa maneira, tão logo é colhida uma cultura comercial ou manejada uma planta de cobertura do solo, deve ser semeada uma outra espécie na seqüência, permitindo uma rápida cobertura e proteção do solo, bem como da máxima expressão do potencial das espécies e de seus benefícios para as culturas produtoras de grãos (Fiorin, 1999). Segundo Ruedell (1998), o segredo está em se estabelecer uma sucessão de culturas, denominado sucessão planta-colhe-planta, que “explore” continuamente o solo, nunca o deixando descoberto.

O objetivo desse trabalho foi identificar sucessão de culturas mais eficientes em garantir a manutenção da produtividade de grãos das culturas a longo prazo no SPD.

## **2.2 Material e Métodos**

### **2.2.1 Descrição da área experimental**

Nesse estudo foi utilizado o mesmo experimento descrito no Capítulo 1, constituído por diferentes combinações de plantas de cobertura de inverno, de verão



e/ou culturas de safrinha intercaladas com as principais culturas produtoras de grãos da região, denominadas de sucessões de culturas.

## 2.2.2 Avaliações

### 2.2.2.1 Produtividade de grãos e de massa seca

A avaliação da produtividade de grãos e de massa seca das sucessões de cultura foi realizada seguindo metodologia descrita no Capítulo 1. A partir desses resultados foram calculados os valores em cada cultivo e o total em 5 cultivos para cada espécie, e o acumulado em cada ciclo de rotação, e no período de 10 anos (1997-2007), para cada sucessão de cultura.

### 2.2.3 Análise estatística

Na análise de variância dos resultados, quando os valores de F (Tratamento) foram significativos ao nível de 5 % de probabilidade, submeteu-se ao Teste de Duncan ( $p < 0,05$ ), usando o pacote estatístico SAS (SAS, 1989).

Na análise estatística dos resultados de produtividade de grãos de massa seca foi avaliada a interação entre as sucessões de culturas e os ciclos de rotação. Os parâmetros estatísticos ( $F_{\text{Tratamento}}$  e coeficiente de variação) são apresentados no APÊNDICE B.

## 2.3 Resultados e Discussão

Analisando os resultados de produtividade de massa seca e de grãos, observa-se que, em todos os casos, houve interação significativa entre as sucessões de culturas e os ciclos de rotação. Isso mostra que as sucessões de culturas interferiram nos resultados de maneira diferenciada para cada ciclo de rotação.

Com relação à produtividade de massa seca das plantas de cobertura de inverno (Tabela 2.1), observa-se que a aveia mostrou-se superior estatisticamente às outras espécies. Considerando que não se utilizou adubação nitrogenada, na média dos cultivos ( $5308 \text{ kg ha}^{-1}$ ) é considerada de alta produtividade por Amado et al. (2002). Essa produção provavelmente foi favorecida pelo fato de a espécie ter sido implantada em sucessão à soja. Segundo Sá (1996), há a tendência de aumento da oferta de N à sucessão devido à decomposição dos resíduos da soja de baixa relação C/N. Os valores de adição de N no solo podem variar de 17 a  $59 \text{ kg ha}^{-1}$  após a colheita dessa leguminosa, devido à fixação biológica de  $\text{N}_2$  (Wiethölter, 1996).

**Tabela 2.1 - Produtividade de massa seca total (raízes+parte aérea) de plantas de cobertura de inverno em diferentes sucessões de culturas, em cada cultivo e o total em 5 cultivos.**

Sucessões de Culturas	1º cultivo 1997	2º cultivo 1999	3º cultivo 2001	4º cultivo 2003	5º cultivo 2005	Total no Período ( 5 cultivos )	
	----- kg ha <sup>-1</sup> -----						%
T1. n/m/n/t/s <sup>(1)</sup>	5475a <sup>(2)</sup>	7006 ab	2351 c	1033 e	1470 c	17335 d	65,3
T2. a/m/f/t/s	4872 b	7493 a	5380 ab	5894 a	2901 a	26540 a	100,0
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	4150 c	5009 bc	4522 b	3974 c	2574 ab	20229 bc	76,2
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	4150 c	5170 bc	5122 ab	5322 b	2368 ab	22132 b	83,4
T5. e/m/n/t/s	3753 d	5526 abc	5966 a	3094 d	2186 abc	20527 bc	77,3
T6. e/m/c/t/s	3753 d	4576 c	4421 b	3260 d	1749 bc	17759 cd	66,9

<sup>(1)</sup> n – nabo forrageiro; a – aveia; e – ervilhaca; f – feijão; c – crotalária; m – milho; t – trigo; s – soja

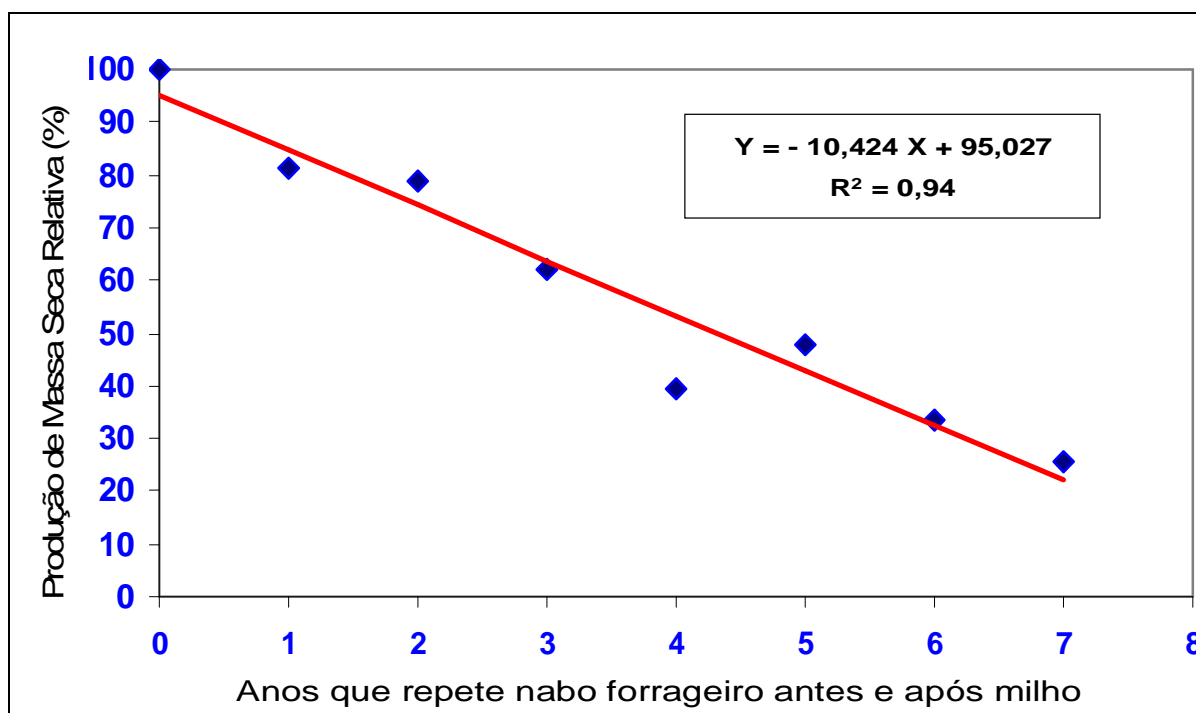
<sup>(a)</sup> Adubação com fósforo e potássio na sementeira da ervilhaca

<sup>(2)</sup> Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo Teste de Duncan (P<0,05)

De maneira geral, as sucessões com ervilhaca no inverno encontram-se numa situação intermediária. Apesar disso, os valores de produtividade de massa seca de ervilhaca são considerados ótimos, mostrando o alto potencial de produtividade de massa, ciclagem e/ou fixação de nutrientes, no período que antecede a cultura do

milho no SPD. Os efeitos da utilização da adubação com P e K (T3 e T4) na produtividade de massa seca de plantas de cobertura de inverno foram mais evidentes no 1º e 4º ciclos de rotação. No entanto, as sucessões e/m/n/t/s (T3 e T5) foram mais eficientes em manter a produtividade total de massa seca de ervilhaca no período de 10 anos, mesmo sem o uso de adubação, quando comparados às sucessões e/m/c/t/s (T4 e T6).

O nabo forrageiro como planta de cobertura de inverno, na sucessão n/m/n/t/s (T1), apresentou uma alta produtividade de massa seca no 1º e 2º cultivos, mas foi muito reduzida, mostrando os menores valores no 3º, 4º e 5º ciclos (Tabela 2.1). Esse comportamento é semelhante ao observado com o nabo forrageiro como planta de cobertura de verão ou entressafra (Tabela 2.3). A utilização simultânea do nabo forrageiro como planta de cobertura de inverno, antecessora ao milho, e de verão ou entressafra, entre milho e trigo, e de forma contínua ao longo do período de 5 ciclos de rotação (10 anos), afetou o seu potencial de produtividade de massa seca. Esse fato pode ser melhor ilustrado na Figura 2.1, quando a sucessão n/m/n/t/s (T1) foi comparada com outras duas sucessões que fazem parte de outro estudo mantido até o 4º cultivo.



**Figura 2.1 - Potencial de produtividade de massa seca de nabo forrageiro pela repetição antes e após o milho, a cada dois anos, comparativamente à sucessão que utiliza nabo uma vez, a cada dois anos, somente antes do milho, ou somente entre milho e trigo.**

O comportamento dos resultados de produtividade de massa seca e de grãos de milho foi muito semelhante entre si (Tabela 2.2). Observa-se que na sucessão a/m/f/t/s (T2) e n/m/n/t/s (T1) foram estatisticamente inferiores às demais sucessões. Isso é, devido a essas sucessões apresentarem as menores adições e ciclagens de N (Tabelas 1.6, 1.9), aliado a não-utilização, nesse estudo, de N mineral. Entretanto, no período de 10 anos, a sucessão n/m/n/t/s (T1) foi estatisticamente superior em 22,8% e 41,1% à sucessão a/m/f/t/s (T2), respectivamente, na produtividade de massa seca e de grãos de milho.

**Tabela 2.2 - Produtividade de massa seca total (raízes+parte aérea) e de grãos de milho em diferentes sucessões de culturas, em cada cultivo e o total em 5 cultivos.**

Sucessões de Culturas	1º cultivo 1997-98	2º cultivo 1999-00	3º cultivo 2001-02	4º cultivo 2003-04	5º cultivo 2005-06	Total no Período ( 5 cultivos )	
----- kg ha <sup>-1</sup> -----							%
----- Produtividade de Massa Seca de Milho -----							
T1. n/m/n/t/s <sup>(1)</sup>	7134 a <sup>(2)</sup>	6187 ab	6651 b	8579 b	6664 c	35214 c	122,8
T2. a/m/f/t/s	5454 b	5552 b	5450 c	6059 c	6164 c	28680 d	100,0
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	7629 a	6294 ab	7533 ab	11276 a	8786 ab	41518 a	144,8
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	7629 a	6869 a	7590 a	10979 a	7228 bc	40293 ab	140,5
T5. e/m/n/t/s	7755 a	6982 a	7876 a	10605 a	9139 a	42357 a	147,7
T6. e/m/c/t/s	7755 a	6429 a	7099 ab	10187 a	6943 c	38412 b	133,9
----- Produtividade de Grãos de Milho -----							
T1. n/m/n/t/s	5528 a	3891 a	4182 c	6648 b	4666 ab	24915 c	141,1
T2. a/m/f/t/s	3430 b	3080 b	3215 d	3582 c	4352 b	17659 d	100,0
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	5070 a	3958 a	4737 bc	8738 a	4973 ab	27477 b	155,6
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	5070 a	4319 a	5317 b	8508 a	6191 a	29406 a	166,5
T5. e/m/n/t/s	5124 a	4391 a	6103 a	8219 a	5701 ab	29538 a	167,3
T6. e/m/c/t/s	5124 a	4043 a	4723 bc	7894 a	5656 ab	27441 b	155,4

<sup>(1)</sup> n – nabo forrageiro; a – aveia; e – ervilhaca; f – feijão; c – crotalária; m – milho; t – trigo; s – soja

<sup>(a)</sup> Adubação com fósforo e potássio na sementeira da ervilhaca

<sup>(2)</sup> Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo Teste de Duncan (P<0,05)

As sucessões com ervilhaca no inverno proporcionaram as maiores produtividades de massa seca e de grãos de milho. Isso está associado à alta adição e ciclagem de nutrientes, em especial ao N, proporcionado pela ervilhaca antes do milho nessas sucessões de culturas. Avaliando o período de 10 anos, não houve efeito na utilização da adubação com P e K (T3 e T4) na produtividade de massa seca de milho. No entanto, a produtividade de grãos de milho foi afetada

positivamente em 11,1% pela adubação com P e K, somente na sucessão e/m/c/t/s (T4 e T6). A sucessão e/m/n/t/s (T3 e T5) foi mais eficiente em manter a produtividade de grãos de milho, no período de 10 anos, mesmo sem o uso de adubação com P e K.

No período de 10 anos, considerando as condições sem adubação com P e K, as sucessões e/m/n/t/s (T5), e/m/c/t/s (T6) e n/m/n/t/s (T1), apresentaram, respectivamente, uma superioridade de 47,7%, 33,9% e 22,8%, na produção de massa seca de milho, e de 67,3%, 55,4% e 41,1%, na produção de grãos de milho, quando comparado à sucessão a/m/f/t/s (T2).

A produtividade de massa seca do feijão mostrou os menores valores, estatisticamente inferiores às demais sucessões de culturas (Tabela 2.3). O feijão cultivado entre o milho e o trigo teve um desenvolvimento satisfatório e produziu grãos somente nos anos agrícolas de 1998 e 2002 (APÊNDICE C). Essa cultura tem baixo potencial em produtividade de massa, grãos e ciclagem de nutrientes.

**Tabela 2.3 - Produtividade de massa seca total (raízes+parte aérea) de plantas de cobertura de verão ou feijão em diferentes sucessões de culturas, acumulado em cada cultivo e o total em 5 cultivos.**

Sucessões de Culturas	1º cultivo	2º cultivo	3º cultivo	4º cultivo	5º cultivo	Total no Período ( 5 cultivos )	%
	1998	2000	2002	2004	2006		
	----- kg ha <sup>-1</sup> -----						
T1. n/m/n/t/s <sup>(1)</sup>	6683 bc <sup>(2)</sup>	3718 b	1822 c	1071 bc	2156 c	15451 c	337,9
T2. a/m/f/t/s	646 d	938 c	879 c	1172 bc	938 d	4573 d	100,0
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	7984 ab	6211 a	4289 b	6180 a	3529 a	28193 a	616,5
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	6496 bc	6958 a	11100 a	366 c	2950 b	27870 a	609,4
T5. e/m/n/t/s	9553 a	5767 a	3319 b	2196 b	2865 b	23700 b	518,3
T6. e/m/c/t/s	6057 c	6494 a	10989 a	256 c	2730 b	26526ab	580,1

<sup>(1)</sup> n – nabo forrageiro; a – aveia; e – ervilhaca; f – feijão; c – crotalária; m – milho; t – trigo; s – soja

<sup>(a)</sup> Adubação com fósforo e potássio na sementeira da ervilhaca

<sup>(2)</sup> Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo Teste de Duncan (P<0,05)

A sucessão n/m/n/t/s (T1) apesar de apresentar uma produtividade de massa seca acumulada no período de 10 anos, superior ao feijão, mostrou uma redução do potencial de produtividade de massa seca ao longo do período do estudo. Isso é, devido à utilização simultânea do nabo forrageiro como planta de cobertura de inverno, antes do milho, e de entressafra, entre milho e trigo, como apresentado e

discutido anteriormente (Figura 2.1). No entanto, o nabo forrageiro cultivado entre o milho e trigo foi favorecido na produtividade de massa seca, quando associado à utilização de ervilhaca no inverno (T3 e T5), e com efeito significativo da utilização da adubação com P e K. Por outro lado, a produtividade de massa seca de crotalária não demonstrou diferença significativa ao efeito da utilização da adubação com P e K. Convém destacar que a crotalária apresentou alta e muito baixa produtividade de massa seca, respectivamente, no 3º e 4º ciclos de rotação (Tabela 2.3).

Considerando as espécies disponíveis para serem cultivadas entre o milho e o trigo, no período de 10 anos, em condições sem adubação com P e K, observa-se que o nabo forrageiro (T5) e a crotalária (T6), ambos associados à ervilhaca antes do milho, apresentaram, respectivamente, uma superioridade de 418,3% e 480,1% na produção de massa seca, quando comparados ao feijão (T2).

O comportamento dos resultados de produtividade de massa seca e de grãos de trigo (Tabela 2.4) foi muito semelhante e, de maneira geral, tiveram um comportamento diretamente relacionado ao potencial de produtividade de massa das plantas de cobertura cultivadas entre milho e trigo. Os menores valores estão associados às sucessões a/m/f/t/s (T2) e n/m/n/t/s (T1) ao longo do estudo. As sucessões e/m/n/t/s (T3 e T5) foram superiores estatisticamente na produtividade de massa seca e de grãos de trigo. Convém ressaltar que, no 3º cultivo, mesmo com uma produtividade de massa seca de crotalária superior em 2,6 e 3,3 vezes ao nabo forrageiro (Tabela 2.3), respectivamente nas sucessões com e sem adubação de P e K, as sucessões que incluem nabo, mantiveram-se superiores na produtividade de massa seca e de grãos de trigo.

Os efeitos da utilização da adubação com P e K (T3 e T4) na produtividade de massa seca e de grãos de trigo, acumulada no período de 10 anos, foram, respectivamente, superiores em 9,5% e 6,8%, e estatisticamente significativos somente na sucessão e/m/n/t/s (T3). Isso pode ser atribuído ao fato de que a utilização do nabo forrageiro, como cultura de cobertura entre o milho e o trigo, deve ter promovido, provavelmente, o aumento do potencial de produção do trigo nessa condição, o que induziu uma resposta significativa à adubação com P e K. O aumento do potencial produtivo do trigo pela utilização de nabo forrageiro tem sido reportado na literatura (Bianchi et al., 1997; Fiorin et al., 1998; Wiethölter, 2003; Rossatto, 2004).

**Tabela 2.4 - Produtividade de massa seca total (raízes+parte aérea) e de grãos de trigo em diferentes sucessões de culturas, em cada cultivo e o total em 5 cultivos.**

Sucessões de Culturas	1º cultivo 1998	2º cultivo 2000	3º cultivo 2002	4º cultivo 2004	5º cultivo 2006	Total no Período ( 5 cultivos )	
----- kg ha <sup>-1</sup> -----							%
----- Produtividade de Massa Seca de Trigo -----							
T1. n/m/n/t/s <sup>(1)</sup>	3720 b <sup>(2)</sup>	3184 bc	2767 ns	2364 bc	3511 b	15545 d	115,6
T2. a/m/f/t/s	2354 c	2653 c	2662	2304 c	3470 bc	13443 e	100,0
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	4424 a	3841 a	2991	4044 a	4015 a	19316 a	143,7
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	4132 a	3474 ab	2808	3708 a	3066 c	17188 bc	127,9
T5. e/m/n/t/s	4220 a	3887 a	3065	2910 bc	3552 b	17634 b	131,2
T6. e/m/c/t/s	3579 b	3508 ab	2829	2964 b	3219 bc	16099 cd	119,8
----- Produtividade de Grãos de Trigo -----							
T1. n/m/n/t/s	2058 c	1761 b	1339 b	1169 c	1943 b	8270 d	121,5
T2. a/m/f/t/s	1089 d	1227 c	1292 b	1275 bc	1920 b	6804 e	100,0
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	2736 a	2190 a	1655 a	1615 a	2419 a	10615 a	156,0
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	2286 b	1922 ab	1421 b	1677 a	1696 b	9002 c	132,3
T5. e/m/n/t/s	2610 a	2151 a	1696 a	1519 ab	1965 b	9940 b	146,1
T6. e/m/c/t/s	1980 c	1941 ab	1506 ab	1458 ab	1715 b	8600 cd	126,4

<sup>(1)</sup> n – nabo forrageiro; a – aveia; e – ervilhaca; f – feijão; c – crotalária; m – milho; t – trigo; s – soja

<sup>(a)</sup> Adubação com fósforo e potássio na sementeira da ervilhaca

<sup>(2)</sup> Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo Teste de Duncan (P<0,05)

ns - não significativo ao nível de 5 % de probabilidade

Não houve efeito significativo das sucessões de culturas na produtividade de massa seca de soja acumulada no período de 10 anos (Tabela 2.5). No entanto, a produtividade de grãos de soja mostrou-se estatisticamente inferior e igual entre si, nas sucessões a/m/f/t/s (T2) e n/m/n/t/s (T1). Esse efeito mostra-se mais pronunciado no 4º cultivo devido à ocorrência de condições climáticas adversas no período de desenvolvimento da soja. Por outro lado, as condições adequadas ao excelente desenvolvimento da cultura da soja no 2º cultivo, amenizou as diferenças entre as sucessões, não demonstrando efeito significativo. A sucessão n/m/n/t/s (T1), que ao longo do estudo apresentou uma redução do potencial de produtividade de massa seca e de grãos de trigo, pela utilização simultânea do nabo forrageiro, afetou também a produtividade de grãos de soja, especialmente no 4º e 5º cultivos.

**Tabela 2.5 - Produtividade de massa seca total (raízes+parte aérea) e de grãos de soja em diferentes sucessões de culturas, em cada cultivo e o total em 5 cultivos.**

Sucessões de Culturas	1º cultivo 1998-99	2º cultivo 2000-01	3º cultivo 2002-03	4º cultivo 2004-05	5º cultivo 2006-07	Total no Período ( 5 cultivos )	
----- kg ha <sup>-1</sup> -----							%
----- Produtividade de Massa Seca de Soja -----							
T1. n/m/n/t/s <sup>(1)</sup>	3255 ns	4056 ns	3960 abc <sup>(2)</sup>	2064 c	3141 c	16476 ns	96,8
T2. a/m/f/t/s	3191	4179	3803 bc	2490 bc	3356 bc	17020	100,0
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	3447	4064	4008 abc	2928 ab	3658 a	18105	106,4
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	3472	4149	4281 a	2634 bc	3453 ab	17989	105,7
T5. e/m/n/t/s	3375	4001	3771 c	3464 a	3268 bc	17879	105,0
T6. e/m/c/t/s	3254	4269	4168 ab	2436 bc	3471 ab	17598	103,4
----- Produtividade de Grãos de Soja -----							
T1. n/m/n/t/s	2545 a	3171 <sup>ns</sup>	3095 abc	1298 b	2455 c	12564 c	103,6
T2. a/m/f/t/s	2056 b	3267	2972 bc	1212 b	2624 bc	12131 c	100,0
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	2695 a	3176	3133 abc	1788 a	2859 a	13652 ab	112,5
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	2714 a	3243	3346 a	1775 a	2699 ab	13777 a	113,6
T5. e/m/n/t/s	2638 a	3127	2948 c	1662 a	2554 bc	12930 bc	106,6
T6. e/m/c/t/s	2425 a	3337	3258 ab	1781 a	2713 ab	13513 ab	111,4

<sup>(1)</sup> n – nabo forrageiro; a – aveia; e – ervilhaca; f – feijão; c – crotalária; m – milho; t – trigo; s – soja

<sup>(a)</sup> Adubação com fósforo e potássio na sementeira da ervilhaca

<sup>(2)</sup> Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo Teste de Duncan (P<0,05)

ns - não significativo ao nível de 5 % de probabilidade

No período de 10 anos, considerando as condições sem adubação com P e K, as sucessões e/m/n/t/s (T5), e/m/c/t/s (T6) e n/m/n/t/s (T1), apresentaram, respectivamente, uma superioridade de 6,6%, 11,4% e 3,6%, na produção de grãos de soja, quando comparadas à sucessão a/m/f/t/s (T2).

Analisando os resultados acumulados no período do estudo, as sucessões e/m/c/t/s (T4 e T6) apresentaram os maiores valores de produtividade de grãos de soja, embora a sucessão e<sup>(a)</sup>/m/n/t/s (T3) não diferisse estatisticamente. O efeito residual da adubação com P e K foi significativo no 5º cultivo, sendo superior em 11,9%, mas somente nas sucessões e<sup>(a)</sup>/m/n/t/s (T3 e T5). No entanto, a sucessão e/m/c/t/s (T6) não diferiu estatisticamente da sucessão e<sup>(a)</sup>/m/c/t/s. Isso está associado, provavelmente, a uma característica da crotalária que, mesmo sem adubação com P e K, pode estar conferindo um efeito residual suficiente para



interferir de maneira positiva nos rendimentos de grãos de soja cultivados num período de aproximadamente 9 a 15 meses depois.

Avaliando a produtividade de massa seca e de grãos acumulada por ciclo e no período de 10 anos (Tabela 2.6), observam-se os menores valores nas sucessões a/m/f/t/s (T2) e n/m/n/t/s (T1), estatisticamente diferentes entre si. No período de 10 anos, considerando as condições sem adubação com P e K, as sucessões e/m/n/t/s (T5), e/m/c/t/s (T6) e n/m/n/t/s (T1), apresentaram, respectivamente, uma superioridade de 35,3%, 29,0% e 10,8%, na produção de massa seca, e de 38,4%, 30,9% e 20,8%, na produção de grãos, quando comparadas à sucessão a/m/f/t/s (T2).

**Tabela 2.6 - Produtividade de massa seca total (raízes+parte aérea) e de grãos acumulada em cada ciclo de rotação e no período de 10 anos nos diferentes sucessões de culturas.**

Sucessões de Culturas	1º Ciclo 1997-99	2º Ciclo 1999-01	3º Ciclo 2001-03	4º Ciclo 2003-05	5º Ciclo 2005-07	Total no Período 1997-2007	
----- kg ha <sup>-1</sup> -----							%
----- Produtividade de Massa Seca Acumulada -----							
T1. n/m/n/t/s <sup>(1)</sup>	26267bc	24151a <sup>(2)</sup>	17550 c	15111 d	16942 c	100021 d	110,8
T2. a/m/f/t/s	16517 d	20815 b	18173 c	17920 c	16830 c	90256 e	100,0
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	27634 ab	25420 a	23343 b	28402 a	22562 a	127360 a	141,1
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	25878 bc	26621 a	30901 a	23009 b	19064 b	125472 ab	139,0
T5. e/m/n/t/s	28656 a	26164 a	23998 b	22270 b	21010 a	122096 b	135,3
T6. e/m/c/t/s	24398 c	25276 a	29505 a	19103 c	18111bc	116393 c	129,0
----- Produtividade de Grãos Acumulada -----							
T1. n/m/n/t/s	10131 ab	8823 a	8616 cd	9115 b	9064 b	45749 c	120,8
T2. a/m/f/t/s	7113 c	7574 b	8213 d	6070 b	8896 b	37865 d	100,0
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	10501 a	9324 a	9525 bc	12141 a	10252ab	51744 a	136,7
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	10070 ab	9485 a	10085ab	11960 a	10586 a	52186 a	137,8
T5. e/m/n/t/s	10372 ab	9668 a	10747 a	11400 a	10220ab	52408 a	138,4
T6. e/m/c/t/s	9529 b	9321 a	9487 bc	11133 a	10083ab	49553 b	130,9

<sup>(1)</sup> n – nabo forrageiro; a – aveia; e – ervilhaca; f – feijão; c – crotalária; m – milho; t – trigo; s – soja

<sup>(a)</sup> Adubação com fósforo e potássio na sementeira da ervilhaca

<sup>(2)</sup> Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo Teste de Duncan (P<0,05)

Avaliando os resultados de massa seca no período de 10 anos, observa-se uma superioridade nas sucessões com adubação com P e K (T3 e T4), em 4,3% e 7,8%, respectivamente às sucessões e/m/n/t/s (T5) e e/m/c/t/s (T6). No entanto,

observou-se resposta significativa à utilização da adubação com P e K na produtividade de grãos no período de 10 anos, com uma superioridade de 5,3%, somente na sucessão e/m/c/t/s (T4 e T6). É importante ressaltar que, apesar das sucessões e/m/n/t/s (T3 e T5) quando comparadas às sucessões e/m/c/t/s (T4 e T6), apresentaram uma adição de N inferior estatisticamente (Tabela 1.7), uma ciclagem de N e P estatisticamente semelhante (Tabelas 1.10) e uma ciclagem de K superior estatisticamente mostrou-se eficiente em manter a produtividade de grãos quando não foi utilizada adubação, em um período de 10 anos.

Com base nisso, acredita-se que as sucessões que utilizam a ervilhaca no inverno e o nabo forrageiro entre milho e trigo, parece haver um sinergismo entre as espécies. Isso provavelmente, através da ciclagem de nutrientes, parece modificar a dinâmica dos nutrientes do solo, afetando a resposta de adubação com P e K das culturas e mantendo a produtividade das culturas a longo prazo.

## 2.4 Conclusões

- As sucessões e/m/n/t/s, e/m/c/t/s e n/m/n/t/s, nas condições sem adubação com P e K, foram superiores em 38,4%, 30,9% e 20,8%, respectivamente, na produção de grãos, quando comparadas à sucessão a/m/f/t/s.
- A sucessão e/m/n/t/s, apesar de menor aporte de N do que a sucessão e/m/c/t/s, foi eficiente em ciclar nutrientes e manter o rendimento de grãos mesmo sem adubação com P e K, por 10 anos.
- As sucessões n/m/n/t/s e a/m/f/t/s apresentaram as menores produções de massa seca e de grãos, em relação às demais sucessões.
- O aumento da frequência de uso de nabo forrageiro na sucessão de culturas prejudicou o potencial de produtividade de massa seca, ciclagem de nutrientes e a produtividade de grãos de milho, trigo e soja.

