

UFRRJ

**INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
CIÊNCIA DO SOLO**

TESE

**Impacto da Adubação Verde no Acúmulo de
Carbono e Nitrogênio no Solo em Rotações de
Culturas em Sistema Plantio Direto e Convencional**

Natalia Pereira Zatorre

2013



**UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
CIÊNCIA DO SOLO**

**IMPACTO DA ADUBAÇÃO VERDE NO ACÚMULO DE CARBONO E
NITROGÊNIO NO SOLO EM ROTAÇÕES DE CULTURAS EM
SISTEMA PLANTIO DIRETO E CONVENCIONAL**

NATALIA PEREIRA ZATORRE

Sob a Orientação do Professor

Robert Michael Boddey

Co-orientação

Bruno José Rodrigues Alves e

Cláudia Pozzi Jantalia

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutora**, no Curso de Pós-Graduação em Agronomia, Área de Concentração em Ciência do Solo.

Seropédica, RJ
Fevereiro de 2013

631.4

Z38i

T

Zatorre, Natalia Pereira, 1981-

Impacto da adubação verde no acúmulo de carbono e nitrogênio no solo em rotações de culturas em sistema plantio direto e convencional / Natalia Pereira Zatorre. – 2013.

xv, 79 f.: il.

Orientador: Robert Michael Boddey.

Tese (doutorado) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Curso de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo, 2013.

Bibliografia: f. 68-79.

1. Solos – Teor de nitrogênio – Teses. 2. Solos – Teor de carbono – Teses. 3. Adubação verde - Teses. 4. Rotação de cultivos agrícolas - Teses. I. Boddey, Robert Michael, 1948- II. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro. Curso de Pós-Graduação em Agronomia – Ciência do Solo. III. Título.

É permitida a cópia parcial ou total desta Tese, desde que seja citada a fonte

UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE AGRONOMIA
CURSO DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA-CIÊNCIA DO SOLO

NATALIA PEREIRA ZATORRE

Tese submetida como requisito parcial para obtenção do grau de **Doutora** no Curso de Pós-Graduação em Agronomia, área de Concentração em Ciência do Solo.

TESE APROVADA EM: 28 / 02 /2013

Cláudia Pozzi Jantalia, Dra.. Embrapa Agrobiologia
(Orientadora)

Adelson de Paula Araujo. Dr. UFRRJ

David Vilas Boas de Campos. Dr. Embrapa Solos

Henrique Pereira dos Santos. Dr. Embrapa Trigo

Guilherme Montandon Chaer. Dr. Embrapa Agrobiologia

DEDICATÓRIA

Dedico esta Tese a *Deus*, por estar presente em minha vida me iluminando em todos os momentos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a DEUS, que sempre me iluminou a escolher o melhor caminho a seguir e que me deu forças para vencer as dificuldades que tive nessa vida.

Aos meus pais e meu irmão que mesmo não entendo a minha ausência, continuou me dando carinho e acreditando em mim.

Ao meu grande companheiro e eterno amor, Carlos, que esteve do meu lado.

A minha amiga e orientadora, Cláudia, que sempre esteve do meu lado ensinado, corrigindo e ajudando, pelo qual eu tenho um carinho muito grande.

Ao meu orientador, Bob, pela amizade, paciência e os comentários sempre muito construtivos.

Ao Guilherme Chaer, pelos ensinamentos em ciência, a paciência, a amizade e que esteve sempre disposto ajudar.

A FAPERJ e CAPES pela concessão das bolsas de estudo para o desenvolvimento da dissertação.

Aos pesquisadores Bruno e Segundo pela oportunidade de pesquisa, pelos ensinamentos e colaboração.

Aos Pesquisadores da EMBRAPA, Júlio Franchini e Henrique Pereira e pela realização das coletas dos experimentos.

Ao Gustavo e Donizete da Embrapa soja, pela amizade e ajuda na realização de algumas análises.

Aos técnicos da EMBRAPA soja e trigo, pela ajuda na realização das coletas dos experimentos, o que seria impossível sem ajuda desse pessoal.

Aos meus estagiários que sempre estiveram disponíveis para ajudar nas análises, nos finais de semana e feriados, Rangel, Luís Cláudio e Geizon, obrigado por tudo.

Ao Barbara que me ajudou e continua ajudando desde 2004, nos ensinamentos da vida e no trabalho científico.

Ao meu amigo Wallace que esteve ao meu lado, me ensinando desde o principio na minha pesquisa.

A Luciene, pela ajuda de sempre e a pela grande amizade sincera.

Ao Roberto, Marquinho e a Cris, na secretaria do Departamento de Solos e da pós- graduação.

Ao casal Elio e Roberta, pela amizade.

A Adriana França e a Beth, pela paciência, atenção e amizade.

Aos meus amigos do mestrado e do doutorado que foram essenciais para minha conquista: Anita, Andréa, Juliano, Patrick, Fabio, Celeste, Hugo, Miriam, Willian, Nivaldo, Paulo Boa Sorte, Fernando, Seleno, Ana Paula, Carol, Debora, Sandra, obrigado a todos vocês.

A todas as pessoas que direta e indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Muito obrigada.

BIOGRAFIA

Natalia Pereira Zatorre, nascida em 26 de novembro de 1981 em Niterói, filha de Paulo Roberto Zatorre e Ruth Pereira. Ingressou na Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro em agosto de 2001 no curso de Engenharia Agrônoma. Em 2004 começou a atuar no Laboratório de Biologia do Solo, UFRRJ, onde foi bolsista PIBIC, desenvolvendo pesquisa com fungos micorrízicos arbusculares. Em 2006 terminou a graduação. Em fevereiro de 2009, concluiu o Mestrado no Curso de Pós-Graduação em Agronomia - Ciência do Solo. Em março de 2009, ingressou no doutorado no Curso de Pós-Graduação em Agronomia - Ciência do Solo.

RESUMO GERAL

ZATORRE, Natalia Pereira. **Impacto da adubação verde no acúmulo de carbono e nitrogênio no solo em rotações de culturas em sistema plantio direto e convencional.** 2013. 79f. Tese (Doutorado em Agronomia, Ciência do Solo). Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2013.

A produtividade das culturas tem sido garantida pela utilização de quantidades substanciais de fertilizantes químicos industrializados, principalmente os nitrogenados. Em sistemas de rotações de culturas manejados sob plantio direto tem sido demonstrado que a inserção de uma leguminosa pode substituir parcialmente, ou às vezes totalmente, o fertilizante nitrogenado utilizado na cultura do milho subsequente. Ainda é provável que a utilização da leguminosa resulte num aumento dos estoques de carbono (C) nos solos. Os objetivos principais deste trabalho foram avaliar o balanço de nitrogênio (N) em diferentes rotações de cultura com e sem a inserção de uma leguminosa utilizada como adubo verde em sistema plantio direto e o estoque de C e N do solo em experimentos de longo prazo. No primeiro experimento conduzido na Embrapa Soja, localizada em Londrina, PR, com solo classificado como Latossolo Vermelho. Os tratamentos consistiram em dois sistemas de produção, manejados durante doze anos sob sistema plantio direto e convencional e três rotações de cultura. As rotações de cultura foram compostas de soja, milho, trigo, aveia preta e tremoço branco, mas diferiam entre si na frequência que cada cultura apareceu na rotação. Neste estudo, foi avaliada a safra de verão e inverno durante doze anos e realizado o cálculo do balanço de N por cada rotação (entrada e saída de N). Foram avaliados os estoques de C e N no solo a 80 cm de profundidade em 1997, 2000, 2003 e 2009. Perdas de C e N solo foi registrado nas rotações que tiveram um saldo negativo de N para o sistema. O segundo experimento conduzido na Embrapa Trigo, em Coxilha, RS, na área experimental da Embrapa Trigo. Em Latossolo Vermelho, com textura muito argilosa. Os tratamentos consistiram em três sistemas de produção, durante treze anos: sistema I (trigo/soja e ervilhaca/milho); sistema II (trigo/soja e pastagem de aveia preta/milho); e sistema III (trigo/soja e ervilha/milho). Este experimento foi amostrado na época da safra de inverno, 2010. As análises realizadas foram estoques de C e N do solo em diferentes profundidades, e realizado o cálculo do balanço de N para cada rotação (entrada e saída de N). Os três tratamentos de rotação de cultura conseguiram aportar, ao longo dos anos, uma quantidade suficiente de N para manter a produtividade agrícola e manter o balanço entre entradas e saídas de N positivo. Todas as rotações mantiveram estoques de C e N totais do solo (0-100 cm). Nestes dois experimentos os resultados que tiveram saldo positivo de N no sistema mantiveram os estoques de C e N no solo. As contribuições da fixação biológica de N₂ nas leguminosas foram essenciais para a manutenção de um equilíbrio positivo de N para o sistema, em algumas rotações. Pode-se dizer que existe uma estreita relação das variáveis C e N do solo com o saldo positivo de N no sistema.