### **3 - RELAÇÃO ENTRE ADIÇÃO, ABSORÇÃO, CICLAGEM, EXPORTAÇÃO DE NUTRIENTES E A PRODUTIVIDADE EM SUCESSÕES DE CULTURAS NO SISTEMA PLANTIO DIRETO**

#### **3.1 Introdução**

Os nutrientes se encontram em diversos compartimentos (solos, plantas, microrganismos, água, ar). Essas transferências de compartimentos representam a forma mais simples de ciclagem de nutrientes. Na ciclagem de nutrientes, muitos ciclos são policíclicos, o que significa que um elemento pode se reciclar mediante vários processos, dentro de um compartimento (solo) antes de ser transferido ao compartimento planta (Spain & Salinas, 1985).

O solo é um sistema aberto e concentra resíduos orgânicos e os produtos das transformações desses. Os resíduos culturais, adicionados ao solo, são decompostos por microrganismos. Na decomposição dos resíduos culturais, os nutrientes presentes nos compostos orgânicos são absorvidos pelas células microbianas e posteriormente são liberados na forma mineral, no processo de mineralização. A quantidade de nutrientes que é mineralizada depende do balanço líquido entre a mineralização e a imobilização e está relacionada ao tipo de resíduo cultural (Moreira & Siqueira, 2002).

O balanço líquido entre mineralização e imobilização é controlado pela quantidade de C orgânico mineralizável e a relação deste com a quantidade dos demais nutrientes presentes nos resíduos culturais ou no solo. O N é o principal nutriente, cujos teores no solo dependem do balanço entre mineralização e imobilização. A adição de resíduos culturais, ricos em N, possibilita aumentar a quantidade de N mineral no solo. A baixa concentração desse nutriente nos resíduos culturais, em relação ao C orgânico mineralizável, causa a imobilização do N no solo (Giacomini, 2001; Da Ros et al., 2003).

No caso do N, que é um elemento muito móvel no sistema, em que podem ocorrer perdas, estima-se que 60% a 70% do encontrado na biomassa vegetal heterotrófica é reciclado e novamente absorvido pelas plantas do cultivo seguinte

(Spain & Salinas, 1985). A quantidade de N que retorna ao solo na forma de resíduos de plantas constitui considerável porção do N total absorvido pelas plantas (Whitney & Kanehiro, 1967), comparada à pequena parte do que é liberado pelas raízes e do que é lavado das folhas pela chuva.

Segundo Jones & Woodmansee (1979), cerca de 77% do P das folhas e 79% do P das raízes mortas ficam disponíveis para o crescimento das plantas cultivadas logo após o cultivo da espécie de cobertura. Desse total de P na parte aérea da planta, 60% a 80% são solúveis em água, a maior parte na forma orgânica (Bromfield & Jones, 1970). Embora o P seja pouco solúvel, pode retornar ao solo por chuvas de alta intensidade (Bromfield, 1961). Entre 69% a 80% do P total na planta pode ser lavado da vegetação dessecada ou morta (Wilkinson & Lowrey, 1973).

O K é normalmente o mineral mais abundante no tecido vegetal presente predominantemente na forma iônica  $K^+$ , a decomposição dos restos vegetais libera-o na sua totalidade, rapidamente. Tem alta mobilidade na planta em qualquer concentração, seja dentro da célula, seja no tecido vegetal, no xilema ou no floema. O K não é metabolizado na planta e forma ligações com moléculas orgânicas de fácil reversibilidade (Marschner, 1995). Assim, pode-se considerar como 100% o aproveitamento do K proveniente dos restos de culturas, porém podem ocorrer perdas por lixiviação, quando se trata de solos arenosos (Spain & Salinas, 1985). A aveia e a ervilhaca reciclam grande quantidade de K, e a ervilhaca, a mucuna-preta, o tremoço e o guandu aportam grande quantidade de N. Todas as espécies reciclam quantidades significativas de Ca, Mg e micronutrientes, porém baixas quantidades de P.

Ao contrário do N, poucos estudos têm sido realizados de modo a relacionar a taxa de mineralização de P com as características bioquímicas dos resíduos culturais das plantas de cobertura. Quando a relação C/P foi relacionada com as taxas de mineralização de P dos resíduos culturais, os resultados obtidos foram inconsistentes (White & Ayoub, 1983; Buchanan & King, 1993; Schomberg & Steiner, 1999). A concentração em P inorgânico ( $P_i$ ) pode ser um bom indicador da velocidade de liberação de P nos estágios iniciais de decomposição dos resíduos culturais, pois o  $P_i$  é solúvel em água e pode representar de 15% do P total das plantas deficientes em P até 70% em plantas com teor próximo ao limite de toxidez (Marschner, 1995; Malavolta et al., 1997).

Giacomini et al. (2003), avaliando a liberação de P e de K de resíduos culturais, observaram que a taxa de liberação do K foi 4,5 vezes maior do que a do P. A quantidade de P remanescente na fase inicial da decomposição foi inversamente proporcional à concentração do P solúvel em água dos resíduos culturais. Nos resíduos culturais do consórcio aveia + ervilhaca, o P e o K foram liberados mais lentamente do que o observado nessas espécies em cultivo solteiro, indicando um maior potencial de sincronismo entre a demanda de P e K pelas culturas comerciais e a liberação desses nutrientes dos resíduos culturais provenientes de consórcios.

Dessa forma, os restos vegetais deixados na superfície do solo em sistemas de produção no SPD podem constituir uma reserva considerável de nutrientes (Fiorin, 1999). O K contido na palha da superfície do solo cultivado no SPD pode tornar-se uma fonte expressiva de K para nutrição da cultura subsequente (Foloni & Rosolem, 1997). Por ação da água das chuvas, o K, independentemente da mineralização da MO, pode constituir fator importante na liberação de nutrientes de restos vegetais.

Na realidade, o restabelecimento entre a imobilização/liberação está intimamente ligado às condições nas quais as lavouras sob SPD vêm sendo conduzidas. Esse processo é válido para sucessões de culturas que adicionam altas quantidades de resíduos e pode ser acelerado em sucessões envolvendo leguminosas (Muzilli et al., 1983; Heinzmann, 1985; Derpsch et al., 1985; Bayer & Mielniczuk, 1997b; Rheinheimer et al., 1998). Além das leguminosas, existem plantas de outras famílias com elevada capacidade de ciclagem de nutrientes, como é o caso do nabo forrageiro (Fiorin, 1999; Rossato, 2004; Nicoloso et al., 2008).

Portanto, as sucessões de culturas podem contribuir para a manutenção do equilíbrio dos nutrientes no solo e para o melhor aproveitamento da sua fertilidade. É bem possível que os benefícios desse sistema, tanto para o solo como para o desenvolvimento das plantas, não sejam contemplados pela avaliação química tradicional da fertilidade, sendo percebidos como “ruídos” e não como benefícios. Um indicador de fertilidade é sensível para expressar as alterações promovidas pela mudança do sistema de cultivo e/ou da rotação de culturas na fertilidade do solo, percebida pelas plantas, quando sua variação é proporcional àquela promovida no rendimento das culturas (Nicolodi, 2007). O acompanhamento da evolução dos indicadores de fertilidade no solo e do rendimento das culturas não parece ser um

recurso eficiente para melhorar a interpretação dos resultados das análises químicas e, conseqüentemente, a avaliação da fertilidade. Isso sugere que no SPD existem outros indicadores que se relacionam melhor com o rendimento do que os tradicionalmente usados para avaliar a fertilidade do solo no SPD (Nicolodi, 2007).

O objetivo desse trabalho foi o de caracterizar a relação entre a adição, a absorção, a ciclagem e a exportação de N, P, K e a produtividade em sucessões de culturas a longo prazo no SPD.

## **3.2 Material e Métodos**

### 3.2.1 Descrição da área experimental

Nesse estudo foi utilizado o mesmo experimento descrito no Capítulo 1, constituído por diferentes combinações de plantas de cobertura de inverno, de verão e/ou culturas de safrinha intercaladas com as principais culturas produtoras de grãos da região, denominadas de sucessões de culturas.

### 3.2.2 Avaliações

#### 3.2.2.1 Cálculo de nutrientes adicionados, absorvidos, exportados e ciclados

Nesse estudo foram utilizados os resultados obtidos no Capítulo 1.

#### 3.2.2.2 Cálculo do balanço de nutrientes nas sucessões de culturas

O balanço de N, P, K médio por ciclo de rotação e acumulado no período de 10 anos foi determinado com base nas estimativas de adição, ciclagem e exportação de N, P, K nas diferentes sucessões de culturas, conforme a equação a seguir.

**Balanço (NPK) = Adição de NPK – Exportação de NPK**

**Balanço Aparente (NPK) = Ciclagem NPK – Exportação de NPK**

A partir desses resultados foram calculados os valores acumulados em cada ciclo de rotação, e no período de 10 anos (1997-2007) para cada sucessão de culturas.

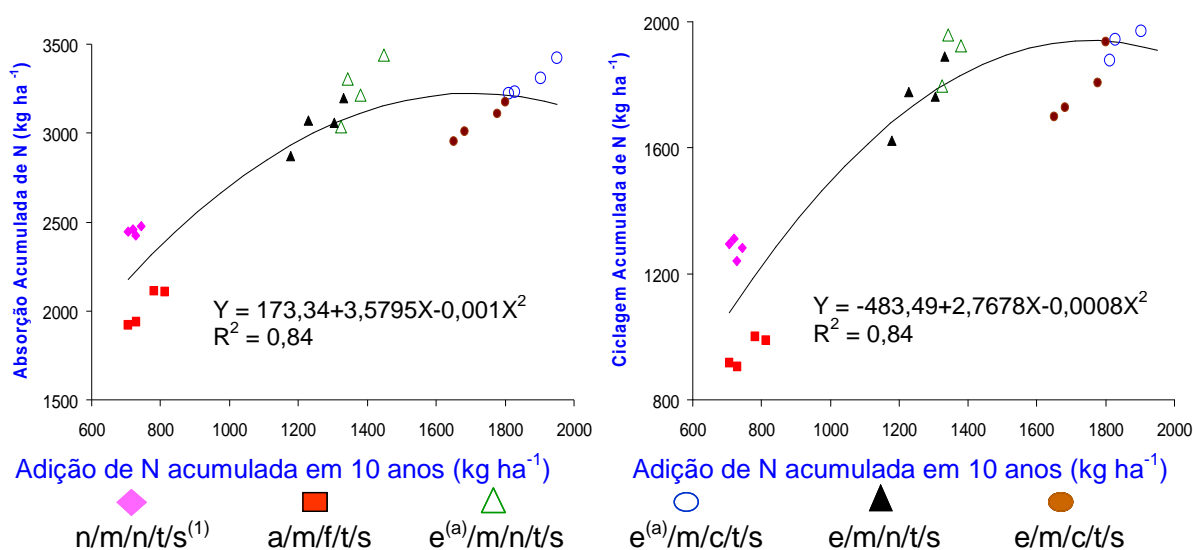
### 3.2.3 Análise estatística

Na análise de variância dos resultados, quando os valores de F (Tratamento) foram significativos ao nível de 5 % de probabilidade, submeteu-se ao Teste de Duncan ( $p < 0,05$ ), usando o pacote estatístico SAS (SAS, 1989).

### 3.3 Resultados e Discussão

O estudo das relações entre adição, absorção, ciclagem e exportação de nutrientes pode ser uma ferramenta útil para melhorar o entendimento da inferência das diferentes sucessões de culturas na dinâmica dos nutrientes e na sustentabilidade do SPD.

Avaliando o comportamento da adição de N, observa-se uma alta relação com a absorção ( $R^2 = 0,84$ ) e com a ciclagem ( $R^2 = 0,84$ ) de N acumulada no período de 10 anos (Figura 3.1). No entanto, as sucessões ervilhaca/nabo (T3 e T5), que possuem uma adição intermediária, apresentaram uma absorção e ciclagem equivalente às sucessões ervilhaca/juncaea (T4 e T6).



**Figura 3.1 - Relação entre adição e absorção, entre adição e ciclagem de N, acumuladas em diferentes sucessões de culturas, no período de 10 anos.**

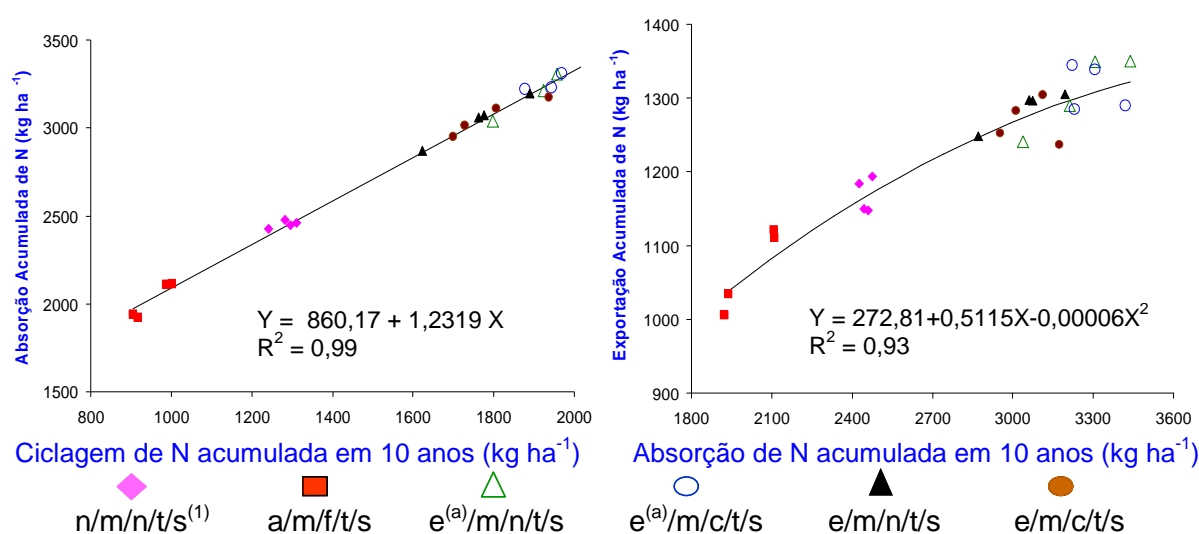
<sup>(1)</sup> n – nabo forrageiro; a – aveia; e – ervilhaca; f – feijão; c – crotalária; m – milho; t – trigo; s – soja

<sup>(a)</sup> Adubação com fósforo e potássio na semeadura da ervilhaca

A ciclagem de N proporcionada pelas sucessões de culturas apresentou uma relação linear e muito alta com a absorção de N ( $R^2 = 0,99$ ) acumulada no período de estudo (Figura 3.2). De modo semelhante, a absorção de N teve uma alta relação ( $R^2 = 0,93$ ) com a exportação de N, causada pela produção de grãos obtida nas



diferentes sucessões de culturas. Observa-se uma relação direta entre a adição de N e a produtividade de massa seca e de grãos acumuladas no período de 10 anos (Figura 3.3). Comparativamente a isso, a ciclagem de N acumulada no período de 10 anos, teve uma alta relação ( $R^2 = 0,94$  e  $0,94$ ) com a produtividade de massa seca e de grãos (Figura 3.3). Dessa forma, a ciclagem de N promovida pelas sucessões de culturas parece ter modificado a dinâmica desse nutriente no sistema solo-planta, interferido de maneira decisiva na produtividade das culturas.

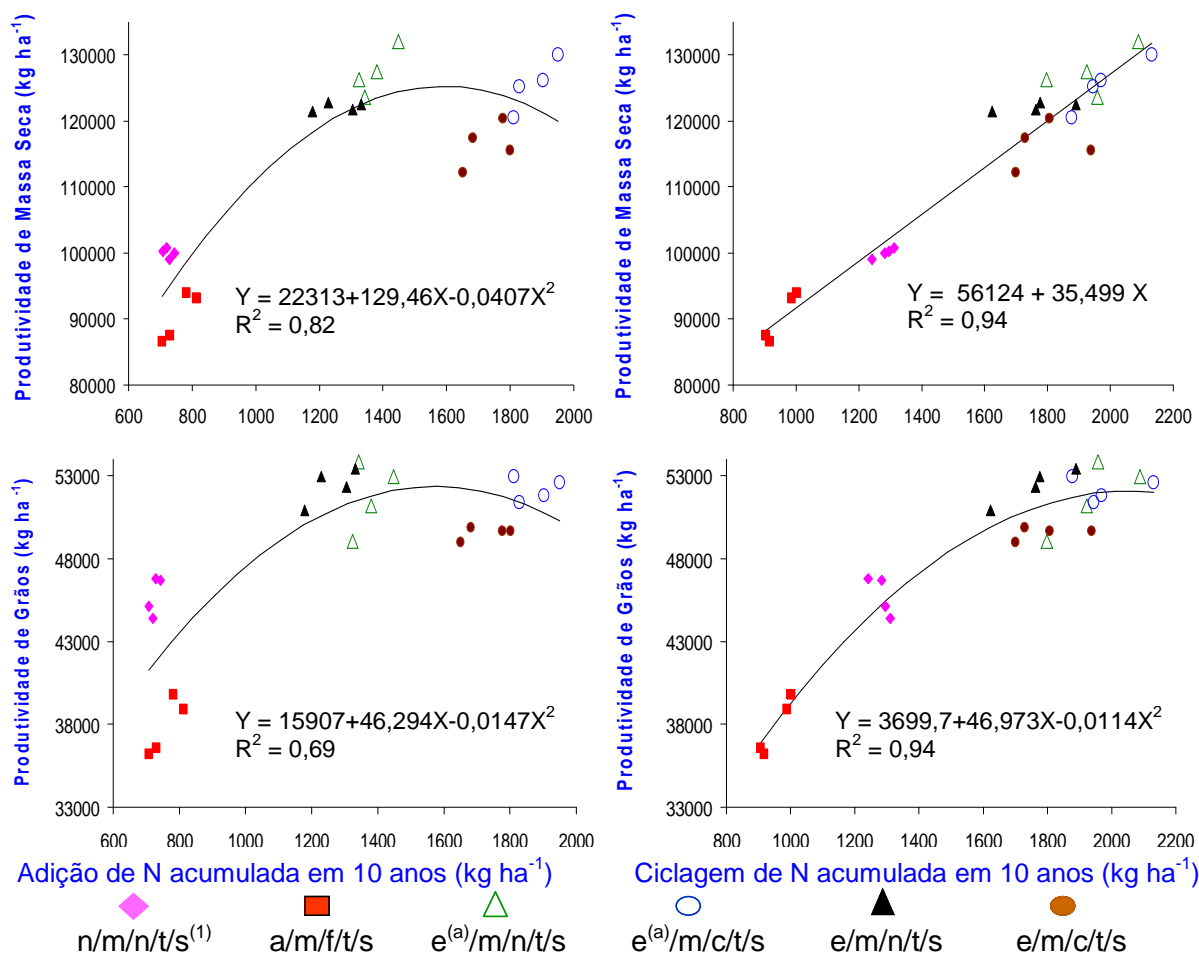


**Figura 3.2 - Relação entre ciclagem e absorção, entre absorção e exportação de N, acumuladas em diferentes sucessões de culturas, no período de 10 anos.**

<sup>(1)</sup> n – nabo forrageiro; a – aveia; e – ervilhaca; f – feijão; c – crotalária; m – milho; t – trigo; s – soja

<sup>(a)</sup> Adubação com fósforo e potássio na sementeira da ervilhaca

Para avaliar a sustentabilidade do SPD a longo prazo é oportuno investigar a origem (fonte), o destino (dreno) do N e o seu balanço nas sucessões de culturas. A diferença entre a adição e a exportação (balanço), entre a ciclagem e a exportação (balanço aparente) de N, nas diferentes sucessões de culturas, são apresentados na Tabelas 3.1.



**Figura 3.3 - Relação entre a adição e a ciclagem de N com a produtividade acumulada de massa seca e de grãos em diferentes sucessões de culturas, no período de 10 anos.**

<sup>(1)</sup> n – nabo forrageiro; a – aveia; e – ervilhaca; f – feijão; c – crotalária; m – milho; t – trigo; s – soja

<sup>(a)</sup> Adubação com fósforo e potássio na sementeira da ervilhaca

Observa-se que o balanço (adição-exportação) de N apresentou uma grande amplitude de variação entre as sucessões de culturas. No período de 10 anos, essa variação foi de  $-444$  a  $+559 \text{ kg ha}^{-1}$  de N. Os valores do balanço de N foram maiores estatisticamente nas sucessões e/m/c/t/s (T4 e T6). Esse resultado foi atribuído aos maiores valores de adições de N (Tabela 1.6), pois essas sucessões incluem leguminosas tanto no inverno, antecedendo a cultura do milho, como no verão ou entressafra, entre o milho e o trigo. Os valores de balanço de N nas sucessões de culturas e/m/n/t/s (T3 e T5) encontram-se numa situação intermediária e comparativamente às outras sucessões, mais próximos a zero, mostrando que a adição e a exportação de N foram semelhantes, ao longo de 10 anos.

**Tabela 3.1 - Balanço (adição-exportação) e balanço aparente (ciclagem-exportação) de N em diferentes sucessões de culturas, acumulado em cada ciclo de rotação e no período de 10 anos.**

Sucessões de Culturas	1º Ciclo 1997-99	2º Ciclo 1999-01	3º Ciclo 2001-03	4º Ciclo 2003-05	5º Ciclo 2005-07	Total Período
----- kg ha <sup>-1</sup> -----						
----- Balanço de N -----						
T1. n/m/n/t/s <sup>(1)</sup>	-103 e <sup>(2)</sup>	-75 c	-71 c	-104 e	-92 c	-444 f
T2. a/m/f/t/s	-67 d	-45 c	-69 c	-53 cd	-75 c	-310 e
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	53 b	37 b	40 b	-28 b	-36 b	67 c
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	150 a	175 a	218 a	6 a	11 a	559 a
T5. e/m/n/t/s	2 c	54 b	37 b	-57 d	-63 bc	-26 d
T6. e/m/c/t/s	135 a	141 a	221 a	-35 bc	-4 a	459 b
----- Balanço Aparente de N -----						
T1. n/m/n/t/s	189 a	68 bc	-54 c	-39 d	-49 b	114 c
T2. a/m/f/t/s	-15 b	-7 c	-74 c	45 b	-63 b	-115 d
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	228 a	133 ab	101 b	150 a	23 a	635 a
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	174 a	178 a	237 a	63 b	14 a	666 a
T5. e/m/n/t/s	199 a	155 ab	100 b	32 b	-8 a	476 b
T6. e/m/c/t/s	170 a	128 ab	238 a	-1 c	-10 a	525 ab

<sup>(1)</sup> n – nabo forrageiro; a – aveia; e – ervilhaca; f – feijão; c – crotalária; m – milho; t – trigo; s – soja

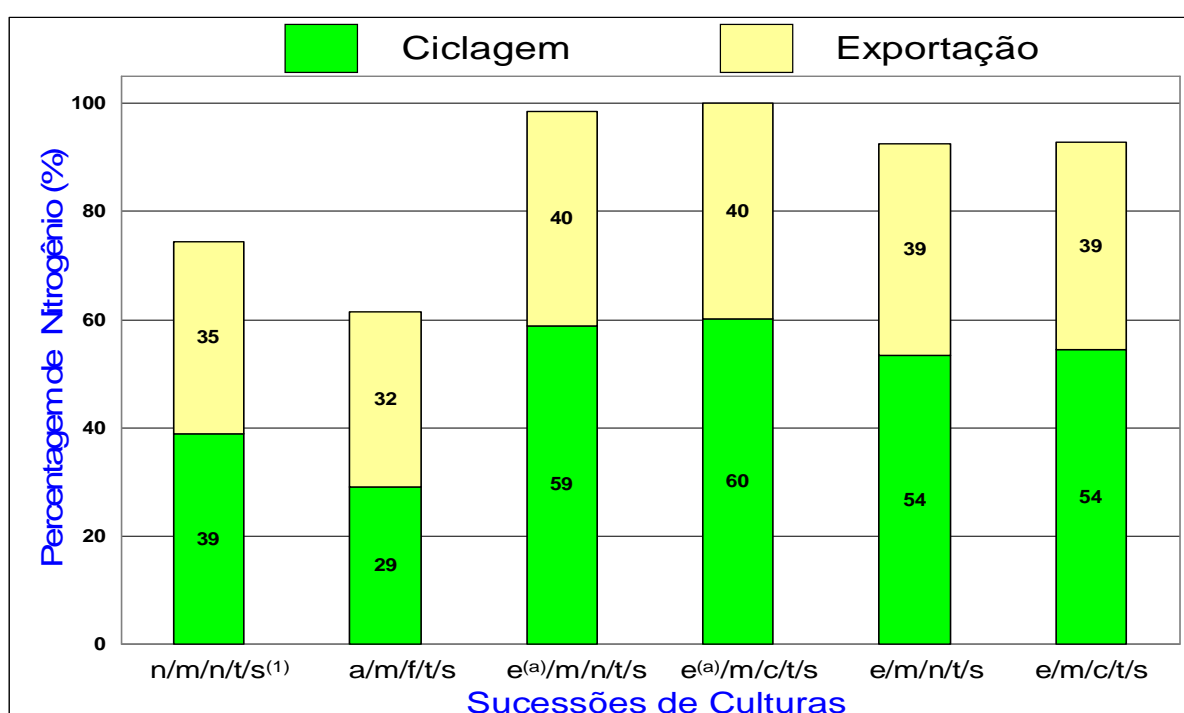
<sup>(a)</sup> Adubação com fósforo e potássio na sementeira da ervilhaca

<sup>(2)</sup> Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo Teste de Duncan (P<0,05)

Considerando que a exportação de N nas sucessões e/m/n/t/s (T3 e T5) e e/m/c/t/s (T4 e T6) foram estatisticamente semelhantes (Tabela 1.8), o comportamento diferenciado no balanço (adição-exportação) é atribuído principalmente às adições. Baseado nisso, as sucessões e/m/n/t/s, apesar de apresentarem valores de balanço (adição-exportação) de N inferiores em 492 e 485 kg ha<sup>-1</sup> (Tabela 3.1), quando comparadas à sucessão e/m/c/t/s, para a condição com e sem adubação, foram eficientes em manter a disponibilidade de N adequada e, conseqüentemente, a produtividade das culturas.

No período de 10 anos, houve efeito significativo da utilização da adubação com P e K (T3 e T4) no balanço de N (adição-exportação), na ordem de 93 e 100 kg ha<sup>-1</sup>, respectivamente nas sucessões e/m/n/t/s e e/m/c/t/s (Tabela 3.1). Isso está associado ao efeito significativo da utilização da adubação com P e K na adição de N (Tabela 1.6) na ordem de 9,0% e 8,4%, respectivamente nas sucessões e/m/n/t/s e e/m/c/t/s. No entanto, o incremento na adição pelo efeito da utilização da adubação com P e K foi de apenas 0,61 e 0,40 kg de N por kg de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub> e K<sub>2</sub>O aplicado, respectivamente.

Analisando os resultados de balanço aparente (ciclagem-exportação) de N, comparando as condições com e sem adubação de P e K, observou-se que, dentro de cada condição, as sucessões e/m/n/t/s (T3 e T5) e e/m/c/t/s (T4 e T6) são estatisticamente semelhantes entre si. No entanto, o uso da adubação com P e K proporciona uma maior ciclagem de N (Tabela 1.9) no período de 10 anos. Isso pode ser melhor ilustrado, analisando a percentagem de ciclagem e exportação de N pelas sucessões de culturas (Figura 3.4). Comparativamente, na condição com e sem adubação, as sucessões e/m/n/t/s e e/m/c/t/s apresentam ciclagem e exportação muito semelhantes. O uso da adubação proporciona aumento de 5 e 6 pontos percentuais na ciclagem (Figura 3.4), respectivamente, nas sucessões e/m/n/t/s e e/m/c/t/s, e, portanto, um efeito significativo no balanço aparente (ciclagem-exportação) de N no período de 10 anos (Tabela 3.1). No entanto, esse efeito na ciclagem não se traduziu em aumento na exportação de N (Tabela 1.8).