Palavras – chave: Balanço de Nitrogênio. Estoque de carbono. Resíduo de cultura.

GENERAL ABSTRACT

ZATORRE, Natalia Pereira. **Impact of leguminous green manure presence on organic carbon and nitrogen accumulation in soil crop in rotation systems under no-tillage managed system.** 2013. 79p. Thesis (Doctor in Agronomy, Soil Science). Instituto de Agronomia, Departamento de Solos, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ, 2013.

The productivity of crops has been provided by the use of substantial amounts of industrial chemical fertilizers, especially nitrogen. In systems of crop rotations managed under no-tillage it has been shown that the inclusion of a leguminous green manure may replace partially, or sometimes entirely, nitrogen fertilizer subsequently used for maize. It is likely that the presence of a legume results in an increase in soil C stocks. The main objectives of this study were to evaluate the nitrogen balance in different crop rotations with and without the inclusion of a legume used as green manure in no-tillage and the consequences for storage of carbon and nitrogen in soil in long-term experiments. The first experiment was carried out at Embrapa Soja, located in Londrina, State of Paraná. The soil was classified as a loamy red Oxisol. The treatments consisted of two production systems managed for twelve years under conventional and no tillage, and with three crop rotations. Crop rotations were composed of soybean, corn, wheat, oat and white lupine, but differed in the frequency that each crop was present in the rotation. In this study, it was evaluated the summer and winter harvests and calculated the N balance for each rotation (N input and output). There were evaluated the stocks of carbon and nitrogen in the soil up to 80 cm depth, in the years of 1997, 2000, 2003 and 2009. The losses of soil C and N were recorded in the rotations that had a negative balance of N in the system. The second experiment was conducted in the experimental area of Embrapa Trigo, located in Coxilha, Rio Grande do Sul State. The soil was classified as a loamy red Oxisol. The treatments consisted of three production systems, managed for thirteen years: system I (wheat / soybean and vetch / corn), system II (wheat / soybean and oat / corn) and system III (wheat / soybean and pea / corn). This experiment was sampled at the time of the winter harvest, in 2010. The carbon and nitrogen stocks in the soil at different depths, and the calculation of the N balance for each rotation (N input and output) were evaluated. The three treatments of crop rotation could contribute over the years with enough N to sustain agricultural productivity and maintain a positive balance between N inputs and output. All rotations maintained the total soil carbon and nitrogen stocks (0-100 cm). In both experiments the positive N balance in the system maintained stocks of C and N in the soil. The contribution of N₂ fixation in legumes was essential to maintain a positive N balance to the system at some rotations. It was concluded that there is a close relation among the maintenance of soil C and N stocks with a positive nitrogen balance in the system.

Key words: Nitrogen balance. Soil C sequestration. Crop rotation.

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1.** Sequência e identificação de culturas plantadas em três diferentes sistemas de rotação no PC e PD por estação em cada ano (1989 a 2009)..... 15
- Tabela 2.** Densidade do solo, nas diferentes profundidades, obtidos com o uso de anel de Kopeck, nos diferentes sistemas agrícolas, Londrina, PR. Os valores são as médias de dezesseis amostras, referentes a amostragens realizadas nos quatro blocos em quatro anos diferentes, mais ou menos o desvio padrão. 17
- Tabela 3.** Granulometria do solo, nas diferentes camadas, nos diferentes sistemas agrícolas, Londrina, PR. Fonte: Zotarelli, 2001. 18
- Tabela 4.** Características químicas do solo da área experimental, no início do experimento, 1997 e na época da amostragem. (Campo Experimental – Embrapa Soja, município de Londrina, PR)..... 18
- Tabela 5.** Produção de grãos e massa seca de residual (g m^{-2}), e nitrogênio no grão e no resíduo de soja, milho, trigo, aveia preta e tremoço nas safras de 1997/98 e 1998/99 em sistema de PD e PC. Fonte: Zotarelli, 2000. 19
- Tabela 6.** Rendimento médio de grãos de soja, milho e trigo (safras de 1998 a 2010), nos sistemas de plantio direto (PD) e convencional (PC) nas rotações de culturas, R1 (milho/aveia-soja/aveia- soja/ nabo forrageiro); R2 (milho/tremoço – milho/tremoço - milho/nabo forrageiro) e R3 (milho/trigo – milho/aveia – milho/trigo) em Londrina, PR. 22
- Tabela 7.** Correlação entre os valores em cada sistema de manejo do solo (PD e PC) e nas diferentes rotações de culturas em relação ao balanço de N, quantidade de C presente nos resíduos e os estoques de C e N do solo. Os dados utilizados foram em função aos dados obtidos do balanço de N acumulado e a diferença no estoque de C e N para os três períodos (97/98 a 99/2000; 2000-2003; 2003/04 a 2008/09) de monitoramento experimento..... 34
- Tabela 8.** Produtividade do grão, rendimento da biomassa da parte aérea, sistema radicular e matéria seca total (Mg ha^{-1}) em dois sistemas de rotação de cultura (PD - rotação R1 e R3), no ano de 2011. Dados referentes a média de quatro repetições. 36
- Tabela 9.** Coeficientes de correlação de Pearson entre os valores de estoque de C e N e de biomassa de raiz, nas diferentes camadas de solo estudadas e rotações de culturas R1 e R3), sob sistema plantio direto com uso de milho (verão) e aveia preta (inverno) como planta de cobertura do solo. 39
- Tabela 10** Descrição dos três sistemas de rotações de cultura em cada parcela, na fase 1 do experimento que compreendeu os anos de 1995 a 2003 e na fase 2 entre 2003 e 2010, em Coxilha, RS. 46
- Tabela 11.** Sequência de três sistemas de rotações de cultura em cada parcela, na fase 1 do experimento que compreendeu os anos de 1995 a 2003 e na fase 2 de 2003 a 2010 , Coxilha, RS. 48
- Tabela 12** Características químicas do solo da área experimental, no início do experimento, 1995 e na época da amostragem, 2010. São valores baseados em médias dos sistemas I, II e IV, (Campo Experimental – Embrapa Trigo, município de Coxilha, RS). 50

| | |
|--|----|
| Tabela 13. Granulometria do perfil do solo, em diferentes profundidades, com intervalo de 0-100 cm, nos diferentes blocos na área experimental, Coxilha, RS. | 51 |
| Tabela 14. Densidade do solo, nas diferentes profundidades, obtidos pela aplicação do uso de anel de Kopeck, nos diferentes sistemas agrícolas, Coxilha, RS. | 51 |
| Tabela 15. Média anual de N, P ₂ O ₅ e K ₂ O adicionados pelas adubações de plantio e de cobertura realizadas entre os diferentes períodos 1995 a 2010 nos diferentes sistemas de rotação de cultura. Coxilha, RS. | 52 |
| Tabela 16. Índices de colheita obtidos na literatura e utilizados para a estimativa de resíduo da parte aérea das culturas. Teores de nitrogênio e carbono da parte aérea das culturas. Coxilha, RS. | 54 |
| Tabela 17. Rendimento de grãos (corrigidos para 13% de umidade) de soja milho e trigo (Mg ha ⁻¹) cultivados em sucessão com plantas para cobertura do solo no inverno. Sistema I trigo/soja e ervilhaca/milho; Sistema II trigo/soja e aveia preta/milho; e Sistema IV trigo/soja e ervilha/milho. | 56 |
| Tabela 18. Estimativa da quantidade total de N e C nos resíduos das culturas, e a relação C:N em todo o período avaliado (2003-2010). | 58 |
| Tabela 19. Balanço anual médio de N (kg N ha ⁻¹) nas culturas em cada sistema de rotação e sub parcelas, em Coxilha, RS. | 59 |
| Tabela 20. Estoque de C e N no perfil do solo, nas profundidades de 0-30 cm e 0-100 cm. .. | 64 |

ÍNDICE DE FIGURAS

- Figura 1.** Índices pluviométricos mensais (mm) registrados no município de Londrina, PR, no período de janeiro de 1998 a agosto de 2009. Fonte: Embrapa Soja. 13
- Figura 2.** Esquema da descrição da área experimental de Londrina. 14
- Figura 3.** Esquema do delineamento experimental em blocos casualizados, na área experimental da Embrapa Soja. Manejo do solo sob sistema plantio direto (PD) e plantio convencional (PC), nas rotações de culturas R1 (milho/aveia-soja/aveia- soja/ nabo forrageiro); R2 (milho/tremoço – milho/tremoço - milho/nabo forrageiro) e R3 (milho/trigo – milho/aveia – milho/trigo) em Londrina, PR..... 16
- Figura 4.** Entrada acumulativa de C através dos resíduos de cultura, para três períodos (97/98 a 99/2000; 2000-2003; 2003/04 a 2008/09) por 12 anos de experimento nos sistemas de plantio direto (PD) e convencional (PC) nas rotações de culturas, R1 (milho/aveia-soja/aveia- soja/ nabo forrageiro); R2 (milho/tremoço – milho/tremoço - milho/nabo forrageiro) e R3 (milho/trigo – milho/aveia – milho/trigo) em Londrina, PR..... 24
- Figura 5.** Entrada acumulativa de N através dos resíduos de cultura, para três períodos (97/98 a 99/2000; 2000-2003; 2003/04 a 2008/09) por 12 anos de experimento nos sistemas de plantio direto (PD) e convencional (PC) nas rotações de culturas, R1 (milho/aveia-soja/aveia- soja/ nabo forrageiro); R2 (milho/tremoço – milho/tremoço - milho/nabo forrageiro) e R3 (milho/trigo – milho/aveia – milho/trigo) em Londrina, PR..... 25
- Figura 6.** Balanço de N acumulativo por período no solo nos sistemas de plantio direto (PD) e convencional (PC) nas rotações de culturas, R1 (milho/aveia-soja/aveia- soja/ nabo forrageiro); R2 (milho/tremoço – milho/tremoço - milho/nabo forrageiro) e R3 (milho/trigo – milho/aveia – milho/trigo) em Londrina, PR. Para os períodos de monitoramento do experimento: 97/98 a 99/2000; 2000-2003; 2003/04 a 2008/09..... 27
- Figura 7.** Distribuição de carbono total no perfil do solo, de 0 a 80 cm, nos sistemas de plantio direto (PD) e convencional (PC) nas rotações de culturas, R1 (milho/aveia-soja/aveia- soja/ nabo forrageiro); R2 (milho/tremoço – milho/tremoço - milho/nabo forrageiro) e R3 (milho/trigo – milho/aveia – milho/trigo), nos anos 1997, 2000, 2003 e 2009 em Londrina, PR. As barras horizontais representam o valor da diferença mínima significativa (DMS) obtido no teste de Tukey a 5% a partir dos resultados..... 29
- Figura 8.** Distribuição de nitrogênio total no perfil do solo, de 0 a 80 cm, nos sistemas de plantio direto (PD) e convencional (PC) nas rotações de culturas, R1 (milho/aveia-soja/aveia- soja/ nabo forrageiro); R2 (milho/tremoço – milho/tremoço - milho/nabo forrageiro) e R3 (milho/trigo – milho/aveia – milho/trigo) em Londrina, PR. As barras horizontais representam o valor da diferença mínima significativa (DMS) obtido no teste de Tukey a 5% a partir dos resultados. 30
- Figura 9.** Estoques de C no solo (0 a 20 e 0 a 80 cm) quantificados nos anos de 1997, 2000, 2003 e 2009, para a rotação R1, R2 e R3, sob plantio direto (PD) e plantio convencional (PC). Círculos cinza com diferentes letras minúsculas indicam diferenças significativas ($P < 0,05$) sob PC nos diferentes anos. Círculos pretos com letras maiúsculas diferentes indicam diferenças significativas ($P < 0,05$) sob PD nos diferentes anos. “ns” indica que não há diferenças significativas entre PD e PC ($P < 0,05$) e * indicam diferenças significativas entre PD e PC ($P < 0,05$), dentro de cada ano. 31

- Figura 10.** Estoque de N no solo (0 a 20 e 0 a 80 cm) quantificados nos anos de 1997, 2000, 2003 e 2009, para a rotação R1, R2 e R3, sob plantio direto (PD) e plantio convencional (PC). Círculos cinza com diferentes letras minúsculas indicam diferenças significativas ($P < 0,05$) sob PC nos diferentes anos. Círculos pretos com letras maiúsculas diferentes indicam diferenças significativas ($P < 0,05$) sob PD nos diferentes anos e “ns” indica que não há diferenças significativas entre PD e PC ($P < 0,05$) e * indicam diferenças significativas entre PD e PC ($P < 0,05$), dentro de cada ano. 32
- Figura 11.** Relação C:N do solo obtida no anos de 1997, 2000, 2003 e 2009 para rotações de cultura sob os sistemas de plantio direto (PD) e convencional (PC), em Londrina, PR. A linha central indica a mediana, as bordas superiores e inferiores das caixas indicam o terceiro quartil e primeiro quartil, respectivamente. A linha vertical indica os valores máximos e mínimos e os círculos indicam os *outliers*. 33
- Figura 12.** Densidade de raízes (Mg dm^{-3}) de milho e aveia preta em diferentes profundidades sob sistema de PD. 37
- Figura 13.** Precipitação média mensal registrada na região de Coxilha, RS, durante a fase 2 no período de Janeiro de 2003 até 2010. 49
- Figura 14.** Matéria seca de parte aérea (Mg. ha^{-1}) das culturas de trigo (T), soja (S), milho (M), ervilhaca (Er), aveia (Av) e ervilha forrageira (Ef) nos diferentes tratamentos de rotação de cultura. A letra T que se encontra acima das barras é referente a massa seca de trigo seguido das demais culturas de acordo com o sistema de rotação. 57
- Figura 15.** Balanço acumulativo de N nos sistemas de rotação de cultura, no período 2003-2010. 60
- Figura 16.** Concentração de C e N (A e B) no perfil do solo nos sistemas de rotações de culturas e profundidade, em Coxilha, RS. Na rotação T/S-Er/M, sistema SIP1 (●) e SIP2 (○); na rotação T/S- Av/M sistema SIIP1 (▼) e SIIP2 (△) e na rotação T/S-Ef/M, sistema SIVP1 (■) e SIVP2 (□). Barras horizontais em cada profundidade significam o valor da diferença mínima significativa (DMS) obtido no teste de Tukey a 5%. 61
- Figura 17.** Relação C:N no perfil do solo, na profundidade de 0 a 100 cm, em áreas sob diferentes sistemas de rotação, em Coxilha, RS. Na rotação T/S-Er/M, sistema SIP1 (●) e SIP2 (○); na rotação T/S- Av/M, sistema SIIP1 (▼) e SIIP2 (△) e na rotação T/S-Ef/M, sistema SIVP1 (■) e SIVP2 (□). Barras horizontais em cada profundidade significam o valor da diferença mínima significativa (DMS) obtido no teste de Tukey a 5%. 62
- Figura 18.** Correlação linear entre os teores de C e N (g kg^{-1}) no perfil do solo (0-100 cm), em área sob diferentes rotações de cultura. 63
- Figura 19.** Distribuição isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ no perfil do solo, na profundidade de 0 a 100 cm, em áreas sob diferentes sistemas de rotação, em Coxilha, RS. Na rotação T/S-Er/M, sistema SIP1 (●) e SIP2 (○); na rotação T/S- Av/M, sistema SIIP1 (▼) e SIIP2 (△) e na rotação T/S-Ef/M, sistema SIVP1 (■) e SIVP2 (□). Barras horizontais em cada profundidade significam o valor da diferença mínima significativa (DMS) obtido no teste de Tukey a 5%. 63