**Figura 3.4 - Percentagem de exportação e ciclagem acumulada de N em diferentes sucessões de culturas no período de 10 anos.**

<sup>(1)</sup> n – nabo forrageiro; a – aveia; e – ervilhaca; f – feijão; c – crotalária; m – milho; t – trigo; s – soja

<sup>(a)</sup> Adubação com fósforo e potássio na sementeira da ervilhaca

Os menores valores de balanço, e balanço aparente de N, foram observados nas sucessões n/m/n/t/s e a/m/f/t/s (Tabela 3.1). Considerando que a adição de N

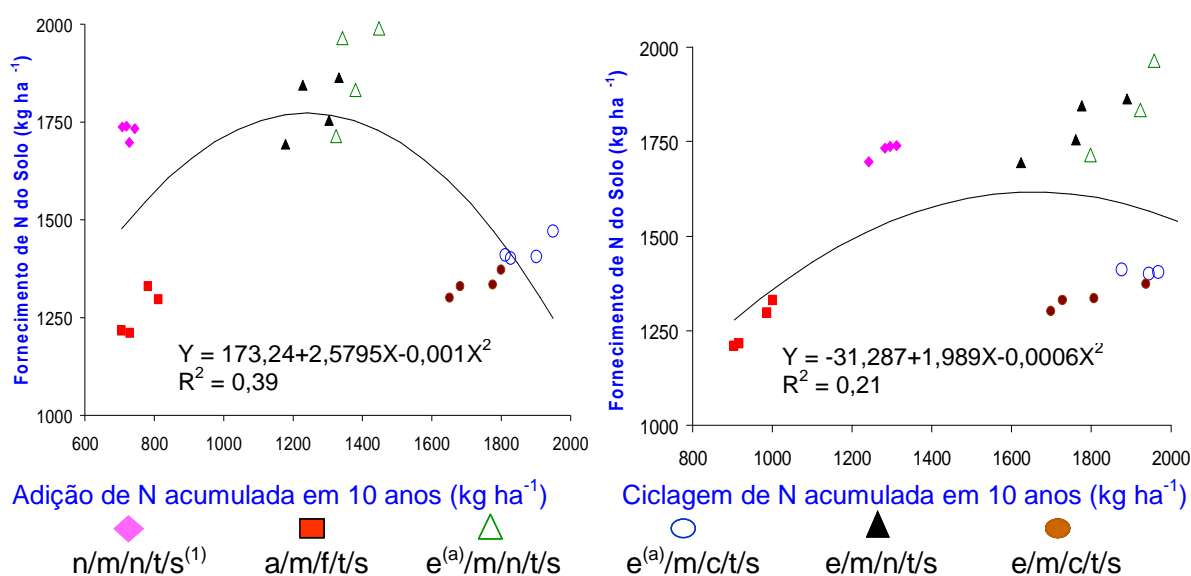
nas sucessões n/m/n/t/s (T1) e a/m/f/t/s (T2) foi estatisticamente semelhante (Tabela 1.6), a influência sobre o balanço e o balanço aparente deveu-se à ciclagem e à exportação de N nessas sucessões. Apesar da sucessão a/m/f/t/s (T2) apresentar uma menor produtividade acumulada de grãos (Tabela 2.6), e, portanto, menor exportação, apresentou o menor valor de balanço aparente (ciclagem-exportação). Isso é devido aos valores de ciclagem de N, proporcionalmente os menores que foram observados entre as sucessões (Tabela 1.9). Comparativamente, a ciclagem de N na sucessão a/m/f/t/s foi de 10 e 28 pontos percentuais menor (Figura 3.4), respectivamente, que a sucessão n/m/n/t/s e que a média das sucessões e/m/n/t/s e e/m/c/t/s.

Quanto mais negativo os valores do balanço é provável que ocorra uma maior dependência do fornecimento de N pelo solo na manutenção da produtividade das culturas. Os maiores valores da contribuição de N do solo (Tabela 1.6) foram observados nas sucessões que associam ervilhaca antes do milho e nabo forrageiro entre o milho e o trigo (T3 e T5). Isso é importante, pois a sustentabilidade dessa sucessão de cultura pode estar comprometida a longo prazo, devido ao esgotamento das reservas de N da MO. No entanto, os valores de balanço de N nas sucessões de culturas e/m/n/t/s (T3 e T5) encontram-se numa situação intermediária em comparação às outras sucessões e mais próximos a zero, mostrando que a adição e a exportação de N foram semelhantes ao longo de 10 anos.

Dessa forma, essa sucessão mostra-se mais eficiente, provavelmente ao sinergismo da utilização da ervilhaca no inverno, que promove uma adição suficiente para equilibrar com a exportação, e da utilização do nabo forrageiro entre milho e trigo, que se mostra altamente eficiente na ciclagem do N adicionado e/ou da MO. Por outro lado, houve uma baixa relação entre a adição e a ciclagem de N com o fornecimento de N do solo nas diferentes sucessões de culturas (Figura 3.5). Isso está associado ao comportamento diferenciado de cada sucessão de cultura, quanto à origem (fonte) e à eficiência na busca do N visando a atender sua demanda, bem como ao sinergismo das espécies na maximização do potencial de produção de grãos (destino).

As sucessões a/m/f/t/s (T2) e n/m/n/t/s (T1) apresentam uma baixa adição de N. No entanto, a sucessão n/m/n/t/s apresenta uma maior ciclagem, proporcionando uma produção e uma dependência do fornecimento do N do solo relativamente maior. Essa sucessão, devido ao balanço negativo, pode, a longo prazo, conduzir

ao esgotamento das reservas de N do solo. As sucessões e/m/c/t/s (T4 e T6), devido a FBN das leguminosas, apresentam uma adição e um balanço estatisticamente superior às sucessões e/m/n/t/s (T3 e T5). Como a exportação de N nas sucessões e/m/n/t/s e e/m/c/t/s foram semelhantes, a adição diferenciada influenciou no comportamento diferenciado das relações da adição e ciclagem com o fornecimento de N pelo solo.

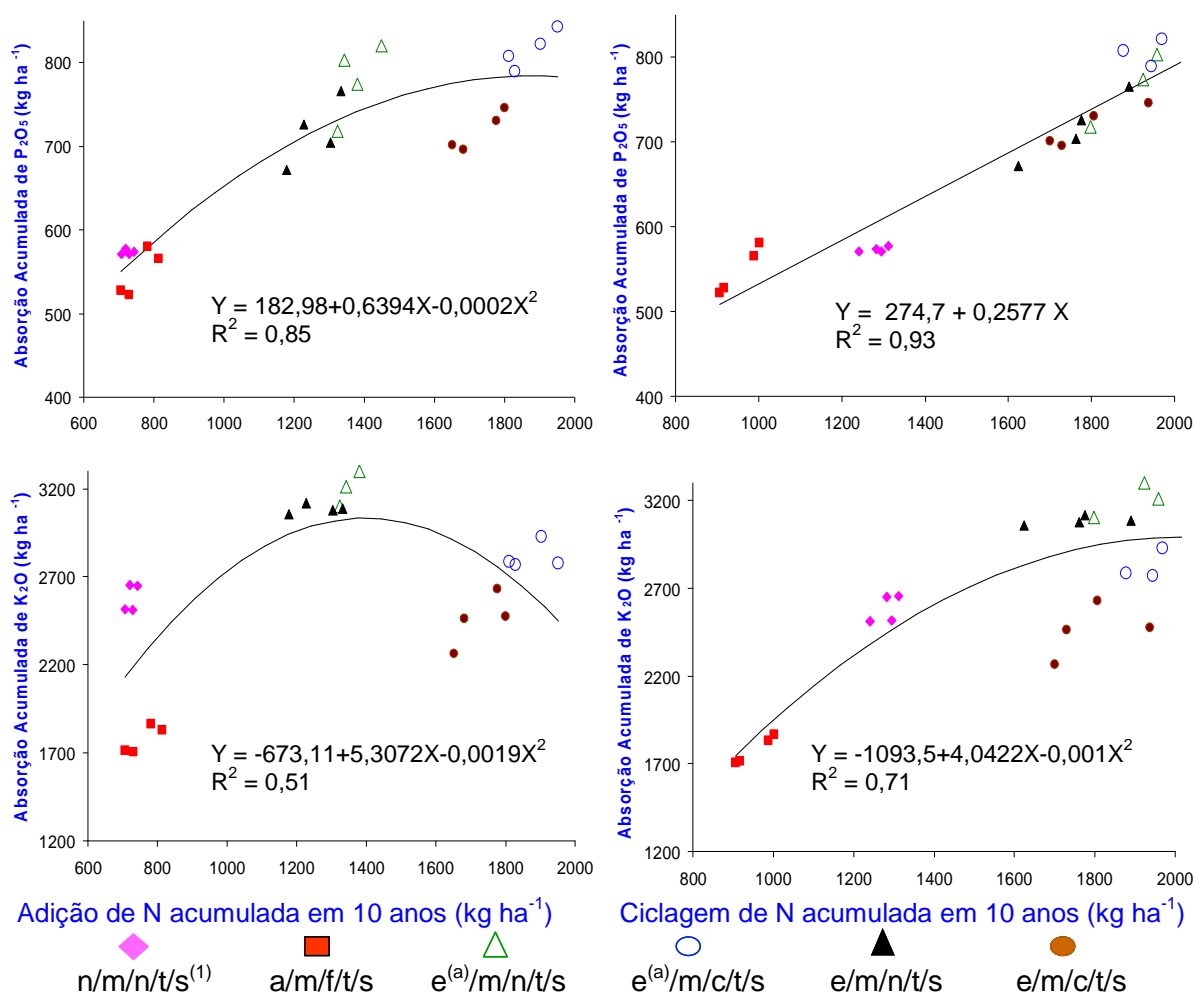


**Figura 3.5 - Relação entre a adição e a ciclagem de N com o fornecimento de N do solo em diferentes sucessões de culturas, no período de 10 anos.**

<sup>(1)</sup> n – nabo forrageiro; a – aveia; e – ervilhaca; f – feijão; c – crotalária; m – milho; t – trigo; s – soja

<sup>(a)</sup> Adubação com fósforo e potássio na sementeira da ervilhaca

A adição e a ciclagem de N nas diferentes sucessões de culturas apresentaram uma relação alta ( $R^2 = 0,85$  e  $0,93$ ) com a absorção de P (Figura 3.6). Tem sido relatado na literatura que o adequado suprimento de N promove uma maior absorção de P pelas culturas. No entanto, observa-se um ajuste relativamente menor ( $R^2 = 0,51$  e  $0,71$ ) na relação entre a adição e a ciclagem de N com a absorção de K. Isso pode ser atribuído ao efeito diferenciado das sucessões de culturas, especialmente as que possuem o nabo forrageiro na ciclagem e, conseqüentemente, na absorção de K do solo.

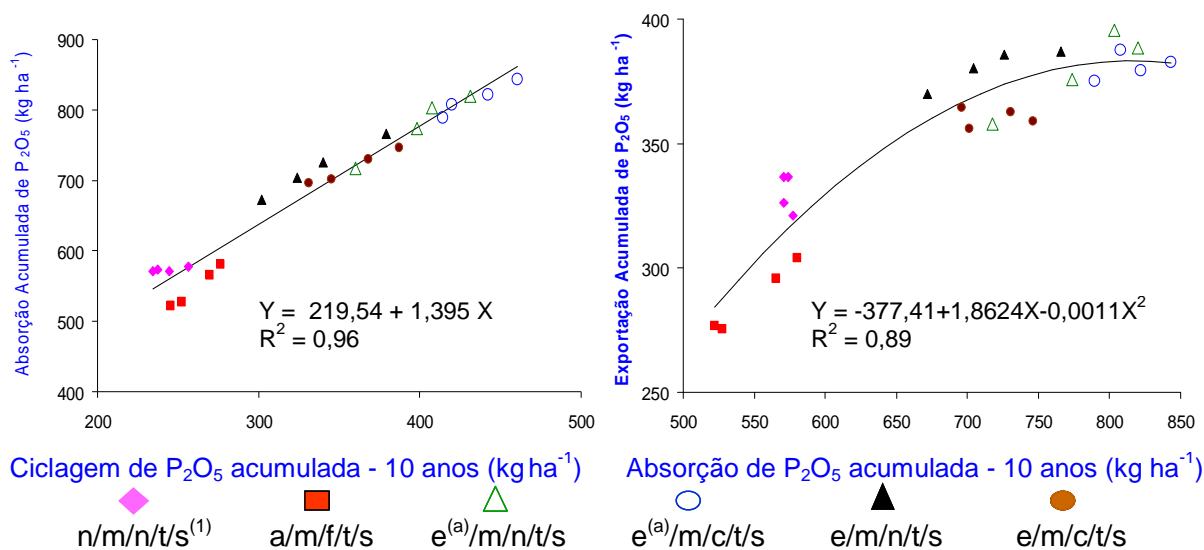


**Figura 3.6 - Relação entre a adição e a ciclagem de N com a absorção acumulada de P e K em diferentes sucessões de culturas, no período de 10 anos.**

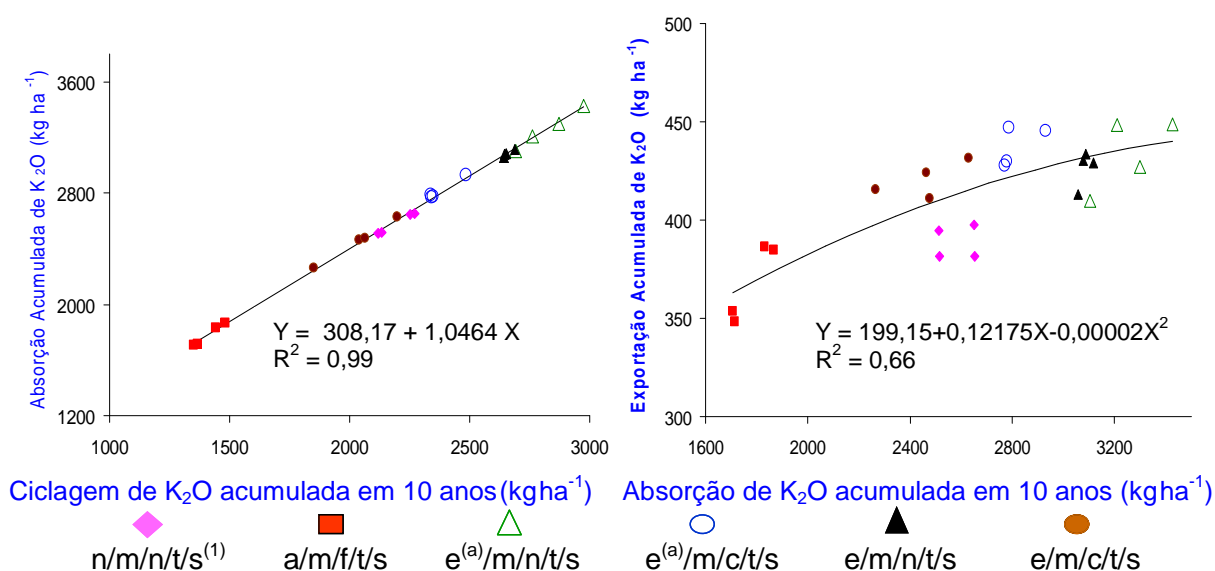
<sup>(1)</sup> n – nabo forrageiro; a – aveia; e – ervilhaca; f – feijão; c – crotalária; m – milho; t – trigo; s – soja  
<sup>(a)</sup> Adubação com fósforo e potássio na sementeira da ervilhaca

A absorção de P é altamente correlacionada ( $R^2 = 0,96$ ) com a ciclagem do nutriente (Figura 3.7). De forma semelhante, quanto maior a ciclagem maior é a exportação acumulada de P nas diferentes sucessões de culturas. No caso do K, existe uma alta relação ( $R^2 = 0,99$ ) entre a absorção e a ciclagem de K (Figura 3.8). No entanto, uma relação relativamente menor ( $R^2 = 0,66$ ) entre a ciclagem e a exportação acumulada de K nas diferentes sucessões de culturas.

Para melhorar o entendimento dessas relações há que considerar o efeito da ciclagem, da absorção e da exportação de nutrientes sobre a produtividade de massa seca e de grãos das culturas, bem como a magnitude que cada fração significa e o seu balanço nas diferentes sucessões de culturas.



**Figura 3.7 - Relação entre a ciclagem e absorção, entre a absorção e exportação acumulada de P em diferentes sucessões de culturas, no período de 10 anos.**



**Figura 3.8 - Relação entre a ciclagem e absorção, entre a absorção e exportação acumulada de K em diferentes sucessões de culturas, no período de 10 anos.**

<sup>(1)</sup> n – nabo forrageiro; a – aveia; e – ervilhaca; f – feijão; c – crotalária; m – milho; t – trigo; s – soja  
<sup>(a)</sup> Adubação com fósforo e potássio na sementeira da ervilhaca

Os valores do balanço (adição-exportação) de P e K (Tabela 3.2), acumulados no período de estudo mostraram-se negativos. Observa-se que o balanço apresentou, no período de 10 anos, uma amplitude de variação entre as sucessões de culturas, de -381 a -168 e de -427 a -109  $kg\ ha^{-1}$ , respectivamente, para o P e K. As sucessões que receberam adubação apresentam balanço estatisticamente superior. Apesar da adição de P e K, os valores do balanço nessas



sucessões apresentam-se negativos, indicando que as quantidades não foram suficientes para repor o P e o K exportados. As sucessões de culturas n/m/n/t/s (T1) e a/m/f/t/s (T2) encontram-se numa situação intermediária, devido às menores exportações de P e K (Tabelas 1.8) associadas às menores produtividades acumuladas nessas sucessões (Tabela 2.6). Os menores valores de balanço de P e K são observados nas sucessões e/m/n/t/s (T5) e e/m/c/t/s (T6), estatisticamente semelhantes entre si para o balanço de K. Essas sucessões apresentam os valores de balanço de P e K mais negativos. Isso é atribuído à exportação ocasionada pela produtividade de grãos, a qual foi, provavelmente, sustentada pela fertilidade que o solo apresentava na condição inicial do estudo.

**Tabela 3.2 - Balanço (adição-exportação) de P e K em diferentes sucessões de culturas acumulado em cada ciclo de rotação e no período de 10 anos.**

Sucessões de Culturas	1º Ciclo 1997-99	2º Ciclo 1999-01	3º Ciclo 2001-03	4º Ciclo 2003-05	5º Ciclo 2005-07	Total Período
----- kg ha <sup>-1</sup> -----						
----- Balanço de P-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -----						
T1. n/m/n/t/s <sup>(1)</sup>	-73 cd <sup>(2)</sup>	-65 c	-63 b	-63 c	-67 a	-330 c
T2. a/m/f/t/s	-54 b	-56 b	-64 b	-43 b	-70 ab	-288 b
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	-22 a	-17 a	-17 a	-32 a	-81 bc	-168 a
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	-18 a	-18 a	-21 a	-31 a	-83 c	-170 a
T5. e/m/n/t/s	-76 d	-71 c	-77 c	-79 d	-79 bc	-381 e
T6. e/m/c/t/s	-69 c	-69 c	-69 b	-77 d	-77 abc	-360 d
----- Balanço de K-K <sub>2</sub> O -----						
T1. n/m/n/t/s	-83 c	-85 bc	-83 b	-60 c	-78 a	-389 c
T2. a/m/f/t/s	-70 b	-81 b	-92 b	-45 b	-81 ab	-368 b
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	-2 a	-8 a	-8 a	-1 a	-90 c	-109 a
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	-0 a	-9 a	-13 a	0 a	-90 c	-113 a
T5. e/m/n/t/s	-85 c	-89 c	-91 b	-76 d	-86 abc	-427 d
T6. e/m/c/t/s	-78 c	-90 c	-90 b	-76 d	-87 bc	-421 d

<sup>(1)</sup> n – nabo forrageiro; a – aveia; e – ervilhaca; f – feijão; c – crotalária; m – milho; t – trigo; s – soja

<sup>(a)</sup> Adubação com fósforo e potássio na sementeira da ervilhaca

<sup>(2)</sup> Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo Teste de Duncan (P<0,05)

No balanço aparente (ciclagem-exportação) de P (Tabela 3.3), os maiores valores são observados nas sucessões que receberam adubação. Analisando a percentagem de ciclagem e exportação de P pelas sucessões de culturas (Figura 3.9), o uso da adubação proporcionou aumento de 8 e 9 pontos percentuais na ciclagem de P das sucessões e/m/n/t/s e e/m/c/t/s, respectivamente. Esse efeito na ciclagem não se traduziu em aumento na exportação de P na sucessão e/m/n/t/s, e

de apenas 3 pontos percentuais na sucessão e/m/c/t/s. As demais sucessões apresentam um menor balanço aparente de P, diretamente relacionado aos valores de ciclagem e exportação de P.

**Tabela 3.3 - Balanço (ciclagem-exportação) aparente de P e K em diferentes sucessões de culturas acumulado em cada ciclo de rotação e no período de 10 anos.**

Sucessões de Culturas	1º Ciclo 1997-99	2º Ciclo 1999-01	3º Ciclo 2001-03	4º Ciclo 2003-05	5º Ciclo 2005-07	Total Período
----- kg ha <sup>-1</sup> -----						
----- Balanço aparente de P-P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> -----						
T1. n/m/n/t/s <sup>(1)</sup>	11 b <sup>(2)</sup>	-1 b	-27 d	-37 d	-33 <sup>ns</sup>	-87 e
T2. a/m/f/t/s	-5 c	9 ab	-18 cd	11 a	-24	-27 cd
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	26 a	16 ab	3 b	-1 b	-24	20 b
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	25 ab	29 a	39 a	-17 c	-23	53 a
T5. e/m/n/t/s	20 ab	9 ab	-9 bc	-32 d	-33	-44 d
T6. e/m/c/t/s	17 ab	15 ab	26 a	-33 d	-26	-3 bc
----- Balanço aparente de K-K <sub>2</sub> O -----						
T1. n/m/n/t/s	671 a	489 ab	228 c	186 c	231 cd	1805 d
T2. a/m/f/t/s	227 c	240 c	170 d	227 c	178 e	1042 f
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	593 a	513 a	403 b	535 a	349 a	2392 a
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	431 b	473 ab	470 a	314 b	253 c	1941 c
T5. e/m/n/t/s	640 a	513 a	433 ab	334 b	312 b	2231 b
T6. e/m/c/t/s	395 b	384 b	419 b	213 c	207 de	1618 e

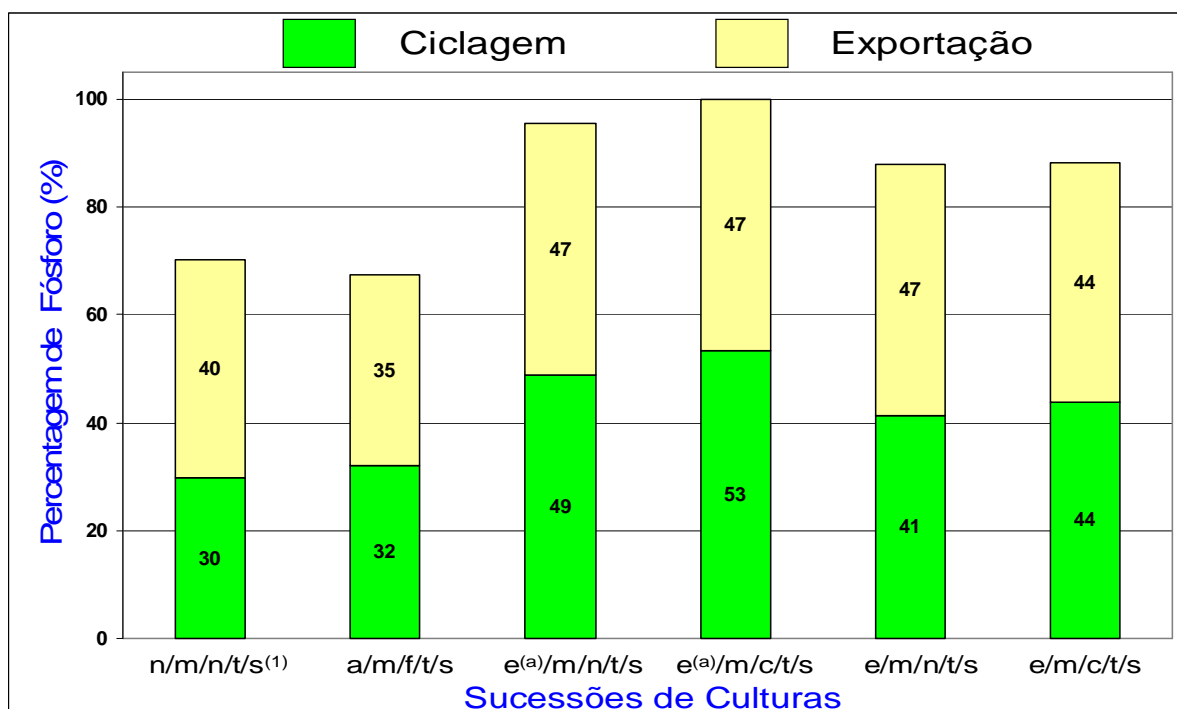
<sup>(1)</sup> n – nabo forrageiro; a – aveia; e – ervilhaca; f – feijão; c – crotalária; m – milho; t – trigo; s – soja

<sup>(a)</sup> Adubação com fósforo e potássio na sementeira da ervilhaca

<sup>(2)</sup> Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo Teste de Duncan (P<0,05)

ns – não significativo ao nível de 5 % de probabilidade

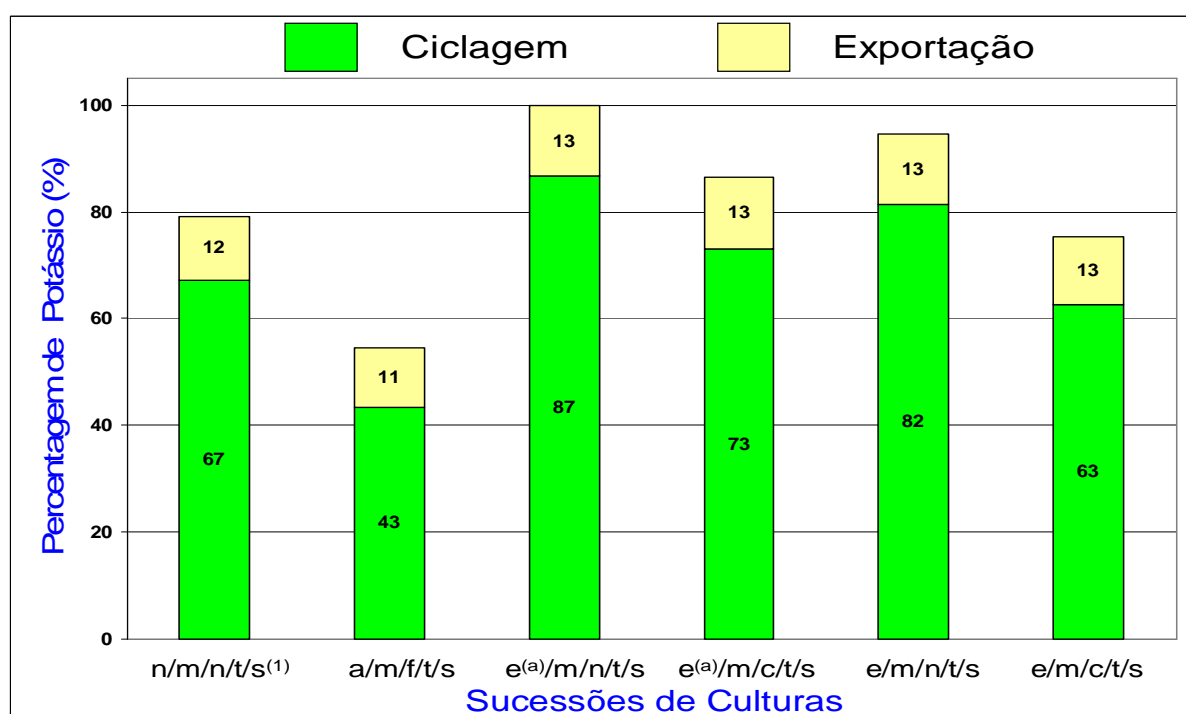
Os valores de balanço aparente de K apresentam valores positivos e altos (Tabela 3.3), com uma variação entre as sucessões de culturas, no período de 10 anos, de 1042 a 2392 kg ha<sup>-1</sup>. Foi observada uma superioridade nas sucessões e/m/n/t/s (T3 e T5), aliada provavelmente, ao excelente potencial do nabo forrageiro na ciclagem de K (Tabela 1.9). As sucessões e/m/c/t/s encontram-se numa situação intermediária. Os menores valores de balanço aparente de K acumulados no período são observados nas sucessões n/m/n/t/s e a/m/f/t/s, estatisticamente diferentes entre si. O uso da adubação com P e K proporcionou aumento de 5 e 10 pontos percentuais na ciclagem de K (Figura 3.10), nas sucessões e/m/n/t/s e e/m/c/t/s, respectivamente. Esse efeito na ciclagem não se traduziu em aumento na exportação de K.