SUMÁRIO

| | |
|--|----|
| 1. INTRODUÇÃO GERAL | 1 |
| 2. REVISÃO DE LITERATURA | 3 |
| 2.1. Composição da Matéria Orgânica do Solo (MOS) | 3 |
| 2.2. Mecanismos de Formação da MOS | 4 |
| 2.3. Mecanismos de Degradação da MOS | 4 |
| 2.4. Mecanismos de Manutenção e Estabilização da MOS | 5 |
| 2.5. Desafios do Manejo do Solo e Plantas para a Manutenção da MOS | 6 |
| 3. CAPÍTULO I INFLUÊNCIA DA LEGUMINOSA UTILIZADA COMO ADUBO VERDE NO ESTOQUE DE CARBONO E NITROGÊNIO DO SOLO SOB PLANTIO DIRETO E CONVENCIONAL | 9 |
| 3.1. RESUMO | 10 |
| 3.2. ABSTRACT | 11 |
| 3.3. INTRODUÇÃO | 12 |
| 3.4. MATERIAL E MÉTODOS | 13 |
| 3.4.1. Localização do experimento | 13 |
| 3.4.2. Histórico da área experimental | 13 |
| 3.4.3. Detalhes da condução da área experimental | 16 |
| 3.4.4. Característica física e química da área experimental | 17 |
| 3.4.5. Determinação do rendimento de grãos e massa seca das culturas e entrada de C e N | 19 |
| 3.4.6. Cálculo do balanço de N no sistema | 20 |
| 3.4.7. Concentração de C e N e avaliação de estoques C e N no solo | 20 |
| 3.4.8. Amostragem e quantificação do sistema radicular | 21 |
| 3.4.9. Análise estatística | 21 |
| 3.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 22 |
| 3.5.1. Produtividade de grãos | 22 |
| 3.5.2. Total de entradas de C e N | 23 |
| 3.5.3. Balanço de N no sistema | 26 |
| 3.5.4. Concentração de C e N totais no solo | 28 |
| 3.5.5. Estoques de C e N no solo | 30 |
| 3.5.6. Influência da frequência de cultivo da leguminosa para adubação verde em rotações de culturas no balanço de N e preservação do estoque de carbono no solo | 33 |
| 3.5.7. Influência do sistema radicular na preservação do estoque de carbono e nitrogênio do solo, em sistema plantio direto | 36 |
| 3.6. CONCLUSÕES | 40 |
| 4. CAPÍTULO II BALANÇO DE N E ESTOQUES DE C E N EM ROTAÇÕES DE CULTURAS SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO em UM LATOSSOLO VERMELHO EM COXILHA – RS. | 41 |
| 4.1. RESUMO | 42 |
| 4.2. ABSTRACT | 43 |
| 4.3. INTRODUÇÃO | 44 |
| 4.4. MATERIAL E MÉTODOS | 46 |
| 4.4.1. Localização e descrição da área de estudo | 46 |
| 4.4.2. Clima | 48 |

| | |
|--|----|
| 4.4.3. Amostragem e características físicas e químicas do solo | 49 |
| 4.4.4. Determinação dos estoques de carbono e nitrogênio do solo | 51 |
| 4.4.5. Quantificação do balanço de N nos sistemas de rotação de cultura | 52 |
| 4.4.6. Quantidade de fertilizantes utilizados nos tratamentos..... | 52 |
| 4.4.7 Cálculo de rendimento dos grãos | 52 |
| 4.4.8 Biomassa da parte aérea das culturas..... | 52 |
| 4.4.9 Cálculos para determinação do balanço acumulativo de N nos sistemas de rotação | 53 |
| 4.4.10 Estimativa do total de nitrogênio e carbono adicionado pelas culturas | 53 |
| 4.4.11 Análises estatísticas | 54 |
| 4.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO | 55 |
| 4.5.1. Rendimento de grãos e biomassa da parte aérea das culturas..... | 55 |
| 4.5.2. Estimativa da quantidade de C, N e Relação C:N dos resíduos nos sistemas de rotação ao longo dos anos | 57 |
| 4.5.3. Balanço de N anual nas diferentes culturas | 58 |
| 4.5.4 Balanço acumulativo de N nas rotações de cultura | 59 |
| 4.5.5 Efeito das diferentes rotações de culturas sobre a distribuição de C, N e relação C:N no perfil do solo | 60 |
| 4.5.6 Efeito das diferentes rotações de culturas sobre a distribuição isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ | 63 |
| 4.5.7 Estoque de C e N no solo..... | 64 |
| 4.6 CONCLUSÕES..... | 66 |
| 5. CONCLUSÕES GERAIS..... | 67 |
| 6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS..... | 68 |

1. INTRODUÇÃO GERAL

O rendimento de grãos das culturas agrícolas é o resultado da expressão do potencial genético da cultivar utilizada e depende, principalmente, das características do solo e das condições ambientais durante o cultivo, onde se inclui o suprimento de nutrientes. Em sistemas agrícolas manejados intensivamente grande parte da biomassa produzida pelas plantas é colhida e uma pequena parte do seu resíduo retorna ao solo no final do período vegetativo, resultando no depauperamento das condições nutricionais do solo, sendo necessário sua reposição com fertilizantes industriais. Com isso, a produtividade das culturas tem sido garantida pela utilização de quantidades substanciais de fertilizantes minerais industrializados, principalmente os nitrogenados, elevando os custos da produção, e em consequência um aumento nas emissões de gases de efeito estufa.

Na tentativa de reverter o processo de degradação do solo e de implementar a recuperação da sua capacidade produtiva, foram conduzidas modificações no manejo do solo nas últimas décadas, dentre as quais o plantio direto foi a que mostrou o maior impacto (AITA e GIACOMINI, 2006). Nos últimos dez anos têm prevalecido um consenso geral de que a mudança do sistema plantio convencional (PC) para o sistema plantio direto (PD) pode promover a um acúmulo de carbono no solo (WEST e POST, 2002; LAL, 2003; LAL et al., 2003) resultando em maiores valores de biomassa e atividade microbiana (CATTELAN e VIDOR, 1990) e uma reciclagem de nutrientes (KUMAR e GOH, 2000). Além desses estudos sobre o conteúdo de matéria orgânica do solo (MOS) em áreas sob diferentes sistemas de preparo do solo e diferentes rotações de culturas, têm-se obtido resultados consistentemente positivos com o PD quando as rotações de culturas incluem plantas de cobertura, especialmente leguminosas para adubação verde (PILLON, 2000; BAYER et al., 2000; BAYER et al., 2001; SÁ et al., 2001; SISTI et al., 2004; BODDEY et al., 2010).

Estudos mostram claramente que em Latossolos da região Sul do Brasil a inclusão de uma leguminosa nas rotações de culturas pode promover um considerável acúmulo de carbono (C) no solo ao longo dos anos (SISTI et al., 2004; BAYER et al., 2010). Porém, a ausência de leguminosas no sistema, ou a presença apenas da soja, não promove acúmulos de C no solo, mesmo quando as não-leguminosas foram adubadas com nitrogênio (N) fertilizante DIEKOW et al. (2005). Outra descoberta foi que, nestes solos, quando houve aumento de C no solo sob PD, o acúmulo deste em profundidades maiores que 30 cm foi muito significativos (SISTI et al., 2004; DIEKOW et al., 2005; BODDEY et al., 2010). Aparentemente, este efeito da presença da leguminosa não é derivado unicamente da sua capacidade de acumular N pelo processo da fixação biológica de nitrogênio (FBN), ainda não havendo uma explicação dos mecanismos que promovem este acúmulo de C e, especialmente, por que o C poderia acumular-se em profundidades maiores que 30 cm, profundidade não atingida por implementos agrícolas como arados e grades.

Atualmente o Painel Intergovernamental sobre Mudanças Climáticas (IPCC) recomenda a contabilidade dos estoques do C nos solos até 30 cm de profundidade (IPCC, 2007), porém estes resultados sugerem que, se esta recomendação for modificada, visando contabilizar os estoques até 100 cm de profundidade, a estimativa do potencial de mitigação de CO₂ induzido pela mudança de PC para PD em solos tropicais e subtropicais pode aumentar substancialmente. Em escala global, é de significativa importância a determinação da influência de sistemas agrícolas em solos de ambientes tropicais e subtropicais para as mudanças globais. Assim, é indispensável a geração de dados científicos em países de clima tropical, como no caso do Brasil, em um esforço concentrado de construir cenários globais onde os impactos gerados por modificações de uso do solo possam ser efetivamente bem

definidos e caracterizados, de modo a contribuir com informações mais precisas e atualizadas para organismos como o IPCC.

A substituição do fertilizante nitrogenado pela leguminosa pode promover a mitigação das emissões de gases efeito estufa não só devido à energia fóssil utilizado na sua fabricação, mas também é provável que a utilização da leguminosa resulte numa emissão de N_2O menor do que a utilização do N fertilizante. Em rotações de cultura sob o manejo de plantio direto, a introdução de uma leguminosa como adubo verde proporciona um incremento na produtividade da cultura de milho subsequente e sobre o estoque de carbono e nitrogênio do solo.

Esta tese gerou informações sobre a influência da inserção de uma leguminosa antes do milho nas rotações de cultura nos estoques de C e N no solo em áreas com PD a longo prazo. A hipótese geral do trabalho foi que em rotações de culturas sob PD, a introdução de uma leguminosa utilizada como adubo verde proporciona um balanço positivo de N no solo, promovendo incremento no estoque de C e N do solo. O objetivo geral foi avaliar o balanço de N em diferentes rotações de cultura com e sem a inserção de uma leguminosa utilizada como adubo verde em PD e o seu efeito no estoque de C e N do solo em experimentos de longo prazo.

A tese é apresentada em dois capítulos, sendo o primeiro, relacionado à influência da leguminosa utilizada como adubo verde no estoque de carbono e nitrogênio do solo sob plantio direto e convencional. Que teve como objetivo avaliar o potencial de diferentes rotações de culturas no acúmulo e/ou a manutenção de carbono e nitrogênio no solo em sistemas agrícolas sob plantio direto ou convencional, na região sul do Brasil. No segundo, ao estudo do balanço de N e estoques de C e N em rotações de culturas sob sistema plantio direto em área de Latossolo Vermelho em Coxilha – RS. Com objetivo de avaliar o balanço de nitrogênio e os estoques de Carbono e Nitrogênio sob três sistemas de rotação de cultura em sistema plantio direto ao longo prazo na região Sul. Cada capítulo possui uma introdução e uma revisão sobre cada assunto, discussões e conclusões dos resultados obtidos. No final da tese, são apresentadas as conclusões gerais e as referências bibliográficas.

2. REVISÃO DE LITERATURA

A sustentabilidade dos sistemas agrícolas depende fundamentalmente da manutenção e equilíbrio dos nutrientes no solo, principalmente C, N e os outros elementos que fazem parte da composição da MOS. Cerca de três quartos do Carbono orgânico (Corg) contido nos ecossistemas terrestres e a maior parte do Nitrogênio orgânico (Norg) são encontrados nos resíduos vegetais e na MOS (SCHLESINGER, 2000; LAL, 2008). Tanto o CO quanto os macro-nutrientes são mineralizados a formas inorgânicas simples, por uma comunidade altamente dinâmica de microrganismos decompositores (BRADY e WEIL, 2002; BERG e MCCLAUGHERTY, 2003; citado por CONCEIÇÃO, 2007). Segundo a revisão de por Schlesinger (2000), o processo de mineralização ocorre em grande escala, é sensível às interações entre as propriedades do solo (físicas, químicas e biológicas) com o ambiente, e esses fatores nunca atuam separadamente um do outro. O autor sugere ainda que a utilização do cultivo do solo utilizando o sistema convencional e o aumento da temperatura podem aumentar o fluxo de CO₂ dos solos, sem aumentar o estoque de MOS.

2.1. Composição da Matéria Orgânica do Solo (MOS)

A composição da MOS é bastante conhecida, onde aproximadamente 90% (m/m) da estrutura da MOS é composta de C (52 a 58%) e O (34 a 35%), seguido de N e H (3,3 a 7%). Enxofre (S) e fósforo (P) ocorrem geralmente em proporções inferiores a 2%. Estes elementos compõem os tecidos, celulose, hemicelulose, proteínas, amido, pectinas, taninos, ligninas e lipídeos que totalizam entre 10 a 25% da massa verde geral. Desses constituintes, os principais são a celulose (20 a 50% da matéria seca), hemicelulose (10 a 30%), lignina (5 a 30%) e proteínas e aminoácidos (2 a 15%) (MOREIRA e SIQUEIRA, 2006), variando entre plantas e época de crescimento (estádio de desenvolvimento).

As substâncias complexas que formam a MOS são componentes importantes dos ecossistemas que, de acordo com sua distribuição relativa, grau de maturidade, natureza dos tecidos incorporados e atuação dos fatores de clima e solo, controlam a velocidade de conversão dos compostos de carbono dos resíduos da fitomassa para matéria orgânica humificada (CANELLAS e SANTOS, 2005). Para Theng et al. (1989), a MOS é resultante, principalmente, da deposição de resíduos de vegetais (fonte primária) e animais (fonte secundária) e pode ser dividida em dois compartimentos: a) matéria orgânica viva composta por raízes e parte aérea de plantas, fauna do solo e microrganismos; b) matéria orgânica morta composta por fração leve e húmus (substâncias húmicas e não húmicas).

Substâncias húmicas são um dos componentes mais importantes de matéria orgânica do solo, apresentando complexidade na sua estrutura, caracterizadas por possuir macromoléculas, polieletrólitos com carga negativa que contêm grupos funcionais, principalmente carboxílicos e fenólicos (SWIFT, 1989). Além disso, na fase atual do conhecimento, não se sabe se as propriedades das substâncias húmicas podem ser diferentes nos diferentes tipos de solos (TAN, 2003). Esses compartimentos são dinâmicos, mutuamente dependentes e controlados por fatores climáticos, edáficos e antrópicos (SCHOLLES et al., 1997; SCHLESINGER, 2000), mas o seu entendimento tem servido de base para a contribuição de cada fração da MOS em função de alterações no manejo e no ambiente. Os processos e mecanismos de transformação dos elementos que regulam a ciclagem de nutrientes no solo estão estritamente ligados a MOS, sendo de grande importância seu entendimento.

2.2. Mecanismos de Formação da MOS

A quantidade de Corg contido no solo depende do equilíbrio entre as entradas de material orgânico (por exemplo, a matéria vegetal deteriorada, raízes e resíduos orgânicos, como esterco e resíduos vegetais) e perdas de C na forma de CO₂ derivado da respiração celular. Além disso, quantidade, qualidade da MOS e sua taxa de decomposição, são determinados pela interação conjunta das condições climáticas, propriedades do solo e uso do solo. Assim, práticas de manejo do solo, tais como drenagem, preparo do solo, plantio, manejo de resíduos de culturas e adubação, entre outros, podem modificar a entrada e a decomposição de MOS.

Por meio da fotossíntese, as plantas captam o CO₂ atmosférico, fixando-o no tecido vegetal. De fato, a produtividade primária das plantas exerce muito controle sobre o balanço de C dos solos (JANSSENS et al., 2001). No entanto, apenas uma fração do total de captura de C (produtividade primária bruta) resulta em acúmulo de C da biomassa vegetal, já que uma grande proporção do carbono assimilado é respirado pelas plantas (LAMBERS et al., 2005). Uma parte do C fixado fotossinteticamente é depositado no solo através da liberação de exsudatos radiculares no perfil do solo, durante o crescimento dos vegetais (CHAPIN et al., 2009). O restante consiste de raízes que são depositados no solo e de resíduos da parte aérea depositados na superfície do solo. Nos sistemas de produção de grãos o material depositado sobre o solo é fragmentado pelo processo de colheita e pode ser incorporado através do preparo do solo (no plantio convencional). Uma fração desse carbono orgânico é rapidamente decomposto e perdido pela respiração dos microrganismos (WICKLAND e NEFF, 2008). O restante passa a ser um precursor importante do húmus (GUGGENBERGER e ZECH, 1994), a fração mais estável da MOS. Os resíduos provenientes das raízes representam entradas diretas para o sistema solo, e como tal tem potencial para dar importante contribuição para o estoque de C total do solo em profundidade (JOBAGY e JACKSON, 2000). No Brasil faltam estudos em sistemas agrícolas quantificando a produtividade primária líquida das culturas vegetais, fator considerado por Friedlingstein et al. (1999) de grande importância para a avaliação do ciclo do C terrestre, tanto em escala global como regional.

Atualmente existe um consenso de que 20% ou mais do C assimilado é transferido para o solo através da rizodeposição e/ou para fungos micorrízicos arbusculares (FMA) (DRIGO et al., 2010). Além dos benefícios que os FMAs trazem para as plantas, eles influenciam o metabolismo de equilíbrio do solo através da manutenção da fertilidade e das taxas de C e N no solo (RILLIG, 2004), além de efeitos positivos sobre a agregação do solo, consequentemente influenciando sua conservação (WRIGHT et al., 1996; RILLIG, 2004, 2005).

2.3. Mecanismos de Degradação da MOS

A quantidade adicionada de C em determinadas condições edafoclimáticas depende das espécies e dos sistemas de culturas utilizados. Já as perdas de C ocorrem principalmente pela liberação de CO₂ na respiração derivada da decomposição microbiana dos resíduos e da matéria orgânica do solo e por processo de erosão (SANDERMAN et al., 2010).

A erosão tem sido historicamente um mecanismo de grande perda de C pelos agroecossistemas, com estimativas variando de 20 a 50% do estoque de C no solo (LAL, 2004b). As outras perdas de carbono incluem as perdas na forma de gases, como compostos orgânicos voláteis (KESSELMEIER e STAUDT, 1999) e em menor proporção a lixiviação de C solúvel do solo para os ecossistemas aquáticos (SCHLESINGER, 2000).