**Figura 3.9 - Percentagem de exportação e ciclagem acumulada de P em diferentes sucessões de culturas no período de 10 anos.**

<sup>(1)</sup> n – nabo forrageiro; a – aveia; e – ervilhaca; f – feijão; c – crotalária; m – milho; t – trigo; s – soja

<sup>(a)</sup> Adubação com fósforo e potássio na sementeira da ervilhaca

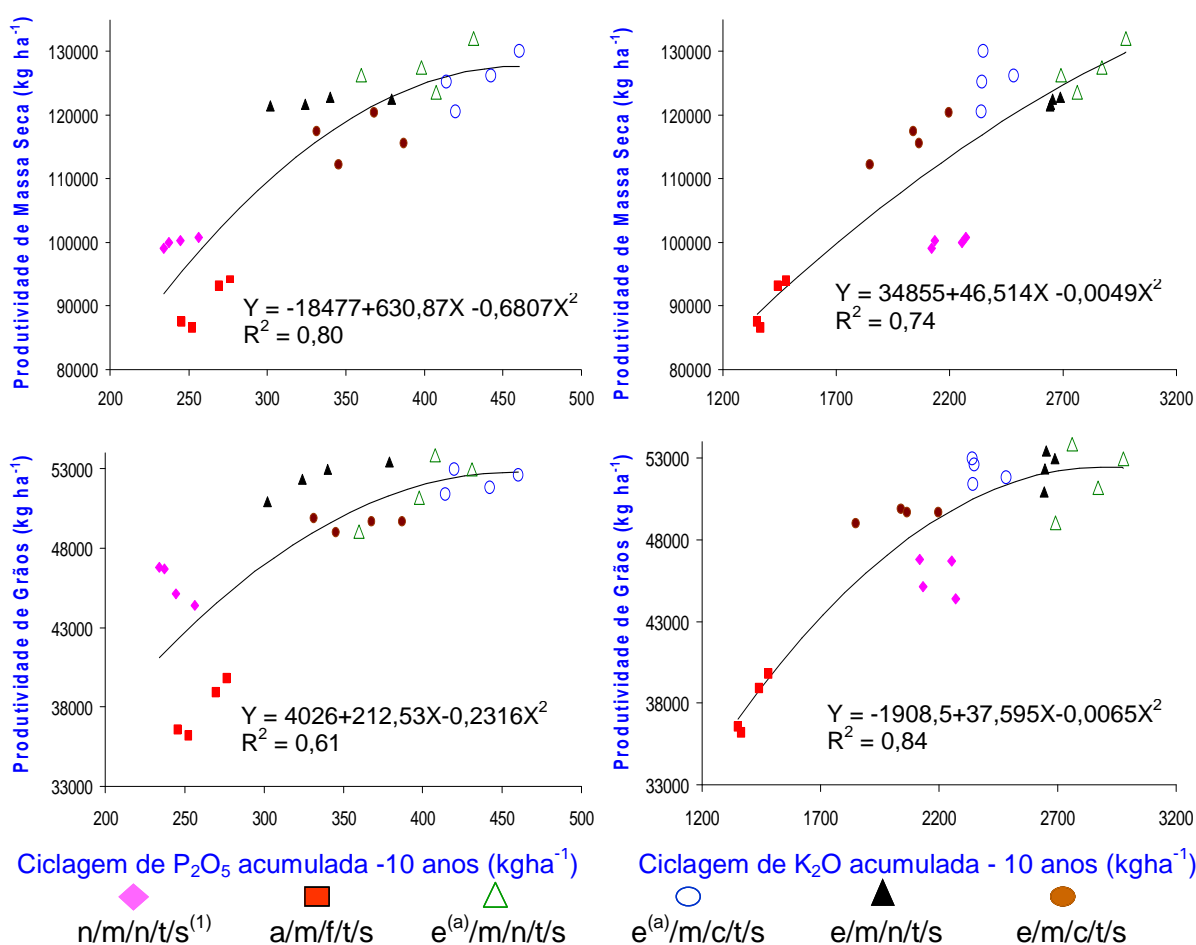


**Figura 3.10 - Percentagem de exportação e ciclagem acumulada de K em diferentes sucessões de culturas no período de 10 anos.**

<sup>(1)</sup> n – nabo forrageiro; a – aveia; e – ervilhaca; f – feijão; c – crotalária; m – milho; t – trigo; s – soja

<sup>(a)</sup> Adubação com fósforo e potássio na sementeira da ervilhaca

Apesar da sucessão a/m/f/t/s apresentar as menores ciclagens de P, estatisticamente semelhantes à sucessão n/m/n/t/s (Tabela 1.9), o comportamento, nessa sucessão, da relação entre a ciclagem de P e a produtividade acumulada de massa seca e de grãos foi diferente se comparado às outras sucessões (Figura 3.11).



**Figura 3.11 - Relação entre a ciclagem de P e de K com a produtividade acumulada de massa seca e de grãos em diferentes sucessões de culturas, no período de 10 anos.**

<sup>(1)</sup> n – nabo forrageiro; a – aveia; e – ervilhaca; f – feijão; m – milho; t – trigo; s – soja

<sup>(a)</sup> Adubação com fósforo e potássio na sementeira da ervilhaca

Isso está associado à baixa produtividade de grãos observada nessa sucessão, provavelmente limitada pela não utilização de adubação nitrogenada na seqüência aveia-milho. De modo semelhante ao N, a ciclagem de K teve uma alta relação ( $R^2 = 0,74$  e  $0,84$ ) com a produtividade acumulada de massa seca e de

grãos, respectivamente (Figura 3.11). A ciclagem de P nas sucessões a/m/f/t/s e n/m/n/t/s foi 14,8 e 16,8 pontos percentuais menor (Figura 3.9), comparativamente, à média das sucessões e/m/n/t/s (T3 e T5) e e/m/c/t/s (T4 e T6). No entanto, a exportação de P foi menor em apenas 11,3 e 6,3 pontos percentuais, respectivamente, nessas sucessões. Na ciclagem de K, essa inferioridade foi de 33,3 e 9,3 pontos percentuais, respectivamente (Figura 3.10). Esse efeito na ciclagem K proporcionou uma diferença de apenas 2 e 1 pontos percentuais na exportação de K, respectivamente, nas sucessões a/m/f/t/s (T2) e n/m/n/t/s (T1), comparativamente, à média das sucessões e/m/n/t/s (T3 e T5) e e/m/c/t/s (T4 e T6). Isso está associado ao fato de que, mesmo a ciclagem interferindo na produtividade de grãos das culturas, o seu reflexo na exportação de K é menor, em virtude dos teores de K nos grãos ser proporcionalmente bem menor quando comparado aos teores de P e N.

Quanto mais negativo os valores do balanço de P e K, é provável que ocorra uma maior dependência da contribuição da fertilidade do solo na manutenção da produtividade das culturas. Nas condições do estudo, em que a área apresenta uma fertilidade originalmente alta, observou-se uma relação direta entre a ciclagem de P e K acumuladas no período de 10 anos com a produtividade de massa seca e de grãos (Figura 3.11). Isso pode ser utilizado para melhorar o entendimento da dinâmica do P e K na manutenção da produtividade das culturas nas sucessões manejadas sob SPD.

Avaliando os resultados de massa seca acumulados no período de 10 anos (Tabela 2.6), observou-se uma superioridade nas sucessões com adubação com P e K (T3 e T4), em 4,3% e 7,8%, respectivamente às sucessões e/m/n/t/s (T5) e e/m/c/t/s (T6). No entanto, observou-se resposta significativa à utilização da adubação com P e K na produtividade de grãos acumulada no período de 10 anos (Tabela 2.6), com uma superioridade de 5,3%, somente na sucessão e/m/c/t/s. É importante ressaltar que apesar da sucessão e/m/n/t/s, quando comparada à sucessão e/m/c/t/s, apresentar uma adição de N inferior estatisticamente (Tabela 1.6), uma ciclagem de N e P estatisticamente semelhante (Tabelas 1.9) e uma ciclagem de K superior estatisticamente, mostrou-se eficiente em manter a produtividade de grãos quando não se utilizou adubação em um período de 10 anos.

Com base nisso, acredita-se que as sucessões que utilizam ervilhaca no inverno e nabo forrageiro entre milho e trigo, parece haver um sinergismo das

espécies. Isso, provavelmente, através da ciclagem, parece modificar a dinâmica dos nutrientes do solo, afetando a resposta de adubação com P e K das culturas e mantendo a produtividade das culturas no tempo.

### **3.4 Conclusões**

- As sucessões de culturas e/m/n/t/s, apesar do menor balanço de N do que a sucessão e/m/c/t/s, foram eficientes em manter a produtividade de grãos.

- A ciclagem de nutrientes teve uma alta relação com a produção acumulada no período de 10 anos e pode ser utilizada para melhorar o entendimento da dinâmica dos nutrientes e a manutenção da produtividade das espécies cultivadas no SPD.

## **4 - RESPOSTA A NITROGÊNIO, FÓSFORO E POTÁSSIO EM SUCESSÕES DE CULTURAS NO SISTEMA PLANTIO DIRETO**

### **4.1 Introdução**

Com o tempo de cultivo do solo no SPD aumentam os teores de MO e de nutrientes que melhoram a fertilidade do solo, alteram a dinâmica dos nutrientes e, conseqüentemente, o desenvolvimento das plantas. O suprimento adequado de nutrientes às plantas é imprescindível na busca de altas produtividades das espécies cultivadas.

No RS, principalmente na região produtora de grãos, em que o solo é cultivado predominantemente no SPD há mais de 15 anos, verificou-se um importante aumento na fertilidade e na produtividade das culturas, com o tempo de cultivo desses solos no SPD (Nicolodi, 2007). Os programas para o manejo da fertilidade do solo foram desenvolvidos no SPC, que possui características bem diferentes do SPD. Embora alguns ajustes tenham sido feitos, os indicadores usados atualmente para as recomendações são os mesmos do SPC (Anghinoni & Salet, 1996; CQFS-RS/SC, 2004). O aumento da área cultivada no SPD, no Brasil, tem gerado questionamentos principalmente quanto aos processos básicos de transformação da MO e de seus efeitos nas propriedades do solo e na ciclagem de nutrientes (Sá, 1998).

Existe também uma preocupação em tornar possível o uso das quantidades dos nutrientes reciclados pelas culturas nas recomendações de adubação.

As sucessões de culturas podem contribuir para a manutenção do equilíbrio dos nutrientes no solo e para o aumento da sua fertilidade. A adição regular de resíduos de adubos verdes aos vários solos e ambientes agroecológicos contribui para a conservação do solo e da água, promovendo, principalmente, a melhoria da estrutura que favorece a aeração e a infiltração de água no solo, permitindo um maior desenvolvimento das raízes (Lal, 1986). Além disso, propicia melhor aproveitamento de adubos químicos e redução nos custos com adubação mineral,

uma vez que promove o aumento da atividade biológica do solo (Hernani et al., 1995).

O cultivo de espécies vegetais conhecidas como plantas de cobertura intensifica a oferta de nutrientes nas camadas superficiais do solo (Fiorin, 1999). Contudo, a combinação ideal das espécies usadas para a cobertura do solo em cultivos com SPD é aquela cuja taxa de decomposição dos resíduos vegetais é compatível com a manutenção do solo protegido contra agentes erosivos por maior período de tempo e com o fornecimento de nutrientes sincronizado com a demanda pela cultura subsequente (Oliveira et al., 2002). A eficiência dessas sucessões depende da sincronização entre a ciclagem dos nutrientes e as fases de maior absorção pelas culturas, da fixação biológica do  $N_2$  e do suprimento de nutrientes pelos resíduos das culturas na sucessão, sem prescindir da elevada produtividade das culturas sucessoras.

O conhecimento dos fatores que afetam a dinâmica e a disponibilidade de nutrientes no solo são relevantes para analisar o seu comportamento no sistema solo-planta e, conseqüentemente, a resposta das culturas à adubação.

A recomendação atual de adubação nitrogenada para a cultura do milho cultivado no SPD nos Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina (CQFS-RS/SC, 2004), define a dose de N a ser aplicada, considerando a expectativa de rendimento de grãos, o teor de MO, a espécie antecessora, seu rendimento de massa seca e a proporção da espécie em cultivos consorciados. Principalmente para recomendação da adubação nitrogenada, é importante incluir o tempo (fase de implantação ou estabelecido) de adoção do SPD. Na fase de implantação do sistema (até 4 a 5 anos), segundo Sá (1996), predominam os processos de imobilização de N no solo. Dessa forma, torna-se necessário o manejo adequado da adubação nitrogenada, pela utilização de maiores doses de N para as culturas de milho, trigo, cevada, etc. Após alguns anos de adoção do SPD, ocorre um aumento nos conteúdos de carbono (MO) que conduz ao aumento do reservatório de N potencialmente mineralizável. Nessa fase, é restabelecido um equilíbrio entre a imobilização/liberação e, segundo Sá (1996), após 9 a 12 anos de SPD, observa-se maior liberação de N ao sistema, com menor resposta à adubação nitrogenada.

Na fase inicial de adoção do SPD, a construção de níveis de P exige uma maior quantidade de fertilizante fosfatado (Cubilla, 2005). Porém, com o transcorrer dos anos de fertilização e de adoção do sistema, verifica-se a saturação dos sítios



localizados na camada superficial, permitindo que a construção dos níveis ocorra de forma mais intensa e rápida. Com isso, ocorre primeiramente a saturação dos sítios mais ávidos e o remanescente é redistribuído em frações retidas com menor energia e, por conseqüência, maior capacidade de dessorção, aumentando a sua disponibilidade às plantas (Barrow et al., 1998; Rheinheimer & Anghinoni, 2001). Esse processo intensifica-se na medida em que é reduzida a mobilização do solo. Além dos aspectos inerentes à química do solo, não devem ser desconsiderados outros relacionados à atividade biológica, ciclagem de nutrientes e de redução de perdas de P verificados sob SPD.

Com a aplicação de adubos fosfatados e conseqüente adsorção aos colóides, o manejo do solo passa a ter papel importante no prolongamento da sua disponibilidade, pois algumas práticas podem ser adotadas para diminuir a sua adsorção específica, como o não revolvimento do solo, controle da erosão e a manutenção da cobertura vegetal do solo. Em solos onde a fração argila é composta predominantemente por oxihidróxidos de ferro e de alumínio e caulinita, como os latossolos do Planalto do RS, a capacidade de sorção do P é alta. Por isso, no SPD a eficiência da adubação fosfatada é melhorada onde o solo não é revolvido, diminuindo a exposição dos sítios de adsorção (Gatiboni, 2003). Também, pelo não revolvimento do solo, os fertilizantes fosfatados aplicados acumulam P nas camadas superficiais e o de camadas profundas é ciclado pelas plantas para a superfície (Selles et al., 1997; Rheinheimer, 2000). Com isso, ocorre primeiramente a saturação dos sítios mais ávidos e o remanescente é redistribuído em frações retidas com menor energia e, por isso, maior capacidade de dessorção, aumentando a sua disponibilidade às plantas (Barrow et al., 1998; Rheinheimer & Anghinoni, 2001).

A deposição de resíduos culturais na superfície do solo diminui a sua superfície de contato com o solo e, assim, a decomposição pela biomassa microbiana é desacelerada, resultando na mineralização gradual e parcial desses compostos, aumentando o conteúdo de MO e P orgânico (Rheinheimer, 2000) e de ânions orgânicos, e esses podem aumentar a competição pelos sítios de adsorção, diminuindo a retenção do P (Hue, 1991). Do mesmo modo, a atividade microbiana nas camadas superficiais do SPD pode proporcionar maior disponibilidade potencial do P às plantas, já que aquele incorporado na biomassa dos microrganismos forma estoque de P microbiano no solo e não é adsorvido aos colóides (Conte, 2001). Assim, no SPD, não há perdas de P por erosão e, devido à localização da adubação

fosfatada, do acúmulo de MO e do aumento da biomassa microbiana, ocorre acumulação do P orgânico. Por isso, a manutenção da cobertura do solo também por plantas vivas no SPD impede que o P orgânico mineralizado passe para formas menos lábeis.

As plantas absorvem o K da solução do solo, principalmente, por difusão e fluxo de massa, ambos os mecanismos de suprimento de nutrientes muito influenciados pela umidade do solo (Klepker & Anghinoni, 1995). O K apresenta mobilidade no solo, podendo ser redistribuído no perfil pelo fluxo de água (mobilidade vertical) e por absorção e ciclagem pelas plantas (mobilidade horizontal e vertical), uma vez que é um nutriente requerido em grandes quantidades, especialmente naquelas de alta produção de massa verde. Apesar disso, estudos conduzidos no Sul do Brasil têm demonstrado pequenas respostas à aplicação de K. Esses resultados podem ser interpretados com base na capacidade das reservas de K do solo de manter o equilíbrio com a solução do solo atendendo ao requerimento das plantas (Oliveira et al., 1971; Meurer & Anghinoni, 1993; Silva et al., 1995; Meurer et al., 1996; Castilhos & Meurer, 2002; Melo et al., 2004; Brunetto et al., 2005). Entretanto, são escassos os estudos em campo com experimentos de longa duração que estabeleçam o teor crítico e a resposta das culturas à adição de K sob SPD (Brunetto et al., 2005).

Os restos vegetais deixados na superfície do solo em sucessões de culturas em semeadura direta podem constituir uma reserva considerável de nutrientes (Fiorin, 1999). O K contido na palha da superfície do solo em sucessões de culturas em SPD pode tornar-se uma fonte expressiva de K para nutrição da cultura subsequente (Foloni & Rosolem, 2004). Por ação da água das chuvas, o K, independentemente da mineralização da MO, pode constituir fator importante na liberação de nutrientes de restos vegetais.

O comportamento da resposta das culturas à adubação, principalmente quando o solo é cultivado no SPD, está relacionado ao histórico de cultivo da área, variável de uma lavoura para outra. Tem-se verificado que existem diferenças importantes nas respostas das culturas à adubação. Isso se deve ao fato de ser o SPD um sistema dinâmico e a melhoria nos processos físicos, químicos e biológicos do solo, encontra-se em diferentes níveis dentro de uma escala evolutiva (Sá, 2004).

Segundo Nicolodi (2007), é bem possível que os benefícios desse sistema, tanto para o solo como para o desenvolvimento das plantas, não sejam

contemplados pela avaliação química tradicional da fertilidade, sendo percebidos como “ruídos” e não como benefícios. O “ruído” na avaliação da fertilidade sempre existiu, porém a sua magnitude aumentou no SPD devido a inúmeros fatores isolados ou por efeito em cascata em que a alteração de um fator influencia uma série deles, geralmente não considerados na sua avaliação. O aumento do “ruído” ocorre na amostragem de solo e nas determinações químicas, na calibração e na interpretação dos resultados das análises (Nicolodi, 2007). É importante a noção exata do grau da interferência do aumento do “ruído” na avaliação, para saber se é suficiente adaptá-la ou se é necessário desenvolver uma nova metodologia de avaliação, a partir de outro conceito da fertilidade para o cultivo do solo no SPD (Nicolodi, 2007).

O cultivo do solo no SPD altera a dinâmica dos nutrientes no solo e melhora a eficiência de utilização dos nutrientes pelas plantas. Embora haja melhorias no ambiente para a vida das plantas (disponibilidade e acesso aos nutrientes, retenção de água etc.), segundo Nicolodi (2007), no SPD ocorre um aumento no “ruído”, porque o sistema de avaliação da fertilidade foi desenvolvido para avaliar o solo revolvido, totalmente desagregado. Para o autor, as influências das diferentes rotações de culturas adotadas, e das relações estabelecidas com o tempo de cultivo, interferem nas relações entre o rendimento relativo e o teor dos nutrientes determinados quimicamente nas amostras de solo.

O objetivo desse trabalho foi de avaliar a resposta a N, P e K em sucessões de culturas com e sem adubação no SPD.

## **4.2 Material e Métodos**

### **4.2.1 Descrição da área experimental**

Nesse estudo foi utilizado o mesmo experimento descrito no Capítulo 1, constituído por diferentes combinações de plantas de cobertura de inverno, de verão e/ou culturas de safrinha intercaladas com as principais culturas produtoras de grãos da região, denominadas de sucessões de culturas.

Com o objetivo de avaliar a resposta à adubação com NPK em sucessões de

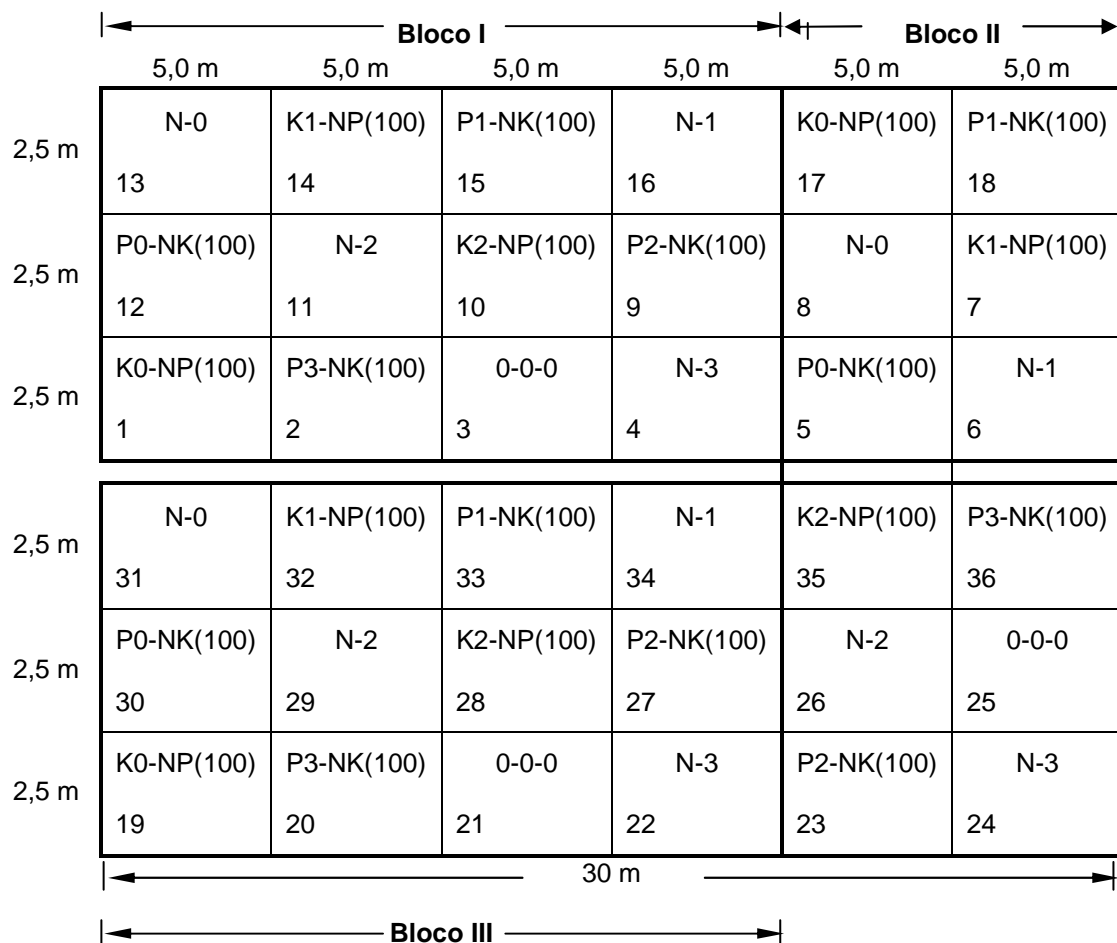
culturas com e sem adubação por 8 anos (4 ciclos), no 5º ciclo de rotação de culturas (9º e 10º anos), foi realizada a divisão da parcela inicialmente de 7,5 x 30 m, em 18 parcelas de 2,5 x 5,0 m (Figura 4.1). Nesse estudo utilizou-se doses de NPK no milho e trigo (Tabela 4.1), para aumentar a produtividade e avaliar a resposta das plantas à adubação, assim como a eficiência da ciclagem de nutrientes nas diferentes sucessões de culturas.

**Tabela 4.1 - Doses de N, P e K utilizadas no milho e trigo no 5º ciclo de rotação de culturas (9º e 10º anos) em diferentes sucessões de culturas do experimento cultivado há 11 anos no SPD.**

Tratamento Código	Doses de Nutriente (kg ha <sup>-1</sup> )		
	N	P - P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K - K <sub>2</sub> O
..... Testemunha Absoluta .....			
0-0-0	0	0	0
..... Doses de N .....			
N-0	0	0	0
N-1	40	0	0
N-2	80	0	0
N-3	120	0	0
..... Doses de P - P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> .....			
P0-NK(100)	120	0	80
P1-NK(100)	120	30	80
P2-NK(100)	120	60	80
P3-NK(100)	120	90	80
..... Doses de K - K <sub>2</sub> O .....			
K0-NP(100)	120	90	0
K1-NP(100)	120	90	40
K2-NP(100)	120	90	80

Na cultura da soja não foram adicionadas doses de NPK, para avaliar o efeito residual da adubação realizada no milho e no trigo. Assim, primeiramente com as doses de N, procurou-se investigar a eficiência da ciclagem em atender uma demanda crescente de P e K em função do aumento da produtividade. Também foi avaliada a curva de resposta a P e K, nesse caso com os demais nutrientes em condições não limitantes, considerando as condições com e sem adubação há 8 anos.

O teor de P e K do solo na condição original (em 1997), as quantidades de P e K aplicados via adubação e exportados pelas culturas em 8 anos (1997-2005), e o teor de P e K no solo, na condição inicial (em 2005) dos estudos de respostas a doses de N, P e K, são apresentadas na Tabela 4.2.



**Figura 4.1 - Croqui de campo (detalhe da subdivisão das parcelas) do experimento de longa duração no 5º ciclo de rotação, e os tratamentos (doses) de adubação avaliados no estudo.**

**Tabela 4.2 - Teor de P e K do solo na condição original (0 a 10 cm), quantidades de P e K aplicados via adubação e exportados pelas culturas em 8 anos (1997-2005) e teor de P e K no solo na condição inicial (0 a 10 cm) em diferentes sucessões de culturas.**

Sucessões de Culturas	Teor Original		Adubação		Exportação		Teor Inicial	
	P	K	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	P <sub>2</sub> O <sub>5</sub>	K <sub>2</sub> O	P	K
	---- mg dm <sup>-3</sup> ----		----- kg ha <sup>-1</sup> -----				---- mg dm <sup>-3</sup> ----	
T1. n/m/n/t/s <sup>(1)</sup>	17,2	162	0,0	0,0	263,4	311,2	8,6	219
T2. a/m/f/t/s	17,2	162	0,0	0,0	217,8	287,8	13,5	236
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	17,2	162	324,0	324,0	298,7	343,3	13,8	276
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	17,2	162	324,0	324,0	298,3	347,6	13,5	206
T5. e/m/n/t/s	17,2	162	0,0	0,0	302,2	340,6	9,6	227
T6. e/m/c/t/s	17,2	162	0,0	0,0	283,4	333,8	10,5	220

<sup>(1)</sup> n – nabo forrageiro; a – aveia; e – ervilhaca; f – feijão; c – crotalária; m – milho; t – trigo; s – soja

<sup>(a)</sup> Adubação com fósforo e potássio na sementeira da ervilhaca

Nesse estudo foi utilizado o delineamento experimental de blocos ao acaso com parcelas subdivididas e três repetições. As parcelas principais são compostas pelas sucessões de culturas, e as sub-parcelas pelas doses de N, P e K.

#### 4.2.2 Avaliações

##### 4.2.2.1 Produtividade de grãos

A produtividade de grãos das culturas de milho, trigo, soja e feijão preto foi avaliada em todos os cultivos. Os resultados foram expressos em kg ha<sup>-1</sup> a 13% de umidade.

##### 4.2.3 Análise estatística

Na análise de variância dos resultados, quando os valores de F (Tratamento) foram significativos ao nível de 5 % de probabilidade, submeteu-se ao Teste de Duncan ( $p < 0,05$ ), usando o pacote estatístico SAS (SAS, 1989). Os parâmetros estatísticos (F<sub>Tratamento</sub> e coeficiente de variação) são apresentados no APÊNDICE D.

### 4.3 Resultados e Discussão

A produtividade de grãos de milho em resposta a doses de N, P e K cultivados em áreas com 8 anos de diferentes sucessões de culturas, com e sem adubação de P e K, é apresentada na Tabelas 4.3. Observa-se que, em todos os casos, não houve interação significativa entre as doses de nutrientes e as sucessões de culturas. A resposta a doses de N, P e K foi semelhante nas diferentes sucessões de culturas. Nesse caso, serão avaliados somente os efeitos dos fatores principais, ou seja, das doses e das sucessões de culturas.