A prática do revolvimento do solo por implementos de preparo do solo também pode ser considerada como uma das principais causas de perda de C, por afetar a decomposição da

MOS (LAL, 2004a). A aração e a gradagem são as principais práticas utilizadas em PC, que promovem a ruptura dos agregados do solo, aumentam a aeração proporcionando maior contato solo com o resíduo vegetal. Esta prática reduz a proteção física da MOS, pois aumenta sua exposição aos microrganismos devido à melhor oxigenação do solo, necessária para a respiração da biota (SIX et al., 2004; COSTA et al., 2008). Estudos tem demonstrado que os resultados do cultivo intensivo promovem uma perda de C, aumentando assim as emissões de gases de efeito estufa (REICOSKY et al., 1999), e diminuindo os níveis originais de MOS. A elevada emissão de CO₂ do solo após o seu revolvimento, comparado ao solo não perturbado no PD, foram associados ao aumento da atividade microbiana (REICOSKY et al., 1999). Este processo faz com que as perdas de C do solo sejam aumentadas devido à liberação de compostos orgânicos, anteriormente “sequestrados” nos agregados, que serão então decompostos pela biota do solo (BEARE et al., 1994; FRANZLUEBBERS et al., 1999; BALEDENT et al., 2000; SIX et al., 2000; SIX et al., 2004).

2.4. Mecanismos de Manutenção e Estabilização da MOS

A estabilização da MOS acontece quando ocorre a desaceleração do processo de decomposição permitindo a formação das substâncias húmicas. Os mecanismos de estabilização da MOS podem ser classificados em recalcitrância bioquímica, estabilização química e proteção física (CHRISTENSEN, 1996). A recalcitrância bioquímica ocorre nas moléculas em um estado mais avançado de decomposição que tem características químicas próprias e mais complexas, o que torna mais lento ou impede o processo de decomposição. Stout et al. (1985) e Preston (1996) associaram a maior recalcitrância da MOS à maior presença de grupamentos químicos aromáticos nas moléculas constituintes da MOS em estágio mais avançado de humificação e, um maior conteúdo de C e de N na composição elementar, características do processo de evolução da matéria orgânica humificada (ZECH et al., 1997).

A degradação de alguns substratos orgânicos como lignina e outras macromoléculas é energeticamente dispendiosa para os microrganismos, e muitas vezes estes compostos se acumulam seletivamente durante os estágios iniciais da decomposição (KOGEL-KNABNER et al., 2008), até os substratos mais lábeis serem decompostos e esgotados. Em média 1-2% de resíduos vegetais tornam-se estabilizados como MO humificada do solo por períodos significativos de tempo (SCHLESINGER, 2000). No entanto, dependendo das condições ambientais e características bioquímicas, o resíduo pode levar até 10 anos ou mais para ser humificado (HARMON et al., 2009). As interações da MOS com os minerais no solo, íons metálicos e outras substâncias orgânicas presentes no solo, limitam o acesso dos microrganismos decompositores às frações orgânicas. Assim, a presença de quantidades significativas de MOS em alguns solos tropicais, principalmente aqueles muito argilosos, vem sendo atribuída à presença de altos teores de oxi-hidróxidos de ferro e alumínio, que complexariam a MOS, estabilizando-a (RESENDE et al., 1997; ROSCOE et al., 2000).

A estabilização química, também chamada de interações físico-químicas, refere-se à interação entre moléculas orgânicas e minerais formando associações químicas ou físico-químicas, que limitam a decomposição destes materiais (SKJEMSTAD et al., 1993; CHRISTENSEN, 1996).

Muitos autores observaram correlações positivas entre a matéria orgânica e a proteção física da MOS nos agregados do solo (FELLER e BEARE, 1997; BALDOCK e SKJEMSTAD, 2000; BARTHÈS et al., 2008). A MOS protegida no interior dos agregados apresenta um tempo de permanência no solo maior do que a MO livre, sendo esta proteção maior nos micro agregados do que nos macro agregados (BUYANOVSKY et al., 1994). A proteção física da MOS exercida pelos agregados limita o contato entre os microrganismos e

enzimas com a MOS, ou ainda limita a difusão de O₂ dentro dos agregados, especialmente dos micro agregados. Para muitos autores, o aumento do CO está relacionado com o aumento do estado de agregação do solo (TISDALL e OADES, 1982; CAMBARDELLA e ELLIOTT, 1992; BEARE et al., 1994; JASTROW, 1996; CASTRO FILHO et al., 1998; SIX et al., 1998, SIX et al., 1999; MARTENS, 2000; ZOTARELLI et al., 2007).

2.5. Desafios do Manejo do Solo e Plantas para a Manutenção da MOS

A dinâmica do ciclo de C nos solos tropicais é controlada por diversos fatores, como clima, solo, planta e manejo (HOUGHTON, 2007). A utilização de manejos de solo e espécies de plantas que aumentem as entradas de resíduos orgânicos e que diminuam a mineralização da matéria orgânica pode promover o acúmulo de C nos solos. A utilização de métodos de cultivo menos intensivos, como o PD e o cultivo mínimo, poderiam reduzir a perda de C ou contribuir para o sequestro de C da atmosfera, em comparação com preparo convencional (BAKER et al., 2007; CHRISTOPHER e LAL, 2007). Em condições brasileiras, experimentos com sistemas de rotação de culturas que não incluem plantas que promovam alto aporte de resíduos tendem a apresentar incrementos pequenos nos estoques de C (BAYER e MIELNICZUK, 1997a,b). Uma melhor compreensão dos processos envolvidos na estabilização e decomposição da MOS são necessários para obter um conhecimento mais profundo sobre a relação entre a disponibilidade de C e N, a dinâmica da comunidade microbiana e os processos de decomposição microbiana em um contexto geral.

Atualmente, práticas no manejo agrícola como adoção de PD, rotação de culturas e aplicação de fertilizantes, principalmente os nitrogenados, apresentam efeitos marcantes sobre a dinâmica da MOS. No entanto, diversos autores demonstraram que em algumas situações a simples adoção do PD não garante aumento no estoque de C no solo, comparado ao PC (MACHADO e SILVA, 2001; FREIXO et al., 2002; SISTI et al., 2004). A utilização do sistema de PD tem um efeito pronunciado sobre a quantidade e a distribuição do resíduo da colheita no solo, mas o efeito a longo prazo sobre a MOS não está esclarecido.

Diversos trabalhos encontraram uma correlação positiva entre resíduos vegetais retornados ao solo e o nível de estoque de C em sistema de PD (LOVATO et al., 2004; SISTI et al., 2004; DIEKOW et al., 2005; SIQUEIRA NETO et al., 2009). Bayer (1996) obteve quantidades crescentes de material orgânico fornecidos por sistemas de rotação envolvendo aveia/milho (14 Mg ha⁻¹), aveia + trevo/milho (18 Mg ha⁻¹) e aveia + trevo/milho + caupi (21 Mg ha⁻¹), apresentando diferença entre o sistema de PD e PC em relação ao estoque de C no solo até 17,5 cm de profundidade.

LOVATO et al. (2004) avaliaram o efeito de três rotações de cultura com 0 e 139 kg ha⁻¹ de N e três sistemas de preparo do solo (PD, PC e preparo mínimo), após 13 anos. Foram encontrados resultados positivos nos estoques de C e N na profundidade de 0-30 cm em PD nas rotações de ervilhaca/milho e ervilhaca+aveia/milho+ caupi com adubação de N no milho, que foram aquelas que apresentaram as maiores adições de N pelos resíduos. No PC somente a rotação ervilhaca+aveia/milho+ caupi com adubação de N apresentou efeitos positivos no estoque de N. Na rotação aveia/milho não houve diferença entre os sistemas de preparo do solo.

Esta discrepância nos resultados de pesquisa demonstram que os principais desafios para o acúmulo ou manutenção da MOS em PD pode estar na escolha da sequência de cultivos na rotação de culturas e no balanço de N do sistema adotado, o que precisa ser melhor investigado e quantificado.

Considerando que a MOS apresenta em geral uma relação C:N estável, variando ao redor de 10-12, independentemente das condições edafoclimáticas e da vegetação, pode-se deduzir que somente será possível aumentar o conteúdo de MOS, ou o sequestro de C, quando

o sistema apresentar um balanço positivo de N no solo (URQUIAGA et al., 2008). Desta forma, pode-se dizer que, entre os principais nutrientes, o N é essencial para o acúmulo de C nos solos agrícolas (JANTALIA et al., 2006a; URQUIAGA et al., 2005b; URQUIAGA et al., 2008). Entretanto, em vários trabalhos que tratam do sequestro de C no solo (LAL, 1997; SÁ et al., 2001) pouca ou nenhuma atenção foi dada a esta questão. Somente nos últimos anos o N vem sendo considerado como elemento chave no acúmulo de C no solo (SISTI et al., 2004; DIEKOW et al., 2005; CHRISTOPHER e LAL, 2007). Acredita-se que, justamente pelo desconhecimento deste fenômeno, muitos sistemas de manejo do solo, inclusive o PD, onde grandes quantidades de resíduos ingressam no solo, não têm produzido os resultados de sequestro de C esperados (JANTALIA et al., 2007; SISTI et al., 2004; URQUIAGA et al., 2005b).

Os ciclos de C e N estão intimamente ligados: a disponibilidade de C no solo a partir de exsudados de raízes e de MOS pode conduzir a processos microbianos que resultam na liberação de N no solo, em forma disponível para as plantas (JACKSON et al., 2008). O ciclo de N no solo é impulsionado pela MOS, que contém aproximadamente 50% de C e 5% de N, dos quais tipicamente <5% em forma lábil (JACKSON et al., 2008). A disponibilidade de N no solo é controlada pelos processos microbianos de mineralização e imobilização, os quais dependem basicamente da relação C:N e da composição bioquímica dos resíduos culturais em decomposição (HEINZMANN, 1985; MARY et al., 1996). Segundo Christopher e Lal (2007), há um equilíbrio entre esses dois processos quando a relação C:N dos resíduos culturais situa-se em torno de 30. Uma vez que a relação C:N da MOS varia de forma estável ao redor de 10-12, independente do tipo de solo, cada 10-12 unidades de C que se mineralizam até CO₂ liberam uma unidade de N na forma mineral (SISTI et al., 2004). Pode-se dizer que do ponto de vista quantitativo, o sequestro de C do solo depende do conteúdo de N no sistema (URQUIAGA et al., 2010). Assim, quando a disponibilidade de N for baixa, a mineralização do C dependerá do N do solo apenas, promovendo um esgotado de C no solo com o passar dos anos (RECOUS et al., 1995).

Quanto maior quantidade de N, principalmente na forma orgânica que ingresse ao solo via resíduos de colheita, maiores serão as possibilidades de acúmulo de C organicamente combinado no solo (URQUIAGA et al., 2010). Sisti et al. (2004) concluíram que a inclusão de uma leguminosa na rotação de culturas foi responsável pelo aumento na acumulação de C no solo apenas no PD, porque este consórcio, além de apresentar uma produção de fitomassa maior que as outras rotações, beneficiou a incorporação de MOS. No entanto, existem ainda muitas lacunas a serem preenchidas para que haja entendimento sobre a contribuição dos resíduos de culturas para o estoque de C.

De forma geral e independente dos fatores climáticos, os resíduos de leguminosas são decompostos mais rapidamente que os de gramíneas (AITA, 1997). Em cultivos agrícolas apenas a presença da soja como leguminosa não promove acúmulos de C no solo, mesmo quando adubada com N (RUSSELL et al., 2005), enquanto a utilização de leguminosa como de adubo verde promoveu incremento no C do solo (BODDEY et al., 2010). As avaliações realizadas por Studdert e Echeverria (2000) sobre os efeitos da rotação demonstraram que a quantidade de Corg aumentou quando não havia soja na rotação. Segundo estes autores a soja produz menos biomassa e, portanto, menos resíduo de colheita é devolvido ao solo do que o milho, além de possuir degradação mais rápida e de deixar um balanço de N negativo no solo. Verma et al. (2005) dizem que a produtividade primária de C é diferente entre uma gramínea e uma leguminosa durante o seu ciclo. Johnson et al. (2007) ressaltam que a qualidade do resíduo pode alterar a transição de C nas frações da MOS.

A dinâmica dos resíduos é complexa e depende de uma série de características da planta, como relação C:N, teor de lignina e relação lignina:N (AITA e GIACOMINI, 2003). De acordo com Zhang et al. (2008), esses fatores, em conjunto, representaram mais de 70% da

variação da taxa de decomposição dos resíduos. No Brasil, Lovato et al. (2004) observaram, em experimento no RS, uma relação positiva entre o aumento da dose de N fertilizante e a produção de biomassa, e que o aumento da produção de biomassa estava relacionado com o aumento dos níveis C no solo. No entanto, a rotação que utilizava leguminosa com adubo nitrogenado apresentou um maior estoque de C no solo.

O aumento da quantidade de N por sua vez pode aumentar a taxa de decomposição do resíduo (ZOTARELLI, 2005; KOCHSIEK et al., 2009) e, portanto, causar um impacto negativo sobre C no solo. A aplicação da adubação nitrogenada também tem um efeito sobre a taxa de decomposição da MOS. Revisando este assunto, Fog (1988) concluiu que a adição de N não teve efeito sobre a decomposição da MOS. Da mesma forma, Carpenter-Boggs et al. (2000) observaram maiores efeitos na mineralização da MOS quando não houve adição de fonte de N comparado ao tratamento onde o N foi aplicado.

O sistema radicular tem muitas funções essenciais nas plantas, dentre as quais se destacam a absorção de água e nutrientes ao solo e o estabelecimento de interação com organismos do solo. Os sistemas radiculares acrescentam quantidades significativas de C ao solo em suas mais diversas formas, a qual é independente da quantidade estocada nos seus tecidos e disponibilizada após a colheita ou morte da planta. Ilustrando este aspecto, Venzke Filho et al. (2004) observaram em LATOSSOLO VERMELHO ESCURO sob sistema PD em Tibagi, PR, que as raízes influenciaram na distribuição espacial da população microbiana durante o ciclo vegetativo do milho e da soja.

Vários autores (SPEHN et al., 2000; SCHERER-LORENZEN et al., 2003; BARTELT-RYSER et al., 2005) dizem que a leguminosa promove um efeito positivo na biomassa microbiana, devido a uma alta qualidade dos resíduos, o que significa baixa relação C:N. Chen et al., 2008, demonstraram que, em experimento em casa de vegetação com leguminosa, trevo (*Trifolium repens*) e alfafa (*Medicago sativa*), apresentaram uma maior biomassa microbiana, de bactérias e fungos, diferindo-se das gramíneas, sorgo (*Sorghum sudanense*) e festuca (*Festuca arundinacea*). Os mesmos autores indicam duas hipóteses para esse resultado, a primeira, que as leguminosas apresentam uma menor relação C:N na raiz. A segunda explicação poderia ser que a maior taxa de exsudação radicular seja em leguminosas em comparação com não leguminosa ou, então um tipo específico de exsudados radiculares das leguminosas (por exemplo, flavonóides) ((MARTIN, 1971; MATHESIUS, 2001 citado por CHEN et al., 2008).

Johnson et al. (2007) observaram que resíduos de raiz de milho tiveram uma meia-vida maior do que raízes de soja, assim como suas partes aéreas. Eles afirmaram que recalcitrância química e não a relação C:N, parece ser a causa da maior contribuição do C da raiz de milho para o aumento do CO₂, em comparação com a soja. Além disso, a quantidade de biomassa radicular devolvido ao solo pelo milho é tipicamente três vezes maior do que a da soja (BUYANOVSKY e WAGNER, 1986). Johnson et al. (2007) concluíram que devido ao seu sistema radicular grande e extenso, e sua menor taxa de degradação, o milho tem o potencial de acumular mais C do que de soja. No entanto, não podemos esquecer que a MOS estabilizada não é apenas C, mas também outros elementos que fazem parte da sua composição, principalmente o N, além de S e P. A contribuição direta e/ou indireta dos ácidos orgânicos que são liberados pelas raízes, incrementando a atividade da biomassa microbiana, e o estoque de C e N no solo, respectivamente, reforça a idéia de que se deve dar uma maior importância ao papel das raízes na preservação ou aumento da MOS.

3. CAPÍTULO I

INFLUÊNCIA DA LEGUMINOSA UTILIZADA COMO ADUBO VERDE NO ESTOQUE DE CARBONO E NITROGÊNIO DO SOLO SOB PLANTIO DIRETO E CONVENCIONAL