**Tabela 4.3 - Produtividade de grãos de milho ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) em resposta a doses de N, P e K cultivado em diferentes sucessões de culturas.**

Sucessões de Culturas	Doses de N no Milho ( $\text{kg ha}^{-1}$ )				Média <sup>(2)</sup>
	0	40	80	120	
T1. n/m/n/t/s <sup>(1)</sup>	4560	4881	5345	6039	5206 b
T2. a/m/f/t/s	4302	4770	4844	5072	4747 b
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	5653	7173	6963	6975	6691 a
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	6151	6420	7750	6716	6759 a
T5. e/m/n/t/s	5568	6738	6415	6528	6312 a
T6. e/m/c/t/s	5464	5953	7147	5757	6080 a
Média <sup>(2)</sup>	5283 B	5989 A	6411 A	6181 A	
Sucessões de Culturas	Doses de P em Milho ( $\text{P}_2\text{O}_5$ - $\text{kg ha}^{-1}$ )				Média <sup>(2)</sup>
	0	30	60	90	
T1. n/m/n/t/s	5036	4933	5465	5558	5248 c
T2. a/m/f/t/s	6236	6745	6499	6252	6433 ab
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	6385	6418	6786	6815	6601 ab
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	6802	6697	6741	6623	6716 a
T5. e/m/n/t/s	5539	5735	6354	6930	6140 b
T6. e/m/c/t/s	5769	6174	6624	7178	6436 ab
Média <sup>(2)</sup>	5961 C	6117 BC	6411 AB	6559 A	
Sucessões de Culturas	Doses de K em Milho ( $\text{K}_2\text{O}$ - $\text{kg ha}^{-1}$ )			Média <sup>(2)</sup>	
	0	40	80		
T1. n/m/n/t/s	6056	5997	6096	6050 d	
T2. a/m/f/t/s	6486	6564	6870	6640 abc	
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	6594	6990	7286	6957 ab	
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	6714	7290	7401	7135 a	
T5. e/m/n/t/s	6325	6114	5989	6143 cd	
T6. e/m/c/t/s	6451	6663	6556	6557 bc	
Média <sup>ns</sup>	6438	6603	6700		

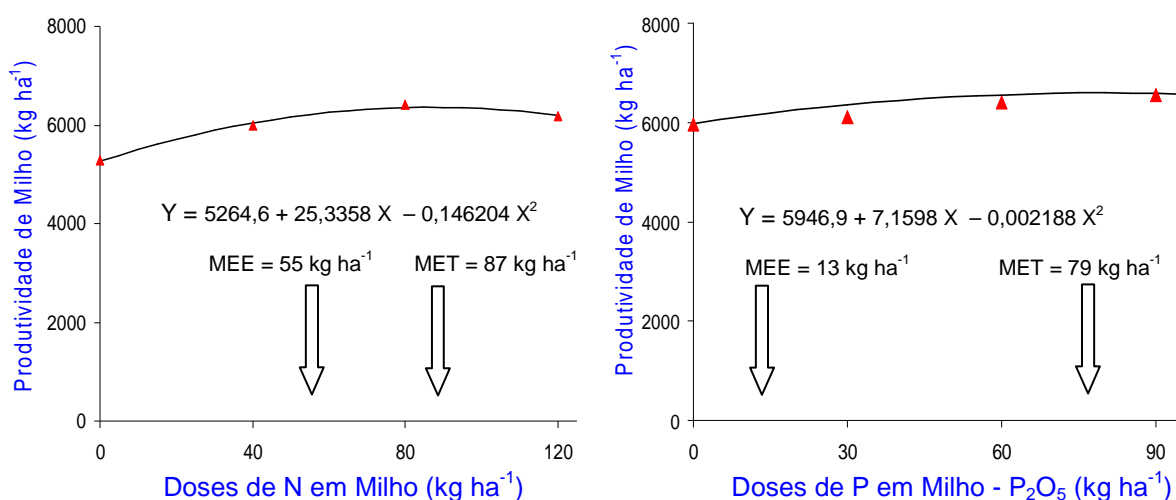
<sup>(1)</sup> n – nabo forrageiro; a – aveia; e – ervilhaca; f – feijão; c – crotalária; m – milho; t – trigo; s – soja

<sup>(a)</sup> Adubação com fósforo e potássio na sementeira da ervilhaca

<sup>(2)</sup> Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem estatisticamente pelo Teste de Duncan ( $P < 0,05$ )

ns – não significativo ao nível de 5 % de probabilidade

Houve resposta à adubação com doses de N e P na cultura do milho. As doses de 40, 80 e 120 kg ha<sup>-1</sup> de N foram superiores estatisticamente à situação sem N. A maior produtividade de grãos de milho foi observada na dose de 80 kg ha<sup>-1</sup> de N, o qual não diferiu estatisticamente das doses de 120 e 40 kg ha<sup>-1</sup> de N. No caso do P, a maior produtividade de grãos de milho foi observada na dose de 90 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, o qual não diferiu estatisticamente da dose de 60 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>. Em ambos os casos, o modelo de melhor ajuste foi o quadrático (Figura 4.2). As doses de máxima eficiência técnica (MET) e máxima eficiência econômica (MEE) na cultura do milho foram de 87 e 55 kg ha<sup>-1</sup> de N, e 79 e 13 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, respectivamente. No cálculo da MET e MEE foi considerado o preço do milho em R\$ 23,00 por saca de 60 kg, e R\$ 1.600,00 e R\$ 2.300,00, por tonelada, respectivamente para a uréia (45% de N) e superfosfato triplo (46% de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>). Convém ressaltar que, apesar de haver resposta significativa à adubação fosfatada no milho, a dose de MEE é muito baixa e podendo, em alguns casos, dependendo da relação de preço do nutriente e do milho, não se torna viável economicamente.



**Figura 4.2 - Curva de resposta a doses de N e P na cultura do milho cultivado em diferentes sucessões de culturas (MET= Máxima Eficiência Técnica; MEE= Máxima Eficiência Econômica).**

Não houve resposta à adubação com doses de K<sub>2</sub>O na cultura do milho (Tabela 4.3). Os efeitos das sucessões de culturas na produtividade de grãos de milho foram significativos nos estudos de doses de N, P e K.

No estudo de doses de N em milho (Tabela 4.3), as sucessões a/m/f/t/s (T2) e n/m/n/t/s (T1) apresentaram as menores produtividades de grãos, inferiores estatisticamente às demais sucessões. Considerando as condições sem adubação



com P e K, as sucessões e/m/n/t/s (T5), e/m/c/t/s (T6) e n/m/n/t/s (T1), apresentaram, respectivamente, uma superioridade de 33,0%, 28,1% e 9,7%, na produção de grãos de milho, quando comparadas à sucessão a/m/f/t/s (T2). É oportuno comparar que os efeitos das sucessões de culturas são superiores ao incremento na produtividade de grãos de milho, obtido pelo efeito das doses de N. Nesse estudo, em que não se utilizou adubação com P e K no milho, para avaliar o efeito residual da adubação por 8 anos, as sucessões sem adubação com P e K (T5 e T6) foram equivalentes estatisticamente às sucessões e<sup>(a)</sup>/m/n/t/s (T3) e e<sup>(a)</sup>/m/c/t/s (T4). Convém ressaltar que as sucessões de culturas, associadas aos níveis de fertilidade da área experimental na condição inicial (teor de P semelhante ou levemente acima do crítico e teor de K muito alto - Tabela 4.2), e ao manejo que o SPD proporcionou, uma vez suprida a demanda de N, mantiveram a produtividade de grãos de milho após 9 anos sem adubação com P e K.

No estudo de doses de P em milho (Tabela 4.3), em que se utilizou adubação com N e K, visando a suprir a demanda da cultura, as sucessões e/m/c/t/s (T4 e T6), e<sup>(a)</sup>/m/n/t/s (T3) e a/m/f/t/s (T2) foram superiores e estatisticamente semelhantes entre si. Numa situação intermediária encontra-se a sucessão e/m/n/t/s (T5), o qual não diferiu das sucessões e/m/c/t/s (T6), a/m/f/t/s (T2) e e<sup>(a)</sup>/m/n/t/s (T3). A sucessão n/m/n/t/s (T1) foi inferior às demais sucessões. As sucessões com adubação com P e K (T3 e T4) foram semelhantes estatisticamente, se comparadas às mesmas sucessões sem adubação (T5 e T6).

Em relação ao estudo de doses de K em milho (Tabela 4.3), em que se utilizou adubação com N e P, visando a suprir a demanda da cultura, as sucessões com adubação com P e K (T3 e T4), e a sucessão a/m/f/t/s (T2) foram superiores e estatisticamente semelhantes entre si. Numa situação intermediária encontra-se a sucessão e/m/c/t/s (T6), que não difere da sucessão e/m/n/t/s (T5) e da a/m/f/t/s (T2). A sucessão n/m/n/t/s (T1) apresenta os menores valores de produtividade, estatisticamente semelhantes à sucessão e/m/n/t/s (T5).

A produtividade de grãos de trigo em resposta a doses de N, P e K utilizados em áreas de fertilidade alta e sem adubação por 8 anos, em diferentes sucessões de culturas, é apresentada na Tabela 4.4. Observa-se que nos estudos de P e K não houve resposta às doses, nem interação significativa entre as doses e as sucessões de culturas. No entanto, para o N, a resposta às doses e o efeito da interação foram significativos. Isso mostra que o comportamento da resposta às doses de N foi

diferente para as sucessões de culturas, ou vice-versa. Avaliando esse efeito, a resposta às doses de N em trigo foi significativa somente na sucessão a/m/f/t/s (T2), apresentando, através do modelo de melhor ajuste, um comportamento linear. Esse comportamento foi semelhante ao relatado por Fiorin (2007), quando, em outro estudo, avaliando o efeito de três sucessões de culturas, na sucessão aveia preta/milho, o modelo de melhor ajuste foi o linear, indicando a necessidade de maiores doses de N para alcançar os rendimentos máximos. Isso pode ser atribuído, provavelmente, à maior imobilização e, conseqüentemente, à menor disponibilidade de N no solo, nessa sucessão de cultura.

**Tabela 4.4 - Produtividade de grãos de trigo ( $\text{kg ha}^{-1}$ ) em resposta a doses de N, P e K, cultivado em diferentes sucessões de culturas.**

Sucessões de Culturas	Doses de N no Trigo ( $\text{kg ha}^{-1}$ )				Média
	0	40	80	120	
T1. n/m/n/t/s <sup>(1)</sup>	1860 b <sup>(2)</sup>	2348 ns	1904 ns	2325 b	2109
T2. a/m/f/t/s <sup>(3)</sup>	1755 b B	1957 B	2490 A	2723 a A	2231
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	2294 a	2372	2218	2147 b	2258
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	1696 b	2031	2293	2120 b	2035
T5. e/m/n/t/s	1895 b	2170	2183	2225 b	2119
T6. e/m/c/t/s	1697 b	2215	2305	1990 b	2052
Média	1866	2182	2232	2255	

Sucessões de Culturas	Doses de P em Trigo ( $\text{P}_2\text{O}_5 - \text{kg ha}^{-1}$ )				Média <sup>(2)</sup>
	0	30	60	90	
T1. n/m/n/t/s	2309	2495	2920	3029	2688 a
T2. a/m/f/t/s	2733	2800	2690	3001	2806 a
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	2529	2268	2286	2220	2326 b
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	2498	2221	2337	2121	2294 b
T5. e/m/n/t/s	1973	2044	2200	2198	2104 b
T6. e/m/c/t/s	2126	2107	2103	2229	2141 b
Média <sup>ns</sup>	2361	2323	2423	2466	

Sucessões de Culturas	Doses de K em Trigo ( $\text{K}_2\text{O} - \text{kg ha}^{-1}$ )			Média <sup>(2)</sup>
	0	40	80	
T1. n/m/n/t/s	2377	2757	2521	2552 ab
T2. a/m/f/t/s	2746	3082	2251	2693 a
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	2237	2026	2306	2190 bc
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	2230	2144	2471	2282 bc
T5. e/m/n/t/s	2087	2134	2235	2152 c
T6. e/m/c/t/s	2009	2431	2366	2269 bc
Média <sup>ns</sup>	2281	2429	2358	

<sup>(1)</sup> n – nabo forrageiro; a – aveia; e – ervilhaca; f – feijão; c – crotalária; m – milho; t – trigo; s – soja

<sup>(a)</sup> Adubação com fósforo e potássio na sementeira da ervilhaca

<sup>(2)</sup> Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem estatisticamente pelo Teste de Duncan ( $P < 0,05$ )

<sup>(3)</sup> Ajuste Linear sucessão a/m/f/t/s (T2) = Y (Produtividade -  $\text{kg ha}^{-1}$ ) = 1715,58 + 8,595667 X (Doses N -  $\text{kg ha}^{-1}$ )

ns – não significativo ao nível de 5 % de probabilidade

Avaliando o comportamento das sucessões de cultura em cada dose de N em trigo (Tabela 4.4), observa-se efeito significativo somente na ausência e na dose de 120 kg ha<sup>-1</sup> de N. Isso está associado à contribuição da cultura de entressafra, utilizada, em cada sucessão, entre o milho e o trigo. Na ausência de N, de maneira geral, os maiores valores de produtividade estão associados às sucessões que mais contribuíram na ciclagem de N. Essa contribuição variou de 43 a 83 kg ha<sup>-1</sup> de N e está apresentada no APÊNDICE E. No entanto, o comportamento das sucessões de cultura na dose de 120 kg ha<sup>-1</sup> foi, de certo modo, e respeitando a característica de cada cultura utilizada entre o milho e o trigo, o contrário. Nesse caso, as sucessões que mais contribuíram na ciclagem de N, em especial as que incluem nabo forrageiro, somado à dose de 120 kg ha<sup>-1</sup> de N, aplicado via fertilizante, apresentaram os menores valores de produtividade de grãos de trigo. Isso está associado à ocorrência de acamamento da cultura de trigo pela alta disponibilidade de N, que, somando a contribuição da sucessão de culturas e do fertilizante, variou de 165 a 195 kg ha<sup>-1</sup> de N. A ocorrência de acamamento é um dos fatores que mais limita a maximização da produtividade de grãos de trigo. Os efeitos negativos do acamamento na produtividade são decorrentes do decréscimo da fotossíntese (Wiersma et al., 1986), da redução na assimilação e translocação de carboidratos e minerais (Pinthus, 1973), do aumento da intensidade de doenças (Weibel & Pendleton, 1964) e, finalmente, da redução na eficiência da colheita. Essa perda de potencial produtivo pode ser significativa, dependendo da intensidade e do estágio de desenvolvimento da planta em que ocorre o acamamento, sendo a antese o estágio mais sensível (Pinthus, 1973; Stanka et al., 1979).

Nos estudos de doses de P e K na cultura do trigo houve resposta somente às sucessões de culturas (Tabela 4.4). De modo geral, as sucessões que mais contribuíram na ciclagem de N pela utilização das plantas de cobertura de verão, apresentaram os menores valores de produtividade de grãos de trigo. Como mencionado anteriormente, isso está associado à ocorrência de acamamento da cultura de trigo pela alta disponibilidade de N, o que pode ter prejudicado a resposta a doses de P e K na cultura do trigo. Nesse sentido, as sucessões a/m/f/t/s (T2) e n/m/n/t/s (T1) foram superiores, estatisticamente semelhantes entre si.

A resposta do efeito residual das doses de N, P e K, aplicadas nas culturas de milho e trigo, em áreas com e sem adubação com P e K, sobre a soja cultivada em diferentes sucessões de culturas, é apresentada nas Tabelas 4.5.

**Tabela 4.5 - Produtividade de grãos de soja em resposta a doses de N, P e K aplicados em milho e trigo cultivados em diferentes sucessões de culturas.**

Sucessões de Culturas	Doses de N em Trigo e Milho (kg ha <sup>-1</sup> )				Média <sup>(2)</sup>
	0	40	80	120	
T1. n/m/n/t/s <sup>(1)</sup>	2455	2314	2251	2420	2360 c
T2. a/m/f/t/s	2624	2680	2303	2393	2500 c
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	2859	3048	2657	2696	2815 a
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	2691	2746	2919	2701	2764 ab
T5. e/m/n/t/s	2448	2697	2315	2730	2548 bc
T6. e/m/c/t/s	2713	2646	2908	2795	2765 ab
Média <sup>ns</sup>	2632	2688	2559	2623	

Sucessões de Culturas	Doses de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> em Milho e Trigo (kg ha <sup>-1</sup> )				Média <sup>ns</sup>
	0	30	60	90	
T1. n/m/n/t/s	2349	2943	2902	2624	2705
T2. a/m/f/t/s	2640	3072	2621	2916	2812
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	2707	3234	3341	2788	3018
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	3196	3059	2822	2998	3019
T5. e/m/n/t/s	2694	2947	3106	2980	2932
T6. e/m/c/t/s	2999	2821	3191	3001	3003
Média <sup>ns</sup>	2764	3013	2997	2885	

Sucessões de Culturas	Doses de K <sub>2</sub> O em Milho e Trigo (kg ha <sup>-1</sup> )			Média <sup>ns</sup>
	0	40	80	
T1. n/m/n/t/s	2984	3058	2932	2991
T2. a/m/f/t/s	2822	2881	2809	2837
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	2862	3248	3059	3056
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	3006	3168	2832	3002
T5. e/m/n/t/s	3104	3003	2885	2997
T6. e/m/c/t/s	3233	2817	2900	2984
Média <sup>ns</sup>	3002	3029	2903	

<sup>(1)</sup> n – nabo forrageiro; a – aveia; e – ervilhaca; f – feijão; c – crotalária; m – milho; t – trigo; s – soja

<sup>(a)</sup> Adubação com fósforo e potássio na sementeira da ervilhaca

<sup>(2)</sup> Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna e maiúscula na linha não diferem estatisticamente pelo Teste de Duncan (P<0,05)

ns – não significativo ao nível de 5 % de probabilidade

Observa-se que as doses de N, aplicadas nas culturas de milho e trigo, não resultaram num efeito residual significativo sobre a produtividade de grãos de soja. No entanto, as sucessões de culturas afetaram significativamente a produtividade de grãos de soja. Os maiores valores de produtividade são observados nas sucessões com adubação com P e K (T3 e T4) e na sucessão e/m/c/t/s (T6). Essas sucessões foram superiores em 12,6%, 10,6% e 10,6%, respectivamente, à sucessão a/m/f/t/s (T2). Os menores valores de produtividade de grãos de soja são observados na sucessão n/m/n/t/s (T1) e a/m/f/t/s (T2), estatisticamente semelhantes entre si e a sucessão e/m/n/t/s (T5).

No estudo de doses de P e K, não houve nenhum efeito residual significativo na produtividade de grãos da soja (Tabela 4.5), nem de doses de P e K aplicadas nas culturas de milho e trigo, nem das sucessões de culturas. Convém ressaltar que, nos estudos de doses de P e K, utilizou-se adubação com N e K, e N e P, respectivamente, visando a suprir a demanda da cultura de milho e trigo. Dessa forma, provavelmente, a resposta dos efeitos das doses e sucessões no estudo de doses de P e K, mostram-se menores, não afetando significativamente a produtividade de grãos de soja. A soja tem sido relatada como sendo uma cultura que apresenta uma resposta menor ao manejo do solo (Campos, 2006).

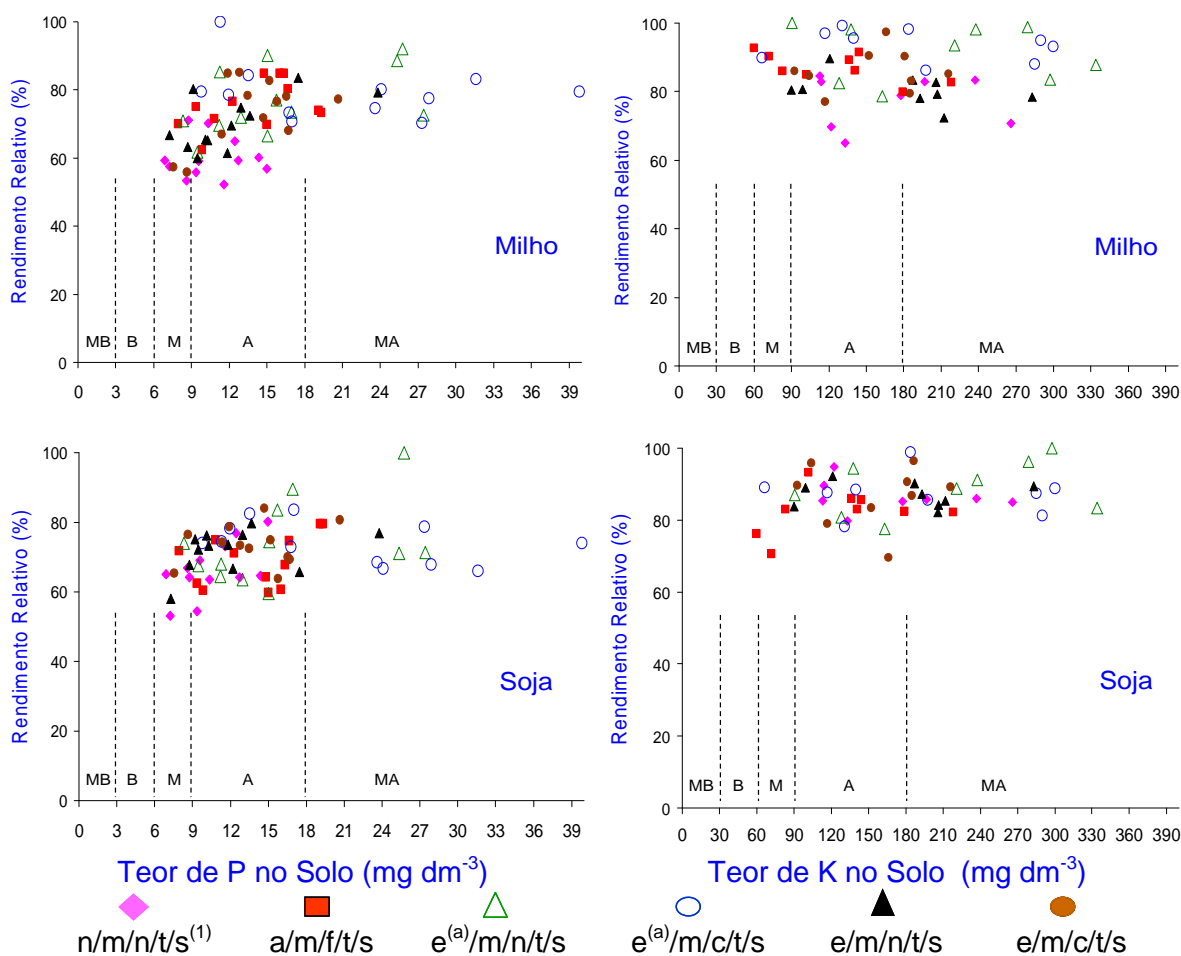
Isso mostra que existem efeitos conjugados sobre o comportamento das sucessões de culturas e que, através da ciclagem de nutrientes, podem modificar a dinâmica de nutrientes no solo. O solo, uma vez bem suprido de nutrientes, pode através do uso contínuo de sucessões, ser mais eficiente ao longo dos anos, induzir modificações positivas no aproveitamento dos nutrientes e garantir a manutenção do potencial produtivo das culturas, mesmo sem ou com pequenas adições de P e K.

A fim de melhorar o entendimento dos efeitos das sucessões de culturas na produtividade é apresentado na Figura 4.3, a resposta das culturas de milho e soja às doses de P e K e a sua relação com o teor de P e K (Mehlich 1) distribuídos nas faixas de interpretação adotados pela CQFS-RS/SC (2004). Foram excluídos os resultados de produtividade de grãos de trigo em virtude, como mencionado anteriormente, da ocorrência de acamamento que prejudicou a expressão do potencial produtivo da cultura.

Conforme anteriormente apresentado (Tabela 4.3, Figura 4.2), houve efeito significativo no estudo de doses de P somente na cultura do milho. No estudo de doses de P na cultura da soja, e de K nas culturas de milho e soja, os efeitos não foram estatisticamente significativos.

De maneira geral, os maiores teores de P e K estão associados às sucessões com adubação com P e K por 8 anos. Há uma predominância nos teores de P e K no solo nas faixas de interpretação “Alto” e “Muito Alto”, e um percentual menor na faixa “Médio”. A definição das faixas de interpretação pela CQFS-RS/SC (2004), a faixa “Médio” e “Alto” correspondem a rendimentos relativos de 75 a 90% e >90% do rendimento relativo máximo, respectivamente, indicando, por sua vez, média e baixa probabilidade de resposta à adição do nutriente. No entanto, o solo com o teor de P na faixa “Médio” apresenta rendimentos relativos que variaram de 52% a 100% e de

54% a 79%, do rendimento relativo máximo, respectivamente na cultura do milho e da soja. Já o solo com teor de P na faixa “Alto”, os rendimentos relativos variaram de 57% a 90%, e de 60% a 90% do rendimento máximo, respectivamente, nas culturas do milho e da soja.



**Figura 4.3 - Relação entre o teor de P e K no solo e o rendimento relativo de grãos de milho e soja cultivados em diferentes sucessões de culturas.**

<sup>(1)</sup> n – nabo forrageiro; a – aveia; e – ervilhaca; f – feijão; c – crotalária; m – milho; t – trigo; s – soja

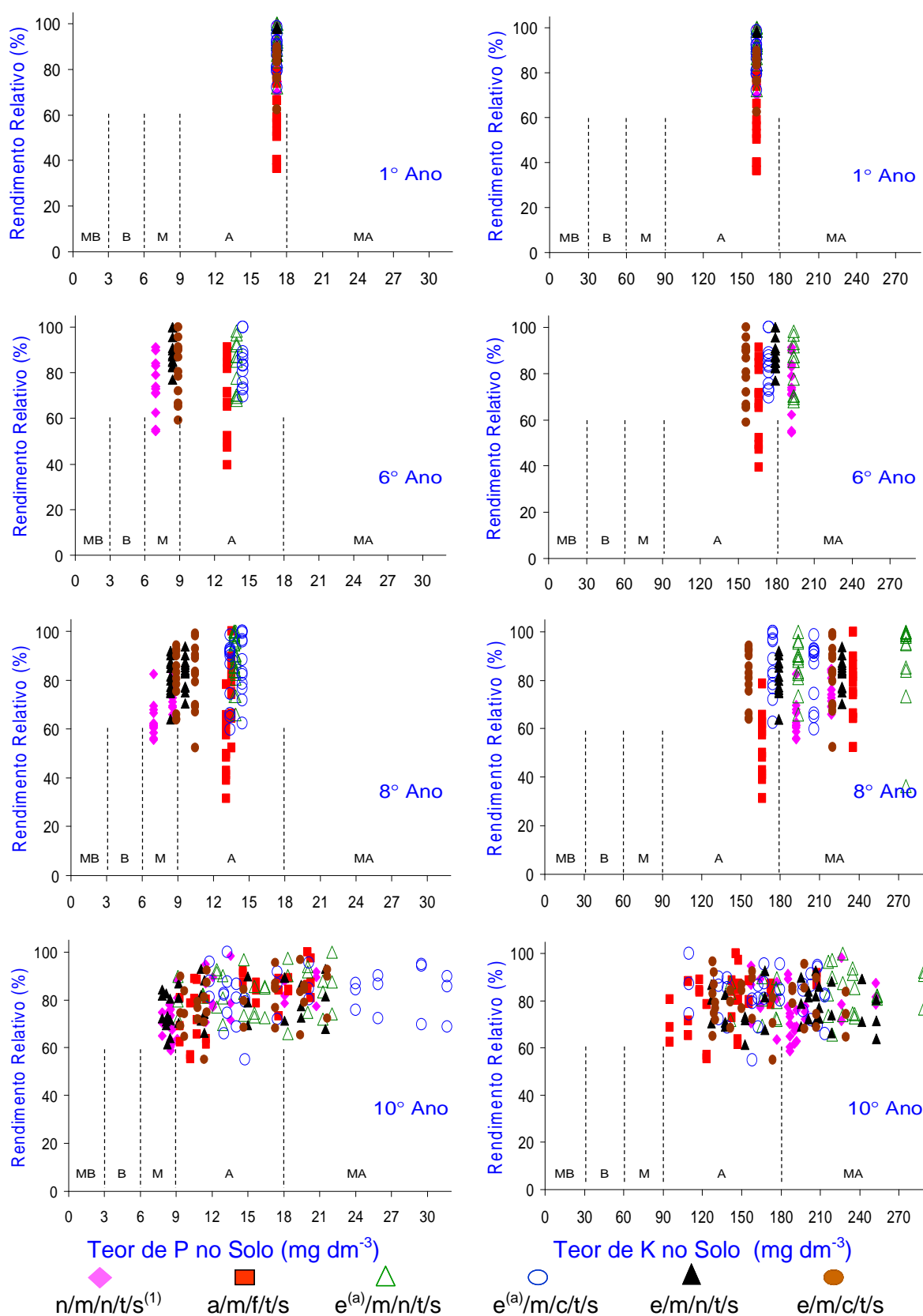
(a) Adubação com fósforo e potássio na sementeira da ervilhaca

Dessa forma, observa-se que, com um mesmo teor de P no solo, a produtividade do milho e da soja pode variar de 70% a 100% do rendimento relativo máximo. Esse mesmo comportamento foi observado na cultura da soja por Nicolodi (2007). O autor atribuiu que a produtividade de soja foi influenciada, provavelmente, por outro fator ou conjunto de fatores, mais que os indicadores utilizados para avaliar a fertilidade do solo. Nicolodi (2007) salienta que isso é um exemplo de que a

aplicação do conceito mineralista de fertilidade, ou seja, a capacidade de um solo fornecer nutrientes em quantidades e proporções adequadas às plantas é insuficiente para expressar a fertilidade percebida pelas plantas no solo cultivado há tempo no SPD.

Os teores de K no solo variaram de 60 a 446 mg dm<sup>-3</sup>. Observa-se que na faixa “Médio” de K no solo apresenta rendimentos relativos que variaram de 80% a 93%, e de 76% a 89% do rendimento relativo máximo, respectivamente, nas culturas do milho e da soja. A faixa “Alto” de K no solo é considerada adequada para o desenvolvimento e produção das plantas. No entanto, observa-se que os rendimentos relativos variaram de 65% a 100%, e de 70% a 96% do rendimento relativo máximo, respectivamente, nas culturas do milho e da soja. Esse comportamento, segundo Nicolodi (2007), pode estar associado às interferências de outros fatores nas relações entre o rendimento relativo e o teor dos nutrientes determinados quimicamente nas amostras de solo. Isso pode estar associado à influência das diferentes sucessões de culturas manejados sob SPD, objeto desse estudo.

Analisando a relação entre o teor de P e K e o rendimento relativo de grãos de milho, trigo e soja, avaliados no 1<sup>o</sup>, 6<sup>o</sup>, 8<sup>o</sup> e 10<sup>o</sup> anos após sua instalação (Figura 4.4), observa-se que as sucessões de culturas apresentam diferentes comportamentos na expressão do rendimento para um mesmo teor do nutriente do solo. Aliado a isso, as sucessões de culturas modificam de maneira diferenciada os teores de P e K no solo ao longo do período do estudo. Isso induz a acreditar que as sucessões de culturas podem estar alterando a dinâmica de nutrientes no solo e a resposta das culturas. Segundo Nicolodi (2007), em experimentos conduzidos há mais de 20 anos em Eldorado do Sul, é possível observar um aumento no “ruído” na avaliação da fertilidade em solos cultivados com inúmeras combinações de sucessões de culturas. Os resultados desses indicam que as diferenças no rendimento de grãos do milho são devidas mais ao histórico do cultivo, ou seja, sistemas de cultivo, sucessões de culturas, adubação e à interação desses do que aos indicadores das condições químicas de solo. As relações entre os indicadores tradicionais da fertilidade e o rendimento de grãos, considerados imprescindíveis no sistema convencional, podem não ser adequados para uso de forma isolada na avaliação da fertilidade do solo no SPD.



**Figura 4.4 - Relação entre o teor de P e K (0-10 cm) e o rendimento relativo de grãos de milho, trigo e soja cultivados em diferentes sucessões de culturas no 1º, 6º, 8º e 10º anos.**

(1) n – nabo forrageiro; a – aveia; e – ervilhaca; f – feijão; c – crotalária; m – milho; t – trigo; s – soja

(a) Adubação com fósforo e potássio na sementeira da ervilhaca



#### 4.4 Conclusões

- Houve resposta somente a doses de N e P na cultura do milho e de N na cultura do trigo. As doses de máxima eficiência técnica (MET) e econômica (MEE) na cultura do milho foram de 87 e 55 kg ha<sup>-1</sup> de N, e 79 e 13 kg ha<sup>-1</sup> de P<sub>2</sub>O<sub>5</sub>, respectivamente.
- A resposta a doses de N no trigo foi significativa somente na sucessão com predomínio de gramínea (a/m/f/t/s).
- As sucessões de culturas apresentaram diferentes comportamentos na expressão do rendimento para um mesmo teor do nutriente do solo.

## **5 - ACÚMULO DE CARBONO AFETADO POR DIFERENTES SUCESSÕES DE CULTURAS NO SISTEMA PLANTIO DIRETO**

### **5.1 Introdução**

A prática de uma agricultura sustentável deverá modificar as condições em que as plantas passarão a ser cultivadas. Os sistemas de manejo de solo, visando à conservação e à recuperação do solo e à expressão do potencial produtivo, devem promover, segundo Mielniczuk (1998) o mínimo revolvimento do solo, além de proporcionar elevada cobertura do solo durante o ano, por plantas ou seus resíduos, com aporte contínuo e abundante de resíduos vegetais para contrabalançar a rápida decomposição da MOS e dos resíduos vegetais. A base dessa nova agricultura tem sido o SPD empregado pela maioria dos agricultores da Região Sul do Brasil.

Nas últimas décadas, a pesquisa em manejo do solo procurou entender como práticas adequadas, por exemplo o SPD, afetam os aspectos quantitativos e qualitativos da MOS e sua relação com as propriedades emergentes que definem a qualidade do solo e a sustentabilidade do sistema de produção agrícola (Diekow, 2003)

O conteúdo de MOS é resultante do balanço entre as adições e perdas de carbono do sistema. A adição de carbono se dá através da fotossíntese pelas plantas, com a formação da biomassa vegetal (parte aérea e raízes). As perdas de carbono do sistema ocorrem pelos processos de decomposição microbiana da MO do solo, lixiviação de compostos orgânicos e erosão (Debarba, 2002; Mielniczuk et al., 2003). Quando as adições de C superam as perdas, ocorre o aumento da MOS. Em sistemas agrícolas, o aumento da MOS pode ser obtido através da utilização de culturas com alta produção de resíduos vegetais, combinado com métodos de preparo com mínimo revolvimento do solo (SPD). O potencial de acúmulo de CO no solo provavelmente irá diferir entre os solos, dependendo das taxas de aporte de C, via fitomassa, e da presença de mecanismos de proteção da fração orgânica à decomposição. De maneira geral, a avaliação do efeito de sistemas de manejo conservacionistas tem demonstrado que o processo de acúmulo de MO no solo é

lento, necessitando de médio a longo prazo para que diferenças expressivas sejam observadas (Debarba, 2002).

No SPD, as sucessões de culturas podem contribuir para potencializar o aumento do estoque de C orgânico no solo. Diekow (2003) observou na camada 0 a 17,5 cm de um Argissolo do RS, o estoque de 45,4 Mg ha<sup>-1</sup> de C na sucessão guandu/milho sem N, em comparação a 29,2 Mg ha<sup>-1</sup> de C para a sucessão aveia/milho, ambos cultivados no SPD durante 18 anos, e cujo estoque inicial era de 32,5 Mg ha<sup>-1</sup>.

A introdução de leguminosas em sucessões de culturas incrementa os estoques de C orgânico e N total do solo (Bayer, 1996; Burle et al., 1997; Amado et al., 2007), assim como também melhora a qualidade do solo. A maior contribuição das leguminosas nas sucessões de culturas está no fato delas aumentarem o aporte de N ao solo, pelo processo de fixação simbiótica do N<sub>2</sub> atmosférico. Esse incremento de N ao solo, via planta, aumenta a disponibilidade desse nutriente para as espécies não-leguminosas, o que resulta em maior produção de grãos e de biomassa dessas culturas e, conseqüentemente, maiores adições de C orgânico ao solo (Mielniczuk et al., 2003). Num estudo conduzido por Lovato (2001), a sucessão de culturas ervilhaca/milho apresentou um estoque de C 7,5% maior em relação à sucessão aveia/milho, ambos sem N, na camada de 0-17,5 cm.

As pesquisas sobre a dinâmica da MOS em sistemas agrícolas têm demonstrado que a mesma é composta por várias frações ou compartimentos, com diferenças na composição, estabilidade e tempo de permanência no solo.

Mielniczuk (1999) apresentou uma divisão da MOS em quatro compartimentos principais, descritos a seguir:

- a) Compartimento 1: biomassa vegetal viva – parte aérea de vegetais em desenvolvimento. É dependente das sucessões de culturas, da fertilidade e acidez do solo, da disponibilidade de água, da temperatura e da radiação solar.
- b) Compartimento 2: resíduos vegetais, raízes e exsudatos - relacionado diretamente ao compartimento anterior, ao tipo de resíduo (relação C/N), ao grau de trituração e à incorporação dos resíduos.
- c) Compartimento 3: MO não protegida: dentro desse compartimento está a biomassa microbiana e a fração lábil, também chamada de particulada ou grosseira (Bayer et al., 2001; Conceição et al., 2005). A fração particulada possui tamanho de partículas maiores que 0,05 mm (50 µm), sendo uma das principais

fontes de nutrientes às plantas.

- d) Compartimento 4: MO protegida - nesse compartimento as partículas possuem tamanho inferior a 0,05 mm, sendo responsáveis pela agregação permanente e CTC do solo. Esse compartimento é referido como a fração da MO do solo associada aos minerais (Bayer et al., 2001; Conceição et al., 2005).

Tão importante quanto conhecer a influência da sucessão de culturas sobre o estoque total de MOS, é também conhecer a influência desses sobre o estoque e a qualidade da MO nas frações físicas do solo. Diferentes frações físicas, como MO particulada (MOP) e associada aos minerais, possuem diferentes aspectos funcionais e composicionais, nem sempre percebidos numa avaliação do solo integral (Diekow, 2003).

O SPD permite o aumento de todas frações da MOS, devido à adição contínua de fitomassa e à proteção da MO dentro dos agregados, associado ao não revolvimento do solo (Conceição et al., 2005). A adição de fitomassa depende basicamente da sucessão de culturas adotado.

A fração leve ou particulada da MOS é mais sensível às práticas de manejo de solo, alterando-se conforme ocorrem variações no aporte de material vegetal ao solo e variações nas taxas de decomposição promovidas por práticas de preparo do solo (Bayer et al., 2004). Por ser lábil, a fração particulada ( $>53 \mu\text{m}$ ) é mais sujeita a mudanças, podendo ser utilizada como indicador da qualidade do solo para avaliar conseqüências do preparo do solo e das culturas (Conceição et al., 2005). Esses autores verificaram, em solo Argissolo Vermelho distrófico, que a fração particulada da MO, expressa pelo C orgânico  $>53 \mu\text{m}$  (COP), foi mais sensível em discriminar as sucessões de culturas do que o C orgânico total (COT) e o carbono orgânico ligado aos minerais ( $<53 \mu\text{m}$ , COAM). Entretanto, o COAM é responsável pela maior parte do COT do solo (Bayer et al., 2001). Resultados de pesquisas realizadas em solos da Região Sul do Brasil (Bayer, 1996; Pillon, 2000) mostraram que a maior proporção da MOS (cerca de 80%) encontrava-se nas frações associadas a minerais ( $< 53 \mu\text{m}$ ).

As alterações nos estoques de MO, associadas com minerais promovidas pelo manejo do solo, são percebidas geralmente a longo prazo (Sá et al., 2001; Bayer et al., 2002), em comparação às alterações relativamente rápidas nos estoques de MOP. O estoque de MOP depende da adição de resíduos da sucessão

de culturas (Pillon, 2000; Bayer et al., 2001) e da magnitude da proteção física exercida pelos agregados (Christensen, 1996; Sollins et al., 1996; Baldock & Skjemstad, 2000). Devido a MOP ser uma fração lábil e com maior taxa de reciclagem dos constituintes orgânicos, as alterações em seus estoques, promovidas pelo manejo do solo, são percebidas geralmente a curto prazo, em comparação às alterações mais lentas que ocorrem no solo como um todo (Balesdent, 1996; Feller & Beare, 1997; Bayer et al., 2002). Por isso a MOP é tida como uma fração relativamente sensível às práticas de manejo (Janzen et al., 1992; Pillon, 2000; Bayer et al., 2002; Conceição et al., 2005).

O estoque de MO na fração associada com minerais depende da quantidade de material orgânico que é transferido da MOP e da magnitude da proteção coloidal exercida pelas superfícies minerais (Christensen, 1996; Sollins et al., 1996; Baldock & Skjemstad, 2000). A quantidade de MO transferida da fração particulada para a fração associada com minerais depende obviamente da adição inicial de resíduos feita pela sucessão de culturas. Além disso, quanto maior o tempo de residência da MOP dentro dos macroagregados, como ocorre no SPD, maior é a probabilidade de incorporação desses constituintes orgânicos às estruturas de microagregados e a partir desses à fração associada com minerais complexos organo-minerais (Jastrow, 1996; Puget et al., 2000).

O manejo adequado do solo propicia a manutenção ou o incremento dos estoques de MOS por meio de sucessões de culturas que maximizem a adição de resíduos. É positivo o fato de que aproximadamente 21 milhões de hectares no Brasil já estejam sendo cultivados sob o SPD. Entretanto, o desafio atual é estabelecer sucessões de culturas que garantam tanto a cobertura do solo como o aporte necessário de resíduos para proporcionar o controle da erosão e o aumento dos estoques de MOS.

Nesse sentido, o objetivo desse trabalho foi ampliar o conhecimento referente às influências da sucessão de culturas sobre o estoque e a qualidade da MO no SPD, em Cruz Alta, RS.

## 5.2 Material e Métodos

### 5.2.1 Descrição da área experimental

Nesse estudo foi utilizado o mesmo experimento descrito no Capítulo 1, constituído por diferentes combinações de plantas de cobertura de inverno, de verão e/ou culturas de safrinha intercaladas com as principais culturas produtoras de grãos da região, denominadas de sucessões de culturas.

### 5.2.2 Avaliações

#### 5.2.2.1 Produtividade de massa seca e cálculo da adição de carbono nas sucessões de culturas

A avaliação da produtividade de massa seca das sucessões de cultura foi realizada seguindo metodologia descrita no Capítulo 1. A partir desses resultados foi calculado o carbono considerando-se em 40% a concentração de C nos tecidos.

A partir das estimativas das adições de carbono por cultura, e em cada cultivo, foram calculados os valores para cada sucessão de cultura por ciclo de rotação, o acumulado por cultura (4 cultivos) e o total no período de 8 anos (1997-2005).

#### 5.2.2.2 Fracionamento da matéria orgânica do solo

Para o fracionamento da MO foi coletado solo em abril de 2005 (8º ano), nas camadas de 0-5; 5-10; 10-20 e 20-30 cm. Determinou-se a densidade do solo através do método do anel volumétrico.

O fracionamento da MO para separação da fração particulada daquela associada aos minerais foi efetuado mediante separação física (Roscoe & Machado, 2002; Conceição, 2002). O solo foi seco ao ar, peneirado a 2 mm e armazenado. Em frascos snap-cap foram pesados 20 g do solo e adicionado 60 mL de

hexametáfosfato de sódio ( $5 \text{ g L}^{-1}$ ) e, colocados para agitar por 15 h em agitador horizontal (Cambardella & Elliotti, 1992). Posteriormente, o material foi passado em peneira de  $53 \mu\text{m}$  ( $0,053 \text{ mm}$ ), com o auxílio de jato fraco de água, para separar a fração areia mais material orgânico das frações silte e argila. O material retido na peneira é considerado a fração particulada (grosseira) e o material que passa constitui a fração associada aos minerais. Para coletar a fração menor que  $53 \mu\text{m}$  foi utilizado um balde plástico. O líquido do balde foi quantificado com o auxílio de proveta de um litro. Após a quantificação da amostra, essa foi homogeneizada e retirada uma alíquota de 100 mL. O material retido, e que passou na peneira, foi transferido para recipientes plásticos e seco a  $90 \text{ }^\circ\text{C}$ , nos primeiros dias, e a  $50 \text{ }^\circ\text{C}$  após a diminuição do conteúdo de água. No material que passou pela peneira, foi adicionado 0,5 mL de  $\text{CaCl}_2$  ( $110 \text{ g L}^{-1}$ ) nos 100 mL, para flocular a argila e facilitar a evaporação da água. Todos os potes onde as amostras foram armazenadas para secagem, foram previamente pesados para quantificar o material seco. Após secas e quantificadas, as amostras maiores que  $53 \mu\text{m}$  foram moídas em gral e as menores que esse diâmetro, no próprio pote plástico.

### 5.2.2.3 Análise de carbono orgânico e cálculo dos estoques no solo

Após moídas, as amostras fracionadas foram analisadas com relação ao teor de C orgânico pela metodologia de Mebius modificado no bloco de digestão (Yeomans & Bremner, 1988; Nelson & Sommers, 1996), obtendo-se o carbono orgânico particulado (COP), na fração  $> 53 \mu\text{m}$ , e o carbono orgânico associado aos minerais (COAM), na fração  $< 53 \mu\text{m}$ .

Calcularam-se os estoques de C orgânico do solo em função da camada e da massa equivalente de solo (Ellert & Bettany, 1995; De Bona, 2005). Segundo a metodologia da camada equivalente de solo, os estoques de C orgânico e N total do solo foram calculados levando-se em consideração as densidades do solo determinadas para cada sucessão de cultura (Tabela 5.1), teores de carbono no solo e espessura de cada camada amostrada, utilizando-se a seguinte equação:

$$\text{Estoque}_{\text{ce}} = \text{cc} \times \text{ds} \times \text{E} \times \text{A} \times \text{f}_{\text{kg}}$$

onde:

$\text{Estoque}_{ce}$  = massa de C por unidade de área em camada equivalente ( $\text{Mg ha}^{-1}$ );  
 $cc$  = concentração de C ( $\text{g kg}^{-1}$  de solo);  
 $ds$  = densidade do solo na camada ( $\text{Mg m}^{-3}$ );  
 $E$  = espessura de solo da camada (m);  
 $A$  = unidade de área, neste caso, 1 ha ( $10000 \text{ m}^2$ );  
 $f_{kg}$  = fator de conversão de kg para Mg ( $0,001 \text{ Mg ha}^{-1}$ ).

Assim como na camada equivalente, no método da massa equivalente considera-se a massa relativa de solo nos diferentes tratamentos:

$$M_{\text{solo}} = ds \times E \times A$$

onde:

$M_{\text{solo}}$  = massa do solo por unidade de área ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ).

Nesse cálculo foi utilizada a massa do solo, considerando-se a densidade do solo da sucessão aveia/feijão como tratamento referência, que resultou num valor positivo ou negativo, conforme a relação dos tratamentos, de acordo com a seguinte equação:

$$E_{\text{ad/sub}} = (M_{\text{ref.}} - M_{\text{trat.}}) \times f_{ha} / ds_{\text{trat.}}$$

onde:

$E_{\text{ad/sub}}$  = espessura de solo da camada a ser adicionada (+) ou subtraída (-) (m);  
 $M_{\text{ref.}}$  = massa equivalente de solo do tratamento referência ( $\text{Mg ha}^{-1}$ );  
 $M_{\text{trat.}}$  = massa equivalente de solo do tratamento ( $\text{Mg ha}^{-1}$ );  
 $f_{ha}$  = fator de conversão de ha para  $\text{m}^2$  ( $0,0001 \text{ ha m}^2$ ).

As massas de C ou N em massa equivalente é obtida pela equação:

$$\text{Estoque}_{me} = cc \times ds \times (E \pm E_{\text{ad/sub}}) \times A \times f_{kg}$$

onde:

$\text{Estoque}_{me}$  = massa de C por unidade de área em massa equivalente ( $\text{Mg ha}^{-1}$ ).

**Tabela 5.1 - Densidade do solo em diferentes sucessões de culturas.**

Sucessões de Culturas	Profundidade de Camadas de Solo (cm)					
	0 – 5	5 – 10	10 – 20	20 – 30	0 – 20	0 – 30
	g cm <sup>-3</sup>					
T1. n/m/n/t/s	1,03	1,30	1,32	1,29	1,25	1,26
T2. a/m/f/t/s	1,04	1,32	1,32	1,30	1,25	1,26
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	1,14	1,33	1,34	1,29	1,29	1,29
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	1,02	1,29	1,33	1,29	1,24	1,26
T5. e/m/n/t/s	1,04	1,29	1,40	1,32	1,28	1,30
T6. e/m/c/t/s	1,06	1,30	1,35	1,33	1,26	1,29

<sup>(1)</sup> n – nabo forrageiro; a – aveia; e – ervilhaca; f – feijão; c – crotalária; m – milho; t – trigo; s – soja

<sup>(a)</sup> Adubação com fósforo e potássio na sementeira da ervilhaca



Foram utilizados os estoques de COT de uma área sob pastagem natural (campo nativo) amostrada por Jantalia (2005), localizada a uma distância de aproximadamente 3 km da área experimental, como representante das condições iniciais antes da introdução da agricultura. Essa área era utilizada como área de descanso e pastejo para cavalos, com predomínio de espécies gramíneas de crescimento rasteiro como a grama forquilha (*Paspalum notatum*). O autor determinou que o solo da área experimental e o da área sob campo nativo pertencem à mesma classe textural, através do conteúdo de areia. Os dados da densidade do solo e da concentração e estoque de C da área sob campo nativo encontram-se na Tabela 5.2.

**Tabela 5.2 - Densidade do solo, concentração e estoque de C da área de campo nativo (Jantalia, 2005).**

Camada	Densidade do solo	Concentração de C	Estoque de C
Cm	Mg m <sup>-3</sup>	g kg <sup>-3</sup>	Mg ha <sup>-1</sup>
0-5	1,29	26,87	17,33
5-10	1,26	22,13	13,94
10-15	1,24	20,50	12,71
15-20	1,23	20,13	12,38
20-30	1,22	18,70	22,81
0-20	-	-	56,36
0-30	-	-	79,18

### 5.2.3 Análise estatística

Na análise de variância dos resultados, quando os valores de F (Tratamento) foram significativos ao nível de 5 % de probabilidade, submeteu-se ao Teste de Duncan ( $p < 0,05$ ), usando o pacote estatístico SAS (SAS, 1989). Foi avaliada a interação entre as sucessões de culturas e os ciclos de rotação. Os parâmetros da análise estatística da adição de carbono pelas culturas e dos estoques de carbono orgânico do solo são apresentados nos APÊNDICES F e G, respectivamente.

### 5.3 Resultados e Discussão

A adição de carbono em diferentes sucessões de culturas, acumulado por cultura (4 cultivos) e o total no período de 8 anos é apresentado na Tabela 5.3. A adição de carbono e a relação C/N das plantas de cobertura de inverno, milho, plantas de cobertura de verão ou feijão, trigo e soja, em cada ciclo de rotação e a média dos cultivos, encontram-se nos APÊNDICE H e I, respectivamente.

**Tabela 5.3 - Adição de carbono em diferentes sucessões de culturas, acumulado por cultura (4 cultivos) e no período de 8 anos.**

Sucessões de Culturas	Cobertura Inverno	Milho	Cobertura Verão	Trigo	Soja	Total no Período
----- kg ha <sup>-1</sup> -----						
T1. n/m/n/t/s <sup>(1)</sup>	6101d <sup>(2)</sup>	11420 b	5196 c	4814 b	5334 ns	32865 d
T2. a/m/f/t/s	9836 a	9006 c	1454 d	3989 c	5465	29750 e
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	7129 bcd	13093 a	10078 a	6120 a	5779	42199 ab
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	7889 b	13226 a	11207 a	5649 a	5814	43785 a
T5. e/m/n/t/s	7406 bc	13287 a	7981 b	5633 a	5844	40151 c
T6. e/m/c/t/s	6364 cd	12588 a	10766 a	5152 b	5651	40521 bc
Média (kg ha <sup>-1</sup> )	7454	12103	7780	5226	5648	38212
Média (%)	19,5	31,7	20,4	13,7	14,8	100,0

<sup>(1)</sup> n – nabo forrageiro; a – aveia; e – ervilhaca; f – feijão; c – crotalária; m – milho; t – trigo; s – soja

<sup>(a)</sup> Adubação com fósforo e potássio na sementeira da ervilhaca

<sup>(2)</sup> Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Duncan (P<0,05)

ns - significativo ao nível de 5 % de probabilidade

A aveia preta, como planta de cobertura de inverno, apresentou a maior adição de C estatisticamente superior às demais espécies. Isso demonstra a contribuição que a espécie possui no período de inverno em adicionar C nas sucessões de culturas, sendo recomendável inseri-la em consórcios com espécies de outras famílias. Numa situação intermediária encontra-se a ervilhaca, e a menor contribuição na adição de C está associada ao nabo forrageiro, no período de inverno que antecede a cultura do milho.

A cultura do milho, cultivado sob ervilhaca, mostrou-se superior estatisticamente na adição de C. O milho sob nabo forrageiro mostrou-se numa situação intermediária, e a menor contribuição na adição de C é observada no milho sob aveia preta. A contribuição da cultura do milho na adição de C deve estar

associado ao fornecimento de N, via FBN, quando da utilização de ervilhaca no período de inverno, a qual promoveu um desenvolvimento e produção de massa seca superior em relação às demais espécies.

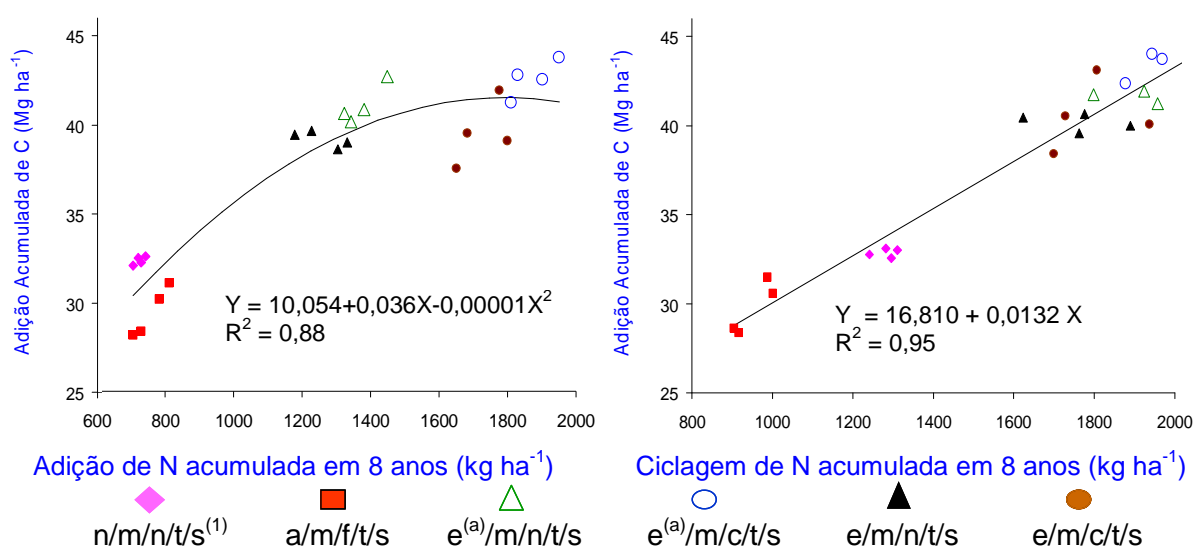
Com relação às opções de espécies entre milho e trigo, o destaque é para a crotalaria (T4 e T6), sendo que o nabo forrageiro na sucessão e<sup>(a)</sup>/m/n/t/s (T3) foi semelhante estatisticamente. A menor contribuição é observada quando se utiliza feijão entre o milho e o trigo, demonstrando ser uma sucessão pouco eficiente pela baixa produção de fitomassa e acúmulo de C. Na sucessão n/m/n/t/s (T1), mostrou-se de média a baixa contribuição na adição de C. Esse comportamento está associado à redução do potencial de produtividade de massa seca observado com o nabo forrageiro devido à utilização simultânea do nabo forrageiro como planta de cobertura de inverno, antecessora ao milho, e de verão ou entressafra, entre milho e trigo, e de forma contínua ao longo do período de estudo (Figura 2.1).

A cultura do trigo teve uma maior adição de C nas sucessões que receberam adubação com P e K (T3 e T4) e na sucessão e/m/n/t/s (T5). Numa situação intermediária, encontram-se as sucessões e/m/c/t/s (T6) e n/m/n/t/s (T1). A menor contribuição na adição de C na cultura do trigo está associada à sucessão a/m/f/t/s. A adição de C pela cultura da soja não foi influenciada pelas sucessões de culturas.

Analisando a contribuição de cada cultura na adição C, observa-se que o milho apresenta 31,7% da adição acumulada no período de estudo, demonstrando ser uma cultura indispensável para o aumento dos estoques de carbono nos sistemas agrícolas. Numa situação intermediária, mas importante, encontram-se as plantas de cobertura de verão e de inverno. As culturas de soja e de trigo apresentaram uma contribuição de apenas 14,8% e 13,7%, respectivamente da adição acumulada de C no período do estudo, demonstrando que sucessões de culturas, com predominância de trigo e soja, não são sustentáveis para a melhoria dos estoques de C dos sistemas agrícolas.

Na adição de C acumulada no período de 8 anos, as sucessões que receberam adubação com P e K (T3 e T4) mostraram-se superiores, embora a sucessão e/m/c/t/s (T6) não diferisse da e<sup>(a)</sup>/m/n/t/s (T3). Considerando as condições sem adubação com P e K, as sucessões e/m/c/t/s (T6), e/m/n/t/s (T5) e n/m/n/t/s (T1), apresentaram, respectivamente, uma superioridade de 36,2%, 35,0% e 10,5%, na adição de C acumulada, quando comparadas à sucessão a/m/f/t/s (T2). As sucessões que associam a ervilhaca no inverno antecedendo a cultura do milho e

nabo ou *crotalaria juncea* entre o milho e o trigo, apresentaram, na média das sucessões, uma adição de C de 5208 kg ha<sup>-1</sup> comparado a somente 3719 kg ha<sup>-1</sup> da sucessão aveia/feijão. Isso demonstra que a adição de C está diretamente relacionada com a adição e a ciclagem de N pelas sucessões de culturas (Figura 5.1). Num estudo conduzido por Lovato (2001), a contribuição da sucessão ervilhaca/milho incrementou a produção de fitomassa, que foi de 3,4 Mg C ha<sup>-1</sup> na sucessão ervilhaca/milho em comparação aos 2,2 Mg C ha<sup>-1</sup> na sucessão aveia/milho sem N.



**Figura 5.1 - Relação entre adição, ciclagem de N e adição de carbono, acumuladas em diferentes sucessões de culturas, no período de 8 anos.**

<sup>(1)</sup> n – nabo forrageiro; a – aveia; e – ervilhaca; f – feijão; c – crotalária; m – milho; t – trigo; s – soja

<sup>(a)</sup> Adubação com fósforo e potássio na sementeira da ervilhaca

O estoque de carbono orgânico particulado (COP >53 μm), associado aos minerais (COAM, <53 μm) e total (COT) determinados em massa equivalente e camada equivalente de solo em diferentes sucessões de culturas são apresentados na Tabela 5.4. Não houve efeito significativo entre as sucessões de culturas para os estoques de C orgânico do solo. No entanto, analisando os estoques de COT na camada de 0-20 cm, pelo método massa equivalente, observa-se uma superioridade em até 5,51 Mg ha<sup>-1</sup> no período de 8 anos, indicando uma diferença no acúmulo de COT entre as sucessões de até 0,69 Mg ha<sup>-1</sup>. As sucessões e/m/c/t/s (T4 e T6) e e/m/n/t/s (T3 e T5), apresentaram, respectivamente, uma superioridade de 8,1% e 4,3% no estoque de COT, quando comparado à sucessão a/m/f/t/s (T2).

**Tabela 5.4 - Estoque de carbono orgânico particulado (COP, >53 µm), associado aos minerais (COAM, <53 µm) e total (COT) determinados em massa equivalente e camada equivalente de solo em diferentes sucessões de culturas.**

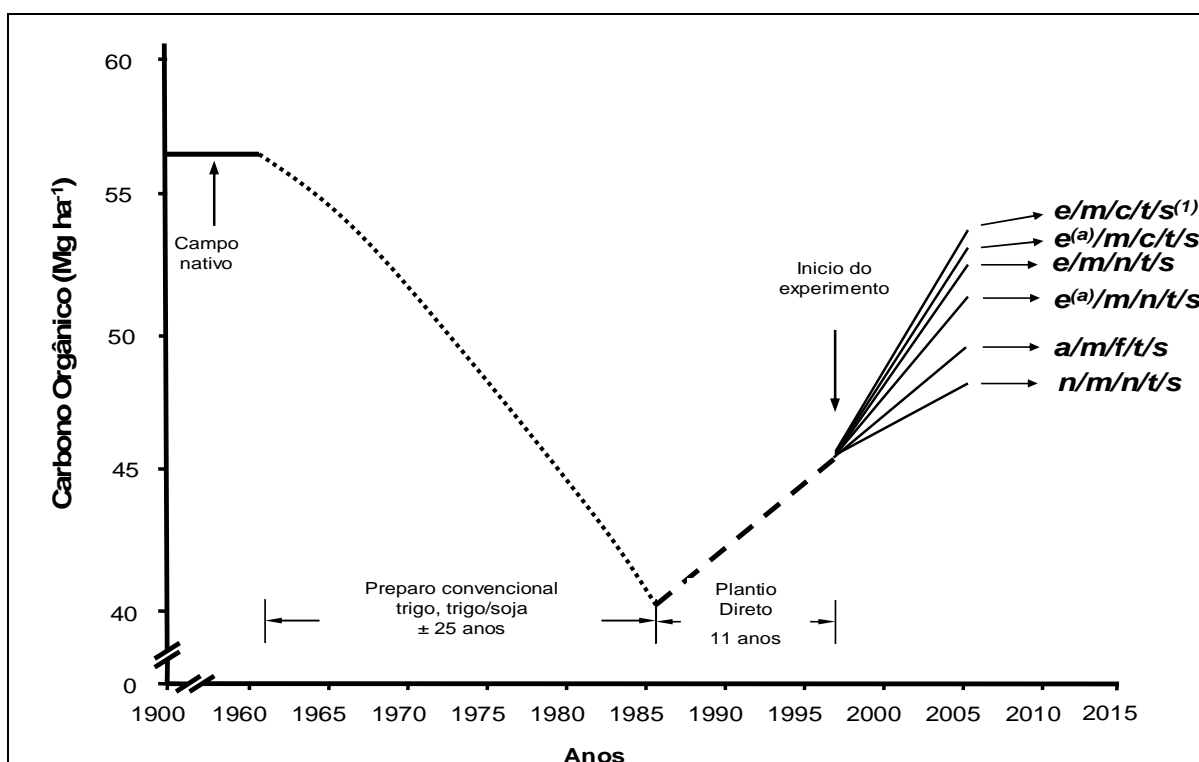
Sucessões de Culturas	Massa Equivalente de Solo			Camada Equivalente de Solo		
	COP	COAM	COT	COP	COAM	COT
----- Mg ha <sup>-1</sup> -----						
----- 0 – 5 cm -----						
T1. n/m/n/t/s <sup>(1)</sup>	2,76 <sup>ns</sup>	11,18 <sup>ns</sup>	13,94 <sup>ns</sup>	2,80 <sup>ns</sup>	11,31 <sup>ns</sup>	14,11 <sup>ns</sup>
T2. a/m/f/t/s	2,50	10,60	13,09	2,50	10,60	13,09
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	3,20	11,34	14,54	3,58	12,64	16,23
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	2,95	11,89	14,84	2,94	11,83	14,77
T5. e/m/n/t/s	3,10	12,34	15,44	3,18	12,62	15,80
T6. e/m/c/t/s	3,64	11,61	15,25	3,78	12,06	15,84
----- 0 – 10 cm -----						
T1. n/m/n/t/s	0,83 <sup>ns</sup>	11,59 <sup>ns</sup>	12,42 <sup>ns</sup>	0,82 <sup>ns</sup>	11,44 <sup>ns</sup>	12,27 <sup>ns</sup>
T2. a/m/f/t/s	0,96	12,09	13,05	0,96	12,09	13,05
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	1,11	12,06	13,17	1,12	12,17	13,29
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	0,92	13,20	14,12	0,93	12,92	13,85
T5. e/m/n/t/s	0,83	12,67	13,50	0,80	12,42	13,22
T6. e/m/c/t/s	1,08	12,83	13,91	1,10	12,68	13,78
----- 10 – 20 cm -----						
T1. n/m/n/t/s	1,09 <sup>ns</sup>	20,60 <sup>ns</sup>	21,69 <sup>ns</sup>	1,07 <sup>ns</sup>	20,63 <sup>ns</sup>	21,70 <sup>ns</sup>
T2. a/m/f/t/s	1,03	22,26	23,28	1,03	22,26	23,28
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	1,16	22,24	23,40	1,18	22,59	23,77
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	1,40	22,93	24,34	1,42	23,13	24,55
T5. e/m/n/t/s	0,79	22,60	23,39	0,84	24,08	24,92
T6. e/m/c/t/s	1,30	23,11	24,40	1,33	23,68	25,01
----- 20 – 30 cm -----						
T1. n/m/n/t/s	0,63 <sup>ns</sup>	20,51 <sup>ns</sup>	21,14 <sup>ns</sup>	0,62 <sup>ns</sup>	20,30 <sup>ns</sup>	20,92 <sup>ns</sup>
T2. a/m/f/t/s	0,68	20,33	21,00	0,68	20,33	21,00
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	0,59	19,64	20,23	0,58	19,40	19,99
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	1,20	20,88	22,08	1,19	20,66	21,84
T5. e/m/n/t/s	0,50	21,66	22,16	0,50	21,92	22,43
T6. e/m/c/t/s	0,96	22,39	23,35	0,98	22,98	23,96
----- 0 – 20 cm -----						
T1. n/m/n/t/s	4,68 <sup>ns</sup>	43,37 <sup>ns</sup>	48,05 <sup>ns</sup>	4,70 <sup>ns</sup>	43,38 <sup>ns</sup>	48,08 <sup>ns</sup>
T2. a/m/f/t/s	4,48	44,95	49,43	4,48	44,95	49,43
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	5,48	45,63	51,11	5,89	47,41	53,29
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	5,27	48,02	53,29	5,29	47,88	53,17
T5. e/m/n/t/s	4,72	47,61	52,33	4,82	49,12	53,94
T6. e/m/c/t/s	6,02	47,55	53,56	6,21	48,42	54,63
----- 0 – 30 cm -----						
T1. n/m/n/t/s	5,31 <sup>ns</sup>	63,88 <sup>ns</sup>	69,20 <sup>ns</sup>	5,32 <sup>ns</sup>	63,69 <sup>ns</sup>	69,00 <sup>ns</sup>
T2. a/m/f/t/s	5,16	65,27	70,43	5,16	65,27	70,43
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	6,07	65,27	71,34	6,47	66,81	73,28
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	6,47	68,89	75,37	6,47	68,54	75,01
T5. e/m/n/t/s	5,22	69,27	74,49	5,32	71,04	76,36
T6. e/m/c/t/s	6,98	69,94	76,92	7,19	71,40	78,59

<sup>(1)</sup> n – nabo forrageiro; a – aveia; e – ervilhaca; f – feijão; c – crotalária; m – milho; t – trigo; s – soja

<sup>(a)</sup> Adubação com fósforo e potássio na sementeira da ervilhaca

ns – não significativo ao nível de 5 % de probabilidade

Num estudo conduzido por Lovato (2001), a sucessão de ervilhaca/milho apresentou um estoque de C 7,5% maior em relação à sucessão aveia/milho, ambos sem N, na camada de 0-17,5 cm. A variação do COT do solo cultivado a partir de campo nativo por cerca de 25 anos em preparo convencional, 11 anos de SPD e após a instalação do experimento com sucessões de culturas, em 0-20 cm, calculado pela massa equivalente é apresentado na Figura 5.2.



**Figura 5.2 - Variação do COT do solo cultivado a partir de campo nativo por cerca de 25 anos em preparo convencional, 11 anos de SPD e após a instalação do experimento com sucessões de culturas, na camada de 0 a 20 cm, calculado pela massa equivalente.**

<sup>(1)</sup> n – nabo forrageiro; a – aveia; e – ervilhaca; f – feijão; c – crotalária; m – milho; t – trigo; s – soja  
<sup>(a)</sup> Adubação com fósforo e potássio na sementeira da ervilhaca

Os estoques de COT do campo nativo, estimados em 56,36 Mg ha<sup>-1</sup>, sofreram uma redução acentuada devido à utilização do preparo convencional por cerca de 25 anos (Figura 5.2). Posteriormente, com a introdução e condução da área por 11 anos sob SPD, o estoque provavelmente aumentou, sendo estimado, na condição inicial da instalação do experimento com sucessões de culturas, em 45,59 Mg ha<sup>-1</sup>.

O incremento dos estoques de COT pelas sucessões de culturas, embora não haja diferença estatística significativa, variaram de 0,31 a 1,00 Mg ha ano<sup>-1</sup>. Essas taxas de seqüestro de C pelas sucessões de culturas do presente trabalho têm sido semelhantes às encontrados na literatura (Amado et al., 2006). As sucessões e/m/c/t/s (T4 e T6) e e/m/n/t/s (T3 e T5), apresentaram, respectivamente, uma taxa de seqüestro de C de 0,98 e 0,77 Mg ha ano<sup>-1</sup>.

#### 5.4 Conclusão

- O incremento dos estoques de COT pelas sucessões de culturas variou de 0,31 a 1,00 Mg ha ano<sup>-1</sup>.
- A contribuição da cultura do milho, plantas de cobertura de verão e de inverno foi de 31,7%, 20,4% e 19,5%, respectivamente, da adição de C acumulada.
- As culturas de soja e trigo apresentaram uma contribuição de apenas 14,8% e 13,7%, respectivamente da adição de C acumulada.
- As sucessões e/m/c/t/s (T4 e T6) e e/m/n/t/s (T3 e T5), apresentaram, respectivamente, uma superioridade de 8,1% e 4,3% no estoque de COT, quando comparado à sucessão a/m/f/t/s (T2), demonstrando relação direta com a adição e a ciclagem de N pelas sucessões de culturas.

## 6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

A adoção de um sistema agrícola economicamente mais sustentável, que possibilite a manutenção do homem nessa atividade e ao mesmo tempo conserve o ambiente, poderá modificar as condições em que as plantas passarão a ser cultivadas. A base dessa nova agricultura tem sido o sistema plantio direto, empregado por 90% dos agricultores do RS. Na prática, esse sistema tem sido economicamente mais rentável do que aquele que revolve o solo. Os resultados iniciais demonstram os aspectos favoráveis desse sistema. No entanto, os agricultores do sistema plantio direto não podem ser automaticamente enquadrados dentro do conceito de sustentabilidade.

Na Região Sul do Brasil, o plantio direto é conduzido basicamente sob monocultura de soja no verão, com um predomínio de gramíneas no inverno. Muitos produtores estão ainda atrelados em demasia à utilização de agroquímicos, o que, além de ferir o aspecto da conservação do ambiente, aumenta os custos e riscos de produção.

Nesse sentido, esse trabalho objetiva ampliar o conhecimento referente ao potencial de sucessões de culturas intensivas em aumentar a ciclagem de nutrientes, em manter ou aumentar os estoques de MOS e aumentar a eficiência do uso de nutrientes existentes em solo agrícola cuja fertilidade já foi melhorada anteriormente pelo histórico de adubações. Esse conhecimento é relevante para garantir a manutenção, a longo prazo, da produtividade de grãos no sistema plantio direto em um cenário de fertilizantes finitos, escassos, com preços elevados e com demanda crescente para reduzir os impactos ambientais da agricultura comercial. Portanto, produzir mais com menos é o grande desafio da agricultura contemporânea nas próximas décadas, e esse projeto insere-se nesse contexto de redesenhar os sistemas produtivos buscando dotá-los de maior eficiência.



## REFERÊNCIAS

AMADO, T.J.C. **Disponibilidade de nitrogênio para o milho em sistemas de cultura e preparo do solo**. Porto Alegre, 1997. 201 f. Tese (Doutorado) – 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. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, p.189-197, 2001.

AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J.; AITA, C. Recomendação de adubação nitrogenada para o milho no RS e SC adaptado 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.; ELTZ, F.L.F. Plantio direto na palha rumo à sustentabilidade agrícola nos trópicos. **Ciência & Ambiente**, v.27, p.49-66, 2003.

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

AMADO, T. J. C. et al. Potential of carbon sequestration in no-till soils with intensive use and cover crops in the southern Brazil. **Journal of Environmental Quality**, Madison, Wisconsin, v. 35, n. 4, p. 1599-1607, 2006.

AMADO, T. J. C. et al. Qualidade do solo avaliada pelo "Soil Quality Kit Test" em dois experimentos de longa duração no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 31, p. 109-121, 2007.

ANGHINONI, I.; SALET, R. L. Amostragem de solo e as recomendações de adubação e calagem no sistema de plantio direto. In: NUERNBERG, N. J. (Ed.). **Plantio direto: conceitos, fundamentos e práticas culturais**. Lages: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1996. p. 27-52.

BALDOCK, J.A.; SKJEMSTAD, J.O. Role of the soil matrix and minerals in protecting natural organic materials against biological attack. **Organic Geochemistry**, v.31, p.697-710, 2000.

BALESDENT, J. The significance of organic separates to carbon dynamics and its modelling in some cultivated soils. **European Journal of Soil Science**, v.47, p.485-493, 1996.

BARROW, N. J.; BOLLAND, M. D. A.; ALLEN, D. G. Effect of previous additions of superphosphate on sorption of phosphate **Australian Journal of Soil Research**, v.36, p.359-372, 1998.

BASSO, C.J.; CERETTA, C.A. Manejo do nitrogênio em sucessão a plantas de cobertura de solo, sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.905-915, 2000.

BAYER, C. **Dinâmica da matéria orgânica em sistemas de manejo de solos**. 1996. 240f. Tese (Doutorado em Agronomia – Ciência do Solo), Porto Alegre, UFRGS, 1996.

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. 1997a.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Nitrogênio total de um solo submetido a diferentes métodos de preparo e sistemas de cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.21, p.235-239. 1997b.

BAYER, C. et al. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v.54, p.101-109, 2000.

BAYER, C. et al. Changes in soil organic matter fractions under subtropical no-till cropping systems. **Soil Science Society of America Journal**, v.65, p.1473-1478, 2001.

BAYER, C. et al. Stocks and humification degree of organic matter fractions as affected by no-tillage on subtropical soil. **Plant and Soil**, v.238, p.133-140, 2002.

BAYER, C. et al. Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.39, p.667-683, 2004.

BIANCHI, M.A. et al. Resposta do trigo a culturas semeadas após o milho no sistema de plantio direto. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 26., 1997. Rio de Janeiro. **Resumos...** Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1997. (CD-ROM).

BORKERT, C.M et al. Nutrientes minerais na biomassa da parte aérea em culturas de cobertura de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.38, p.143-153, 2003.

BROMFIELD, S. M. Sheep faces in relation to the phosphorus cycle under pastures. **Australian Journal of Agricultural Research**, v. 2, p.111-123, 1961.

BROMFIELD, S. M.; JONES, O. L. The effect of sheep on the recycling of phosphorus in hayed-off pastures. **Australian Journal of Agricultural Research**, v.21, p.699-711, 1970.

BROOKES, P.C.; POWLSON, D.S.; JENKINSON, D.S. Phosphorus in the soil microbial biomass. **Soil Biology and Biochemistry**, v.16, p.169-175, 1984.

BRUNETTO, G. et al. Nível crítico e resposta das culturas ao potássio em um Argissolo sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.29, p.565-571, 2005.

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

BURLE, M.L.; MIELNICZUK, J.; FOCCHI, S. Effects of cropping systems on soil chemical characteristics, with emphasis on soil acidification. **Plant and Soil**, v.190, p.309-316, 1997.

CALEGARI, A. **Plantas para adubação verde de inverno no sudoeste do Paraná**. Londrina: Instituto Agrônomo do Paraná, 1990. 37 p. (Boletim Técnico, 35).

CALEGARI, A. **Leguminosas para adubação verde no Paraná**. Londrina: Instituto Agrônomo do Paraná, 1995.118 p. (Circular, 80).

CAMARGO, F.A.O.; SÁ, E.L.S. Nitrogênio e adubos nitrogenados. In: BISSANI, C.A.; GIANELLO, C.; TEDESCO, M.J.; CAMARGO, F.A.O. **Fertilidade dos solos e manejo da adubação de culturas**. Porto Alegre:Gênesis, 2004. p.93-116.

CAMBARDELLA, C.C.; ELLIOTT, E.T. Particulate soil organic-matter changes across a grassland cultivation sequence. **Soil Science Society of American Journal**, v.56, p.777-783, 1992.

CAMPOS, B.C. **Dinâmica do carbono em latossolo vermelho sob sistemas de preparo de solo e de culturas**. 2006. 188f. Tese (Doutorado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

CASTILHOS, R.M.V.; MEURER, E.J. Suprimento de potássio de solos do Rio Grande do Sul para arroz irrigado por alagamento. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.26, p.977-982, 2002.

CHRISTENSEN, B.T. Carbon in primary and secondary organomineral complexes. In: CARTER, M.R.; STEWART, B.A. (Eds.). **Structure and organic matter storage in agricultural soils**. Boca Raton: CRC Lewis, 1996. p.97-165.

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**. 10ª ed. Porto Alegre: SBCS - Núcleo Regional Sul: UFRGS, 2004. 400p.

CONCEIÇÃO, P.C. **Indicadores de qualidade do solo visando a avaliação de sistemas de manejo do solo**. 2002, 125f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2002.

CONCEIÇÃO, P. C. et al. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. . **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 777-788, 2005.

CONTE, E. **Atividade de fosfatase ácida e formas de acumulação de fosfato em solo no sistema plantio direto.** 2001. 65f. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

CUBILLA ANDRADA, M.M. **Calibração visando recomendações de fertilização fosfatada para as principais culturas de grãos sob sistema plantio direto no Paraguai.** 2005. 160f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

DA ROS, C.O. **Plantas de inverno para a cobertura do solo e adubação nitrogenada ao milho em plantio direto.** 1993. 85f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 1993.

DA ROS, C.O. et al. Disponibilidade de nitrogênio e produtividade de milho e trigo com diferentes estratégias de adubação nitrogenada no sistema plantio direto. **Ciência Rural**, v.33, p.799-804, 2003.

DA ROS, C.O. **Dinâmica do carbono e do nitrogênio com o uso de uréia, na sucessão aveia preta/milho, no sistema plantio direto.** 2004. 151f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

DEBARBA, L. **Simulação pelo Modelo Century do impacto da agricultura no estoque de carbono orgânico de solos do planalto rio-grandense.** 2002, 195f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2002.

DE BONA, F. D. **Dinâmica da matéria orgânica do solo em sistemas irrigados por aspersão sob plantio direto e preparo convencional.** 2005, 130f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2005.

DE-POLLI, H.; CHADA, S. de S. Adubação verde incorporada ou em cobertura na produção de milho em solo de baixo potencial de produtividade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.13, p.287-293, 1989.

DERPSCH, R.; SIDIRAS, N.; HEINZMANN, F. Manejo do solo com coberturas verdes de inverno. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.20, p.761-773, 1985.

DERPSCH, R. et al. **Controle da erosão no Paraná, Brasil:** sistemas de cobertura do solo, plantio direto e preparo conservacionista do solo. Eschborn: Deutsche Gesellschaft für Technische Zusammenarbeit, 1991. 272 p. (Sonderpublikation der GTZ, 245).

DERPSCH, R.; CALEGARI, A. **Plantas para adubação verde de inverno.** Londrina: Instituto Agrônomo do Paraná, 1992. 80 p. (Circular, 73).

DIEKOW, J. **Estoque e qualidade da matéria orgânica do solo em função de sistemas de culturas e adubação nitrogenada no sistema plantio direto**. Porto Alegre, 2003. 182f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.

ELLERT, B.H.; BETTANY, J.R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soils under contrasting management regimes. **Canadian Journal of Soil Science**, v.75, p.529-538, 1995.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). **Sistema Brasileiro de Classificação de Solo**—Brasília: EMBRAPA Produção de Informação; Rio de Janeiro: EMBRAPA SOLOS, 1999. XXVI, 412 p.

FELLER, C.; BEARE, M.H. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. **Geoderma**, v.79, p.69-116, 1997.

FIORIN, J.E. et al. Resposta do trigo à adubação verde de verão e uso de nitrogênio no sistema plantio direto. In: FERTIBIO98, Caxambu, 1998. **Resumos...** Lavras, UFLA/SBCS/SBM, 1998. p.329.

FIORIN, J.E. **A rotação de culturas e as plantas de cobertura de solo**. Informativo Fundacep. Ano VI, Nº 02, Abril/1999. 8p.

FIORIN, J.E. Rotação de culturas e as plantas de cobertura de solo. In: Fiorin, J.E (Coord.). **Manejo e fertilidade do solo no sistema plantio direto**. Passo Fundo: Berthier, 2007. p.145-184.

FOLONI, J.S.S.; ROSOLEM, C.A. Potassium balance in soybean grown under no-till. In: INTERNATIONAL CROP SCIENCE CONGRESS, 4., Brisbane, 2004. **Proceedings...** Brisbane, ICSS, 2004. Disponível em: <<http://www.cropscience.org.au>>. Acesso em: 20 abr 2007.

GATIBONI, L.C. **Disponibilidade de formas de fósforo do solo às plantas**. 2003. 231f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.

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

GIACOMINI, S. J. et al. Liberação de fósforo e potássio durante a decomposição de resíduos culturais em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.38, p.1097-1104, 2003.

GONÇALVES, C.N.; CERETTA, C.A.; BASSO, C.J. Sucessões de culturas com plantas de cobertura e milho em plantio direto e sua influência sobre o nitrogênio do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.153-159, 2000.

HEINZMANN, F.X. Resíduos culturais de inverno e assimilação de nitrogênio por culturas de verão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.20, p.1021-1030, 1985.

HERNANI, L.C et al. **Adubos verdes de outono/inverno no Mato Grosso do Sul**. Dourados:Embrapa-CPAO, 1995. 93p.

HUE, N. V. Effects of organic acids/anions on P sorption and phytoavailability in soils with different mineralogies. **Soil Science**, v.152, p.463-471, 1991.

IGUE, K. et al. **Adubação orgânica**. Londrina: Instituto Agrônomo do Paraná, 1984. (Informe da Pesquisa, 59).

JANTALIA, C.P. **Estudo de sistemas de uso do solo e rotações de culturas em sistemas agrícolas brasileiros: dinâmica de nitrogênio e carbono no sistema solo - planta - atmosfera**. Rio de Janeiro, 2005. Tese (Doutorado em Fitotecnia) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2005.

JANZEN, H.H. et al. Light fraction organic matter in soils from long-term crop rotations. **Soil Science Society of America Journal**, v.56, p.1799-1806, 1992.

JASTROW, J.D. Soil aggregate formation and the accrual of particulate and mineral-associated organic matter. **Soil Biology and Biochemistry**, v.28, p.665-676, 1996.

JONES, M. B.; WOODMANSEE, R. G. Biogeochemical cycling in annual grassland ecosystems. **Botany Review**, v.45, p.111-144, 1979.

KLEPKER, D.; ANGHINONI, I. Características físicas e químicas do solo afetadas por métodos de preparo e modos de adubação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.19, p.395-401, 1995.

LAL, R. Soil surface management in the tropics for intensive land use and high and sustained production. **Advances in Soil Sciences**, v.5, p.1-109, 1986.

LOVATO, T. **Dinâmica do carbono e nitrogênio do solo afetada por preparos do solo, sistemas de cultura e adubo nitrogenado**. 2001. 133 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

MALAVOLTA, E.; VITTI, G. C.; OLIVEIRA, S. A. **Avaliação do estado nutricional das plantas: princípios e aplicações**. 2. ed. Piracicaba: Potafos, 1997. 319 p.

MARSCHNER, H. Functions of mineral nutrients: macro-nutrients. In: **Mineral nutrition of higher plants**. 2nd ed. San Diego: Academic, 1995. p. 229-312.

MELO, G.W.; MEURER, E.J.; PINTO, L.F.S. Fontes de potássio em solos distroféricos caulíníticos originados de basalto no Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.28, p.597-603, 2004.

MEURER, E.J.; ANGHINONI, I. Disponibilidade de potássio e sua relação com parâmetros de solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.17, p.375-382, 1993.

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

MIELNICZUK, J. Rotação de culturas e níveis críticos de biomassa sobre o solo. In: ENCONTRO LATINO-AMERICANO DE PLANTIO DIRETO NA PEQUENA PROPRIEDADE, 3., Pato Branco, PR, 1998. **Resumos....** Pato Branco, PR, 1998.

MIELNICZUK, J. Manejo do solo no Rio Grande do Sul: Uma síntese histórica. **Revista da Agronomia**, v.12, p.11-22, 1999.

MIELNICZUK, J. et al. Manejo de solo e culturas e sua relação com estoques de carbono e nitrogênio do solo. In: CURI, N.; MARQUES, J.J.; GUILHERME, L.R.G.; LIMA, J.M.; LOPES, A.S.; ALVAREZ V.H. (Eds.). **Tópicos em Ciência do Solo 3**. Viçosa: SBCS, 2003. p.209-241.

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

MORENO, J. A. **Clima do Rio Grande do Sul**. Porto Alegre, Secretaria da Agricultura, Diretoria de Terras e Colonização, Secção de Geografia, 1961. 46p.

MUZILLI, O. et al. Comportamento e possibilidades da cultura do milho em plantio direto no estado do Paraná. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.18, p.41-47, 1983.

NELSON, D.W.; SOMMERS, L.E. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: SPARKS, D.L.; PAGE, A.L.; HELMKE, P.A.; LOEPPERT, R.H. (eds.) **Methods of soil analysis: chemical methods**. Part 3. Madison, American Society of America, 1996. p.961-1010.

NICOLODI, M. **Evolução da noção da fertilidade e sua percepção como uma propriedade emergente do sistema solo**. 2007. 140 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2007.

NICOLOSO, R.S. et al. **Nabo forrageiro: alternativa de ciclagem de nutrientes e escarificação biológica do solo**. Revista Plantio Direto, v.104. p.23-24. 2008.

OLIVEIRA, V.; LUDWICK, A.E.; BEATTY, M.T. Potassium removed from some Southern Brazilian soils by exhaustive cropping and chemical extraction methods. **Soil Science Society of American Proceedings**, v.35, p.763-767, 1971.

OLIVEIRA, F.H.T. et al. Fertilidade do solo no sistema plantio direto. In: ALVAREZ V., V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R.; BARROS, N.F.; MELLO, J.W.V.; COSTA, L.M. (eds.) **Tópicos em ciência do solo**. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2002. v.2. p.393-486.

PAUL, E. A.; CLARK, F. E. Dynamics of residue decomposition and soil organic matter turnover. In: **Soil microbiology and biochemistry**. 2nd ed. San Diego: Academic, 1996. p.158-179.

PAULETTI, V. **Nutrientes: Teores de interpretações**. Campinas, Fundação ABC-Fundação Cargill, 1998. 59p.

PILLON, C.N. **Alteração no conteúdo e qualidade da matéria orgânica do solo induzidas por sistemas de culturas em plantio direto**. 2000. 232f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

PINTHUS, M. J. Lodging in wheat, barley, and oats: the phenomenon, its causes, and preventive measure. **Advances in Agronomy**, v.25, p.209-263, 1973.

PONS, A.L.; NUSS, C.N.; PINTO, R.J.B. Efeito de doses de nitrogênio sobre o rendimento do milho, em cultivo mínimo e convencional após o cultivo da vicia. REUNIÃO TÉCNICA ANUAL DO MILHO, 29, 1984, Porto Alegre. **Ata...** Porto Alegre: Ipagro/Emater-RS, 1984. p.97-98.

PUGET, P.; CHENU, C.; BALESSENT, J. Dynamics of soil organic matter associated with particle-size fractions of water-stable aggregates. **European Journal of Soil Science**, v.51, p.595-605, 2000.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**. v.27, p.29-48. 2003.

RHEINHEIMER, D.S. et al. Modificações em atributos químicos de solo arenoso sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p.713-721, 1998.

RHEINHEIMER, D. S. **Dinâmica do fósforo em sistemas de manejo de solos**. 2000. 210f. Tese (Doutorado em Agronomia) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2000.

RHEINHEIMER, D.S.; ANGHINONI, I.; CONTE, E. Fósforo da biomassa microbiana em solos sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.24, p.589-597, 2000.

RHEINHEIMER, D. S.; ANGHINONI, I. Distribuição do fósforo inorgânico em sistemas de manejo de solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.36, p.151-160, 2001.

ROSCOE, R.; MACHADO, P.L.O.A. **Fracionamento físico do solo em estudos da matéria orgânica**. Dourados, Embrapa Agropecuária Oeste, Embrapa Solos, 2002. 86p.

ROSOLEM, C.A. Adubação potássica em semeadura direta. In: SIMPÓSIO SOBRE FERTILIDADE DO SOLO EM PLANTIO DIRETO, Dourados, 1997. **Resumos e Palestras...** Dourados, 1997. p.1-12.



ROSSATO, R.R. **Potencial de ciclagem de nitrogênio e potássio pelo nabo forrageiro intercalar ao cultivo do milho e trigo sob plantio direto.** 2004. 130 f. Dissertação (Mestrado) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Universidade Federal de Santa Maria, Porto Alegre, 2004.

RUEDELL, J. A Soja numa Agricultura Sustentável. In: FUNDACEP FECOTRIGO. **A Soja em Rotação de Culturas no Plantio Direto.** Cruz Alta, 1998. p.1-31.

SÁ, J. C. M. **Manejo da fertilidade do solo no plantio direto.** Castro: Fundação ABC, 1993. 96 p.

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

SÁ, J.C.M. Reciclagem de nutrientes dos resíduos culturais, e estratégia de fertilização para produção de grãos no sistema plantio direto. In: SIMPÓSIO SOBRE O SISTEMA PLANTIO DIRETO NA UFV, 1., Viçosa, 1998. **Resumos de Palestras.** Viçosa, Universidade Federal de Viçosa, 1998. p.19-61.

SÁ, J.C.M. et al. Soil organic matter dynamics and carbon sequestration rates for a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. **Soil Science Society of America Journal**, v.5, p.1486-1499, 2001.

SÁ, J.C.M. Adubação fosfatada no sistema plantio direto. In: Simpósio sobre Fósforo na Agricultura Brasileira, **Anais...** (ed.) T. Yamada, Silvia, R. S. Abdalla, p.201-222, Piracicaba, SP, POTAFÓS, 2004, 726p.

SANTOS, J.B. **Alterações no Estoque e taxa de seqüestro de carbono em um latossolo vermelho submetido a sistemas de manejo.** 2006. 120 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), Ponta Grossa, 2006.

SAS. Institute Statistical Analysis System. **User's guide.** 4.ed. Cary: SAS Institute, 1989. 846p.

SCHOMBERG, H. H.; STEINER, J. L. Nutrient dynamics of crop residues decomposing on a fallow no-till soil surface. **Soil Science Society of America Journal**, v.63, p.607-613, 1999.

SELLES, F. et al. Distribution of phosphorus fractions in a Brazilian oxisol under different tillage systems. **Soil Tillage Research**, v.44, p.23-34, 1997.

SILVA, D.N. et al. Mineralogia e formas de potássio em dois Latossolos do Estado do Paraná e suas relações com a disponibilidade para as plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.19, p.433-439, 1995.

SINGH, J.S. et al. Microbial biomass acts as a source of plant nutrients in dry tropical forest and savanna. **Nature**, v.338, p.499-500, 1989.

SOLLINS, P.; HOMANN, P.; CALDWELL, B.A. Stabilization and destabilization of soil organic matter: mechanisms and controls. **Geoderma**, v.74, p.65-105, 1996.

SPAIN, J. M.; SALINAS, J. G. A reciclagem de nutrientes nas pastagens tropicais. In: REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO, 16., 1984, Ilhéus. **Anais... Ilhéus: Comissão Executiva do Plano da Lavoura Cacaueira**, 1985. p. 259-299.

STANKA, A. M.; JENKINS, G.; HANSON, P. R. Varietal responses in spring barley to natural and artificial lodging to a growth regulator. **Journal of Agricultural Science**, v.93, p.449-456, 1979.

STEVENSON, F.J. **Humus chemistry: genesis, composition, reactions**. 2.ed. New York, J. Wiley, 1994. 496p.

TEDESCO, M.J. et al. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. 2. ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (Boletim técnico, 5)

WEIBEL, R. D.; PENDLETON, J. W. Effect of artificial lodging on winter grain yield and quality. **Agronomy Journal**, v.56, p.487-488, 1964.

WHITE, R. E.; AYOUB, A. T. Decomposition of plant residues of variable C/P and the effect on phosphate availability. **Plant Soil**, v.74, p.164-173, 1983.

WHITNEY, A. S.; KANEHIRO, Y. Pathways of nitrogen transfer in some tropical legume grass associations. **Agronomy Journal**, v.59, p.585-588, 1967.

WIERSMA, D. W.; OPLINGER, E. S.; GUY, S. O. Environment and cultivar effects on winter wheat response to ethephon plant growth regulator. **Agronomy Journal**, v.78, p.761-764, 1986.

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

WIETHÖLTER, S. Nitrogênio para trigo obtido através do cultivo intercalar de Nabo forrageiro. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, Ribeirão Preto. **Anais... Ribeirão Preto**, 2003, CD-ROM.

WILKINSON, S. R.; LOWREY, R. W. Cycling of mineral nutrients in pasture ecosystems. In: BUTLER, G. W.; BAILEY, R. W. (Ed.). **Chemistry and biochemistry of herbage**. London: Academic, 1973. p.247-325.

WISNIEWSKI, C.; HOLTZ, G. P. Decomposição da palhada e liberação de nitrogênio e fósforo numa rotação aveia-soja sob plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.32, p.1191-1197, 1997.

VARGAS, M.A.T.; HUNGRIA, M. Fixação biológica do nitrogênio na cultura da soja. In: VARGAS, M.A.T.; HUNGRIA, M., ed. **Biologia dos solos dos Cerrados**. Planaltina, EMBRAPA-CPAC, 1997. p.296-360.

VICTÓRIA, R.L.; PICCOLO, M.C.; VARGAS, A.A.T. O ciclo do nitrogênio. In: CARDOSO, E.J.B.N.; TSAI, S.M.; NEVES, M.C.P. **Microbiologia do solo**. Campinas: SBCS, 1992. p.105-119.

YEOMANS, J.C. ; BREMNER, J.M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communication in Soil Science and Plant Analysis**, v.19, p.1467-1476, 1988.

## APÊNDICES

### APÊNDICE A - Precipitação ocorrida durante o período de 1974 a 2007. Dados da Estação Meteorológica da FUNDACEP, Cruz Alta, RS.

Mês/ Ano	JAN	FEV	MAR	ABR	MAI	JUN	JUL	AGO	SET	OUT	NOV	DEZ
	----- mm -----											
1974	93,0	145,0	66,8	42,6	119,3	206,0	51,7	136,1	32,5	55,4	124,6	263,2
1975	181,2	156,2	225,1	85,4	66,0	181,7	50,1	230,6	177,6	134,2	152,6	93,4
1976	242,4	92,1	136,1	67,0	111,7	73,4	90,2	143,1	162,3	71,9	185,3	123,0
1977	160,2	132,7	103,0	68,6	71,0	154,8	208,0	110,7	108,7	103,8	125,5	90,6
1978	58,5	68,6	63,8	21,4	41,1	154,0	262,0	104,5	54,1	72,5	152,9	73,7
1979	25,2	160,7	62,4	230,1	119,3	52,1	134,1	127,1	229,6	364,7	84,0	269,2
1980	63,1	26,2	144,8	84,6	196,0	60,1	121,8	128,3	97,1	237,6	246,3	176,8
1981	116,6	236,0	88,0	63,6	19,8	105,8	25,2	46,1	201,2	43,3	178,0	138,8
1982	22,1	162,6	43,5	36,7	105,5	229,4	160,8	236,1	197,1	196,8	448,4	88,6
1983	148,2	261,5	187,9	386,4	336,5	126,0	392,7	179,0	118,8	174,1	70,4	61,9
1984	399,4	88,0	83,4	187,4	300,0	215,3	177,0	171,2	218,8	183,0	89,7	60,0
1985	27,2	253,6	218,0	188,1	213,8	196,6	148,0	274,5	218,7	44,5	4,9	30,8
1986	116,6	173,7	180,8	249,7	205,5	236,8	29,6	179,2	156,6	171,5	431,7	49,2
1987	294,4	164,4	45,6	385,1	149,5	112,2	296,1	92,3	198,2	183,9	136,6	42,6
1988	166,1	41,7	96,6	169,5	38,0	88,8	32,1	21,9	363,3	151,2	127,4	61,0
1989	197,2	54,1	200,7	103,3	34,5	129,2	113,6	246,0	394,3	131,2	88,0	233,6
1990	162,1	130,0	151,3	279,5	202,0	194,6	71,1	40,3	238,0	228,2	186,8	88,2
1991	61,1	21,4	37,2	116,4	19,4	297,5	90,1	77,3	56,8	74,3	46,1	197,6
1992	175,0	222,0	165,6	127,0	341,7	130,7	128,8	120,1	186,9	186,5	120,4	116,4
1993	202,3	34,8	169,2	80,4	205,8	94,6	211,3	11,3	86,6	127,3	294,2	305,7
1994	69,2	275,3	102,5	262,4	167,0	190,0	266,4	85,4	157,4	261,0	188,8	167,4
1995	170,6	83,9	125,9	31,9	32,4	113,3	131,9	40,5	106,6	163,3	33,5	45,2
1996	320,6	207,3	101,2	125,4	70,1	118,8	98,8	175,3	49,7	196,9	77,1	142,0
1997	201,1	103,4	55,7	66,0	113,5	164,9	66,2	131,9	123,3	510,2	349,3	275,1
1998	226,5	380,7	115,2	300,4	106,0	125,5	123,6	182,0	161,5	153,7	25,3	137,1
1999	73,5	98,0	75,2	155,8	137,0	140,6	213,4	26,8	211,0	179,9	85,1	74,6
2000	115,8	68,1	224,3	103,8	95,6	197,3	90,1	97,8	117,5	257,6	139,9	141,9
2001	284,0	147,3	108,9	152,4	150,3	79,9	93,3	69,8	253,5	139,8	119,6	59,1
2002	129,8	60,1	139,7	172,9	256,0	178,9	268,2	218,3	296,2	417,9	191,5	328,7
2003	169,8	144,5	270,8	151,4	11,3	75,3	167,2	53,0	91,0	261,4	184,7	365,7
2004	119,8	62,8	56,6	112,8	130,7	116,7	98,9	58,5	119,0	138,0	204,5	105,3
2005	127,7	14,4	76,5	231,5	273,9	284,7	104,5	165,9	108,0	367,4	79,5	101,7
2006	118,9	40,1	191,4	122,5	61,2	145,7	143,0	62,3	123,8	107,6	199,2	111,1
2007	152,2	198,2	83,8	140,4								
<b>Média</b>	<b>152,7</b>	<b>132,6</b>	<b>123,5</b>	<b>150,1</b>	<b>136,4</b>	<b>150,6</b>	<b>141,2</b>	<b>122,5</b>	<b>164,1</b>	<b>184,6</b>	<b>156,7</b>	<b>140,0</b>

**APÊNDICE B - Valores de F Tratamento (F Trat.) e coeficiente de variação (CV) da análise de variância realizada por ciclo de rotação e o total no período de 10 anos.**

Variável	F Trat. - Ciclo de Rotação			C.V. %	F Trat.-Total Sucessão	C.V. %
	Ciclo	Sucessão	Interação			
Adição N	221,15 *	355,98 *	13,04 *	8,81	235,19 *	4,85
Absorção N	131,20 *	148,55 *	13,70 *	6,53	72,35 *	4,18
Contrib. N Solo	56,89 *	98,12 *	21,19 *	7,48	55,98 *	4,43
Absorção P	56,79 *	119,55 *	10,85 *	6,40	47,87 *	4,52
Absorção K	119,00 *	108,05 *	15,89 *	8,51	136,84 *	3,38
Exportação N	69,26 *	39,48 *	5,05 *	5,63	29,49 *	2,91
Exportação P	13,47 *	50,65 *	5,92 *	6,68	52,80 *	2,93
Exportação K	61,90 *	26,76 *	5,97 *	5,81	19,23 *	3,07
Ciclagem N	111,71 *	115,56 *	14,20 *	10,55	66,22 *	6,23
Ciclagem P	112,88 *	81,51 *	12,54 *	11,01	37,76*	7,24
Ciclagem K	117,94 *	102,57 *	15,89 *	9,88	140,03 *	3,78
MS Cob. Inverno	74,24 *	16,16 *	8,02 *	18,00	13,70 *	8,74
MS de Milho	64,76 *	37,76 *	3,58 *	9,87	57,33 *	3,58
MS Cob. Verão	146,48 *	118,16 *	39,04 *	18,28	77,00 *	10,13
MS de Trigo	33,15 *	35,63 *	6,53 *	9,08	27,51 *	4,62
MS de Soja	96,20 *	3,83 *	2,87 *	8,32	2,39	4,72
MS Acumulada	77,80 *	88,34 *	17,20 *	6,32	92,00 *	2,77
Grãos de Milho	105,50 *	45,19 *	5,85 *	11,36	54,74 *	4,62
Grãos de Trigo	66,70 *	45,50 *	7,88 *	9,97	50,90 *	4,22
Grãos de Soja	297,14 *	10,22 *	2,69 *	7,07	6,67 *	3,91
Grãos Acumulada	12,46 *	59,99 *	6,05 *	6,79	65,61 *	2,90

\* - significativo ao nível de 5 % de probabilidade

**APÊNDICE C - Produção de grãos de feijão em diferentes sistemas de rotação de culturas, em cada ciclo de rotação e o total em 10 anos.**

Sistemas de Culturas	1º Ciclo 1997-99	2º Ciclo 1999-01	3º Ciclo 2001-03	4º Ciclo 2003-05	5º Ciclo 2005-07	Total
	----- kg ha <sup>-1</sup> -----					
T1. n/m/n/t/s <sup>(1)</sup>						
T2. a/m/f/t/s	538,6	- *	732,5	- *	- *	1271,0
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s						
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s						
T5. e/m/n/t/s						
T6. e/m/c/t/s						

<sup>(1)</sup> n – nabo forrageiro; a – aveia; e – ervilhaca; f – feijão; c – crotalária; m – milho; t – trigo; s – soja

<sup>(a)</sup> Adubação com fósforo e potássio na sementeira da ervilhaca

\* O desenvolvimento e produção de grãos da cultura do feijão preto foi prejudicado, provavelmente, por baixa disponibilidade hídrica ocorrida neste ano agrícola.

**APÊNDICE D - Valores de F Tratamento e coeficiente de variação (CV) da análise da variância da produtividade de grãos nos estudos de doses de N, P e K em milho, trigo e soja.**

Variável	F Tratamento			C.V. %
	Sucessão	Doses	Interação	
Doses de N – Milho	11,48 *	6,09 *	0,76 ns	14,03
Doses de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> – Milho	11,52 *	4,50 *	1,08 ns	8,70
Doses de K <sub>2</sub> O – Milho	6,73 *	1,28 ns	0,57 ns	7,57
Doses de N – Trigo	1,37 ns	7,97 *	1,98 *	12,75
Doses de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> – Trigo	14,35 *	0,69 ns	1,56 ns	11,05
Doses de K <sub>2</sub> O – Trigo	3,31 *	0,77 ns	1,35 ns	15,16
Doses de N – Soja	5,13 *	0,65 ns	0,92 ns	10,65
Doses de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> – Soja	2,20 ns	2,62 ns	1,45 ns	10,39
Doses de K <sub>2</sub> O – Soja	1,45 ns	2,37 ns	1,88 ns	6,15

\* - significativo ao nível de 5 % de probabilidade

ns - significativo ao nível de 5 % de probabilidade

**APÊNDICE E - Produção de massa seca total (parte aérea+raízes) e ciclagem de nutrientes por plantas de cobertura de verão, em resposta a doses de N, P e K aplicadas na cultura do milho em diferentes sucessões de culturas.**

Sucessões de Culturas	Doses de N (kg ha <sup>-1</sup> )					Doses de P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> (Kg ha <sup>-1</sup> )					Doses de K <sub>2</sub> O (kg ha <sup>-1</sup> )			
	0	40	80	120	Media	0	30	60	90	Media	0	40	80	Media
----- Produção de Massa Seca Total (kg ha <sup>-1</sup> ) -----														
T1. n/m/n/t/s <sup>(1)</sup>	1725	2696	1184	1520	1781	620	1847	2638	2937	2010	2420	2233	2920	2524
T2. a/m/f/t/s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	2823	1894	2313	2539	2392	2780	3287	2733	3133	2983	2247	3180	3700	3042
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	2360	2553	2493	2770	2544	936	1600	2347	2120	1751	1520	2020	2700	2080
T5. e/m/n/t/s	2292	2013	2840	2107	2313	1987	2960	2600	2533	2520	3443	3336	3680	3486
T6. e/m/c/t/s	1472	2360	2620	1760	2053	1720	1710	1550	2660	1910	2880	2030	2780	2563
----- Ciclagem de N (kg ha <sup>-1</sup> ) -----														
T1. n/m/n/t/s <sup>(1)</sup>	50,7	66,1	29,0	37,2	45,8	15,2	45,3	64,6	72,0	49,3	59,3	54,7	71,6	61,9
T2. a/m/f/t/s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	83,0	46,4	56,7	62,2	62,1	68,1	80,5	67,0	76,8	73,1	55,1	77,9	90,7	74,5
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	69,3	75,0	73,3	81,4	74,8	27,5	47,0	69,0	62,3	51,4	44,7	59,4	79,3	61,1
T5. e/m/n/t/s	67,3	49,3	69,6	51,6	59,5	48,7	72,5	63,7	62,1	61,8	84,4	81,7	90,2	85,4
T6. e/m/c/t/s	43,3	69,3	77,0	51,7	60,3	50,5	50,2	45,5	78,2	56,1	84,6	59,6	81,7	75,3
----- Ciclagem de P (P <sub>2</sub> O <sub>5</sub> - kg ha <sup>-1</sup> ) -----														
T1. n/m/n/t/s <sup>(1)</sup>	11,6	11,6	5,1	6,5	8,7	2,7	7,9	11,3	12,6	8,6	10,4	9,6	12,5	10,8
T2. a/m/f/t/s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	19,0	8,1	9,9	10,9	12,0	11,9	14,1	11,7	13,5	12,8	9,6	13,7	15,9	13,1
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	15,9	17,2	16,8	18,7	17,1	6,3	10,8	15,8	14,3	11,8	10,2	13,6	18,2	14,0
T5. e/m/n/t/s	15,4	8,6	12,2	9,0	11,3	8,5	12,7	11,2	10,9	10,8	14,8	14,3	15,8	15,0
T6. e/m/c/t/s	9,9	15,9	17,6	11,9	13,8	11,6	11,5	10,4	17,9	12,9	19,4	13,7	18,7	17,3
----- Ciclagem de K (K <sub>2</sub> O - kg ha <sup>-1</sup> ) -----														
T1. n/m/n/t/s <sup>(1)</sup>	41	122	53	69	71	28	83	119	133	91	109	101	132	114
T2. a/m/f/t/s	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	67	86	104	115	93	126	148	123	142	135	101	144	167	137
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	56	61	59	66	61	22	38	56	51	42	36	48	64	50
T5. e/m/n/t/s	55	91	128	95	92	90	134	117	114	114	156	151	166	157
T6. e/m/c/t/s	35	56	62	42	49	41	41	37	63	46	69	48	66	61

<sup>(1)</sup> n – nabo forrageiro; a – aveia; e – ervilhaca; f – feijão; c – crotalária; m – milho; t – trigo; s – soja

<sup>(a)</sup> Adubação com fósforo e potássio na semeadura da ervilhaca

- não avaliado.



**APÊNDICE F - Valores de F Tratamento e coeficiente de variação (CV) da análise da variância da adição de carbono por diferentes culturas, o total em 4 cultivos e na sucessão de cultura.**

Variável	F Trat. - Ciclo de Rotação			C.V. %	F Trat.-Total ( 4 cultivos )	C.V. %
	Ciclo	Sucessão	Interação			
Planta Cob. Inverno	77,78 *	21,21 *	6,94 *	17,93	14,40 *	9,48
Milho	64,76 *	37,76 *	3,58 *	9,87	56,37 *	3,67
Planta Cob. Verão	152,51 *	133,81 *	41,89 *	18,34	54,43 *	13,28
Trigo	33,15 *	35,62 *	6,53 *	9,08	23,41 *	5,97
Soja	96,19 *	3,83 *	2,87 *	8,32	1,93 <sup>ns</sup>	5,29

\* - significativo ao nível de 5 % de probabilidade

ns - significativo ao nível de 5 % de probabilidade

**APÊNDICE G - Valores de F Tratamento e probabilidade de F da análise da variância do estoque de carbono orgânico particulado (COP, >53 µm), associado aos minerais (COAM, <53 µm) e total (COT) determinados em massa equivalente e camada equivalente de solo em diferentes sucessões de culturas.**

Variável Camada	COP (>53 µm)		COAM (<53 µm)		COT	
	F Trat	Prob >F	F Trat	Prob >F	F Trat	Prob >F
----- Massa Equivalente de Solo -----						
0 – 5 cm	0,86 <sup>ns</sup>	0,5318	1,74 <sup>ns</sup>	0,1855	1,43 <sup>ns</sup>	0,2685
5 – 10 cm	0,21 <sup>ns</sup>	0,9536	1,97 <sup>ns</sup>	0,1417	1,80 <sup>ns</sup>	0,1726
10 – 20 cm	0,18 <sup>ns</sup>	0,9658	0,54 <sup>ns</sup>	0,7462	0,96 <sup>ns</sup>	0,4734
20 – 30 cm	0,37 <sup>ns</sup>	0,8642	0,58 <sup>ns</sup>	0,7131	0,90 <sup>ns</sup>	0,5047
0 – 20 cm	0,38 <sup>ns</sup>	0,8524	1,09 <sup>ns</sup>	0,4060	1,58 <sup>ns</sup>	0,2241
0 – 30 cm	0,32 <sup>ns</sup>	0,8911	0,74 <sup>ns</sup>	0,6070	1,21 <sup>ns</sup>	0,3524
----- Camada Equivalente de Solo -----						
0 – 5 cm	1,09 <sup>ns</sup>	0,4060	1,80 <sup>ns</sup>	0,1744	1,73 <sup>ns</sup>	0,1883
5 – 10 cm	0,24 <sup>ns</sup>	0,9365	1,88 <sup>ns</sup>	0,1580	1,51 <sup>ns</sup>	0,2449
10 – 20 cm	0,17 <sup>ns</sup>	0,9683	1,03 <sup>ns</sup>	0,4338	1,77 <sup>ns</sup>	0,1788
20 – 30 cm	0,37 <sup>ns</sup>	0,8603	1,01 <sup>ns</sup>	0,4463	1,47 <sup>ns</sup>	0,2578
0 – 20 cm	0,50 <sup>ns</sup>	0,7725	1,79 <sup>ns</sup>	0,1755	2,44 <sup>ns</sup>	0,0826
0 – 30 cm	0,38 <sup>ns</sup>	0,8562	1,17 <sup>ns</sup>	0,3680	1,79 <sup>ns</sup>	0,1754

ns - significativo ao nível de 5 % de probabilidade

**APÊNDICE H - Adição de carbono por plantas de cobertura de inverno, milho, plantas de cobertura de verão ou feijão, trigo e soja, em diferentes sucessões de culturas, em cada ciclo de rotação e o total em 4 cultivos.**

Sucessões de Culturas	1º Ciclo 1997-99	2º Ciclo 1999-01	3º Ciclo 2001-03	4º Ciclo 2003-05	Total no Período ( 4 cultivos )
----- kg ha <sup>-1</sup> -----					
----- Plantas de Cobertura de Inverno -----					
T1. n/m/n/t/s <sup>(1)</sup>	2086a <sup>(2)</sup>	2669 ab	935 c	411 e	6101 d
T2. a/m/f/t/s	2051 a	3155 a	2209 ab	2421 a	9836 a
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	1726 b	2084 b	1766 b	1552 c	7129bcd
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	1710 b	2130 b	1986 ab	2063 b	7889 b
T5. e/m/n/t/s	1546 c	2277 b	2359 a	1224 d	7406 bc
T6. e/m/c/t/s	1467 c	1789 b	1789 b	1319 d	6364 cd
----- Milho -----					
T1. n/m/n/t/s	2853 a	2475 ab	2660 b	3431 b	11420 b
T2. a/m/f/t/s	2182 b	2221 b	2180 c	2424 c	9006 c
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	3051 a	2518 ab	3013 ab	4510 a	13093 a
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	3051 a	2747 a	3036 a	4392 a	13226 a
T5. e/m/n/t/s	3102 a	2793 a	3150 a	4242 a	13287 a
T6. e/m/c/t/s	3102 a	2572 a	2839 ab	4075 a	12588 a
----- Plantas de Cobertura de Verão ou Feijão -----					
T1. n/m/n/t/s	2614 b	1450 d	712 d	419 bc	5196 c
T2. a/m/f/t/s	259 c	375 e	352 d	469 bc	1454 d
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	3266 ab	2540 bc	1753 b	2519 a	10078 a
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	2921 ab	3129 a	4991 a	165 c	11207 a
T5. e/m/n/t/s	3684 a	2164 c	1270 c	863 b	7981 b
T6. e/m/c/t/s	2744 b	2937 ab	4970 a	115 c	10766 a
----- Trigo -----					
T1. n/m/n/t/s	1488 b	1273 bc	1107 ns	946 bc	4814 b
T2. a/m/f/t/s	941 c	1061 c	1065	922 c	3989 c
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	1770 a	1537 a	1197	1618 a	6120 a
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	1653 a	1390 ab	1123	1483 a	5649 a
T5. e/m/n/t/s	1688 a	1555 a	1226	1164 bc	5633 a
T6. e/m/c/t/s	1432 b	1403 ab	1132	1186 b	5152 b
----- Soja -----					
T1. n/m/n/t/s	1302 ns	1623 ns	1584 abc	826 c	5334 ns
T2. a/m/f/t/s	1277	1672	1521 bc	996 bc	5465
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	1379	1625	1603 abc	1171 ab	5779
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	1389	1660	1713 a	1054 bc	5814
T5. e/m/n/t/s	1350	1600	1509 c	1386 a	5844
T6. e/m/c/t/s	1302	1708	1667 ab	974 bc	5651

<sup>(1)</sup> n – nabo forrageiro; a – aveia; e – ervilhaca; f – feijão; c – crotalária; m – milho; t – trigo; s – soja

<sup>(a)</sup> Adubação com fósforo e potássio na sementeira da ervilhaca

<sup>(2)</sup> Médias seguidas pela mesma letra minúscula na coluna não diferem estatisticamente pelo teste de Duncan (P<0,05)

ns - significativo ao nível de 5 % de probabilidade

**APÊNDICE I - Relação C/N de plantas de cobertura de inverno <sup>(\*)</sup>, milho<sup>(\*\*)</sup>, plantas de cobertura de verão<sup>(\*)</sup> ou feijão preto<sup>(\*\*)</sup>, trigo<sup>(\*\*)</sup> e soja<sup>(\*\*)</sup>, em cada ciclo de rotação e a média dos cultivos.**

Sucessões de Culturas	1º Ciclo 1997-99	2º Ciclo 1999-01	3º Ciclo 2001-03	4º Ciclo 2003-05	Média dos Cultivos
----- Plantas de Cobertura de Inverno -----					
T1. n/m/n/t/s <sup>(1)</sup>	12,0	19,7	18,2	18,2	17,0
T2. a/m/f/t/s	20,4	27,0	27,6	27,6	25,7
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	8,4	13,1	10,8	10,8	10,8
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	9,2	11,0	11,8	11,8	11,0
T5. e/m/n/t/s	10,7	12,2	12,8	12,8	12,1
T6. e/m/c/t/s	8,6	12,4	12,0	12,0	11,3
----- Milho -----					
T1. n/m/n/t/s	62,9	77,5	77,5	62,9	70,2
T2. a/m/f/t/s	77,5	87,9	82,6	82,4	82,6
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	73,3	77,5	77,5	62,9	72,8
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	73,3	77,5	69,6	62,9	70,8
T5. e/m/n/t/s	73,7	77,5	62,9	62,9	69,3
T6. e/m/c/t/s	73,7	77,5	73,2	62,9	71,8
----- Plantas de Cobertura de Verão ou Feijão -----					
T1. n/m/n/t/s	16,7	16,7	16,8	14,2	16,1
T2. a/m/f/t/s	43,1 **	15,8	43,1 **	14,5	29,1
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	18,7	19,0	18,8	19,3	19,0
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	21,4	21,4	21,5	14,6	19,7
T5. e/m/n/t/s	18,0	17,1	17,9	16,6	17,4
T6. e/m/c/t/s	20,5	20,1	20,1	15,9	19,2
----- Trigo -----					
T1. n/m/n/t/s	101,3	101,3	115,8	113,3	107,9
T2. a/m/f/t/s	121,1	121,1	115,4	101,2	114,7
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	90,6	98,3	101,3	140,4	107,7
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	101,3	101,3	110,7	123,9	109,3
T5. e/m/n/t/s	90,6	101,3	101,3	107,4	100,2
T6. e/m/c/t/s	101,3	101,3	105,3	113,9	105,5
----- Soja -----					
T1. n/m/n/t/s	27,5	27,5	27,5	34,1	29,2
T2. a/m/f/t/s	33,3	27,5	27,5	44,1	33,1
T3. e <sup>(a)</sup> /m/n/t/s	27,5	27,5	27,5	35,1	29,4
T4. e <sup>(a)</sup> /m/c/t/s	27,5	27,5	27,5	31,8	28,6
T5. e/m/n/t/s	27,5	27,5	27,5	44,7	31,8
T6. e/m/c/t/s	28,8	27,5	27,5	29,4	28,3

(\*) Estádio de pleno florescimento (\*\*) Estádio de maturação fisiológica

<sup>(1)</sup> n – nabo forrageiro; a – aveia; e – ervilhaca; f – feijão; c – crotalária; m – milho; t – trigo; s – soja

<sup>(a)</sup> Adubação com fósforo e potássio na sementeira da ervilhaca