3.1. RESUMO

A utilização de sistema não conservacionista pode reduzir as taxas de acúmulo ou provocar a redução dos estoques de carbono (C) e nitrogênio (N) total no solo. Diversos trabalhos já demonstraram os benefícios da utilização de leguminosas como adubo verde no aumento da produtividade. Resultados recentes mostram que sob plantio direto a inclusão da leguminosa pode também promover um incremento de matéria orgânica no solo. A hipótese deste estudo foi que sob plantio direto a quantidade de matéria orgânica do solo aumenta com o passar dos anos quando se utiliza uma rotação de culturas adequada, principalmente quando uma leguminosa antecede o plantio de gramínea com alto potencial de produção de biomassa. O presente trabalho teve como objetivo avaliar o potencial de diferentes rotações de culturas no acúmulo e/ou a manutenção de carbono e nitrogênio no solo em sistemas agrícolas sob plantio direto ou convencional, na região sul do Brasil. O trabalho foi realizado em Londrina, PR, em Latossolo Vermelho. Os tratamentos consistiram em dois sistemas de manejo de produção, plantio direto (PD) e plantio convencional (PC), sob e três rotações de cultura durante quatorze anos: PD1 (soja/tremoço-milho/aveia- soja/trigo); PD2 (soja/tremoço-milho/tremoço - soja/trigo) e PD3 (milho/trigo – milho/aveia – soja/trigo). Neste experimento, foram avaliadas as safras dos anos de 1997, 2000, 2003 e 2009. Foram avaliados os estoques de carbono e nitrogênio no solo a 80 cm de profundidade. Para a quantificação do N foi realizado o cálculo do balanço deste elemento por cada rotação (entrada e saída de N). No ano de 2011 em diferentes rotações de cultura foram realizadas coletas da parte aérea e do sistema radicular na safra de verão (milho) e inverno (aveia-preta) sob plantio direto nas rotações PD1 e PD3. Os rendimentos de grãos foram superiores no PD de soja e sob PC para o milho, na rotação com a menor frequência de leguminosas. Quando comparados os estoques de C no solo entre 1997 e 2009 não foram observados aumentos no solo sob PD e sim uma perda de C, de 19 Mg C ha⁻¹ após 12 anos de PC. Perdas significativas de C e N do solo foram registradas na rotação onde tremoços foram cultivados com mais frequência e a aplicação do fertilizante nitrogenado para o milho foi suspenso, o que resultou em um saldo negativo de N para o sistema. A quantidade de biomassa de raiz total correlacionou-se com o estoque de C e N no solo. Os resultados ressaltam a importância do PD para melhorar a FBN para o sistema e a necessidade de reconhecer o balanço de N como um fator chave de mudanças nos estoques de C dentro do solo. Além disso, esses resultados sugerem que o PD evitou maiores perdas de C ao invés de aumentar os estoques de C do solo.

Palavras-chave: Preparo do solo. Adubação verde. Sequestro de C no solo. Rendimento de grãos.

3.2. ABSTRACT

The use of conventional plough tillage in grain production can reduce accumulation rates or cause a reduction carbon stocks and total nitrogen in the soil. Several studies have shown the benefits of using legumes in increasing productivity. Recent results show that under no-tillage the inclusion of legumes may also promote increase in soil organic matter. The hypothesis of this study was that under no-tillage the amount soil organic matter increases over the years when a legume crop is grown before a cereal crop with a high potential for biomass production. This study aimed to evaluate the potential of the different crop rotations in their capacity to accumulate and/or maintain the carbon and nitrogen in the soil under systems no-tillage or conventional plough tillage, in southern Brazil. The study was conducted in Londrina, Paraná State. The soil type was a Rhodic Ferralsol. The treatments consisted of two management systems, no-tillage (NT) and conventional tillage (CT) and three crop rotations, for fourteen years: NT1 (soybean / maize-lupine / oat-soybean / wheat), NT2 (soybean / maize-lupine / lupine - soybean / wheat) and NT3 (maize / wheat - maize / oats - soy / wheat). In this experiment, we evaluated the stocks of the carbon and nitrogen in the soil at 80 cm depth and the calculation of the N balance for each rotation (N input and output) in the years 1997, 2000, 2003 and 2009. In the year 2011 in different crop rotations the shoot and roots in the summer crop (maize) and winter (oat) under no-tillage and rotations in PD1 and PD3 were collected. Grain yields were higher in PD with soybean and under CT for maize in rotation with the lowest frequency of legumes. When compared the soil C stocks among the period 1997 and 2009 increases there were not observed in the PD soil, instead of that a loss of C was observed, 19 Mg C ha⁻¹ after 12 years of PC. Significant losses of soil C and N were observed in the rotation where lupins were planted when fertilizer nitrogen application for maize was suspended, resulting in larger negative N balance for the system. The amount of root biomass correlated with the stock of C and N in the soil. The results point out the importance of the PD to improve the BNF for the system and the need to recognize the N balance as a key factor in changes in soil C stocks. Furthermore, the results suggest that PD prevented larger losses of C instead of increasing the stocks of C of the soil.

Key words: Soil tillage. Green manure. Soil C sequestration. Grain yield.

3.3. INTRODUÇÃO

A conservação e acúmulo de C no solo são de grande interesse científico e político para a mitigação dos gases do efeito estufa que contribuem para o aquecimento global (FRANZLUEBBERS e STUEDEMANN, 2009). Nos últimos anos tem sido observada uma explosão de estudos sobre a ecologia dos processos do ciclo biogeoquímico do C em solos. Estes estudos incluem investigações sobre os efeitos das plantas e da rizosfera na respiração do solo, efeitos de comunidades microbianas do solo na produtividade da planta e do *turnover* de C no solo, e as interações desses efeitos na ciclagem de nutrientes do solo (CHAPIN III et al., 2009). Esse interesse surgiu devido aos solos absorverem e emitirem gases de efeito estufa como o dióxido de carbono (CO₂), metano (CH₄) e outros, além de corresponder a um importante reservatório de C global (IPCC, 2007).

De todos os sistemas de preparo do solo, o convencional com arado ou grade produz as maiores perdas de C_{org} do solo, através da maior intensidade de revolvimento do mesmo (GENTIL et al., 1993). O estoque de C_{org} dos solos em ecossistemas naturais é altamente susceptível a variações em função do manejo da terra (HOUGHTON, 2003). Os estoques de C no solo geralmente são reduzidos logo após a conversão de sistemas naturais para agroecossistemas (MURTY et al., 2002; LAL, 2003), principalmente pelo aumento da taxa de decomposição em função do preparo mecanizado (SCHIMEL, 1995; PAZ-GONZÁLEZ et al., 2000) e da erosão do solo (LAL, 2003).

Acreditava-se que distúrbios causados pela agricultura fossem a causa primária da perda de C no solo (BAKER et al., 2007) uma vez que a aração e a gradagem são as principais práticas agrícolas que estimulam a ação microbiana sobre a MOS e resíduos vegetais pelo aumento da aeração. Segundo Costa et al. (2008) o maior contato solo/resíduos e ruptura dos agregados do solo, expondo o material orgânico lábil favorece a perda de C no solo. Na última década, tem prevalecido o consenso de que a mudança do sistema de PC para o sistema PD poderia conduzir a acúmulo de C no perfil do solo (BAYER et al., 2000; WEST e POST, 2002; LAL, 2003; LAL et al., 2003; SISTI et al., 2004). Estudos sobre o conteúdo de MOS, em áreas sob diferentes sistemas de preparo do solo e rotações de culturas, têm demonstrado resultados positivos do PD, quando são incluídas plantas de cobertura, principalmente leguminosas para adubação verde nas rotações (BAYER et al., 2000; PILLON, 2000; LOVATO et al., 2004; SISTI et al., 2004; DIEKOW et al., 2005, BODDEY et al., 2010).

Como a MOS é um dos fatores chave para a fertilidade dos solos nas condições edafoclimáticas tropicais, o PD pode ser a solução para a sustentabilidade da produção agrícola (BODDEY et al., 1997). No entanto, existe a necessidade de uma avaliação adequada dos impactos dos sistemas de produção sobre o ambiente, para que seja possível a recomendação de práticas que mantenham os níveis de produtividade e que proporcionem o mínimo impacto ambiental ao longo do tempo (JANTALIA et al., 2006). Neste contexto, torna-se necessário compreender as consequências das mudanças na cobertura do solo e os seus efeitos nos ecossistemas globais visando à utilização sustentável do solo e assegurar a produção de alimentos para as populações.

A hipótese é de que sob plantio direto a quantidade de matéria orgânica do solo aumenta com o passar dos anos se a rotação de culturas é adequada, principalmente quando a leguminosa antecede plantio de gramínea com alto potencial de produção de biomassa.

O objetivo foi avaliar o potencial de diferentes rotações de culturas no acúmulo e/ou a manutenção de C e N no solo em sistemas agrícolas sob PD e PC, na região Sul do Brasil.

3.4. MATERIAL E MÉTODOS

3.4.1. Localização do experimento

O experimento foi instalado na Estação de Campo do Centro de Pesquisa da Embrapa Soja, no município de Londrina – PR, localizado nas coordenadas geográficas de 23° 23'S e 51° 11'W e 600 m de altitude. O solo é classificado como LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico.

O clima da região é classificado como subtropical, tipo Cfb (classificação climática de Köppen), temperatura média anual de 20,7°C e precipitação média anual de 1622 mm. Os eventos de precipitação e as oscilações de temperatura e umidade atmosférica foram registrados diariamente por uma estação meteorológica automática instalada próxima à área experimental (Figura 1), onde foram observadas variações no regime de chuvas durante os anos de experimentação.

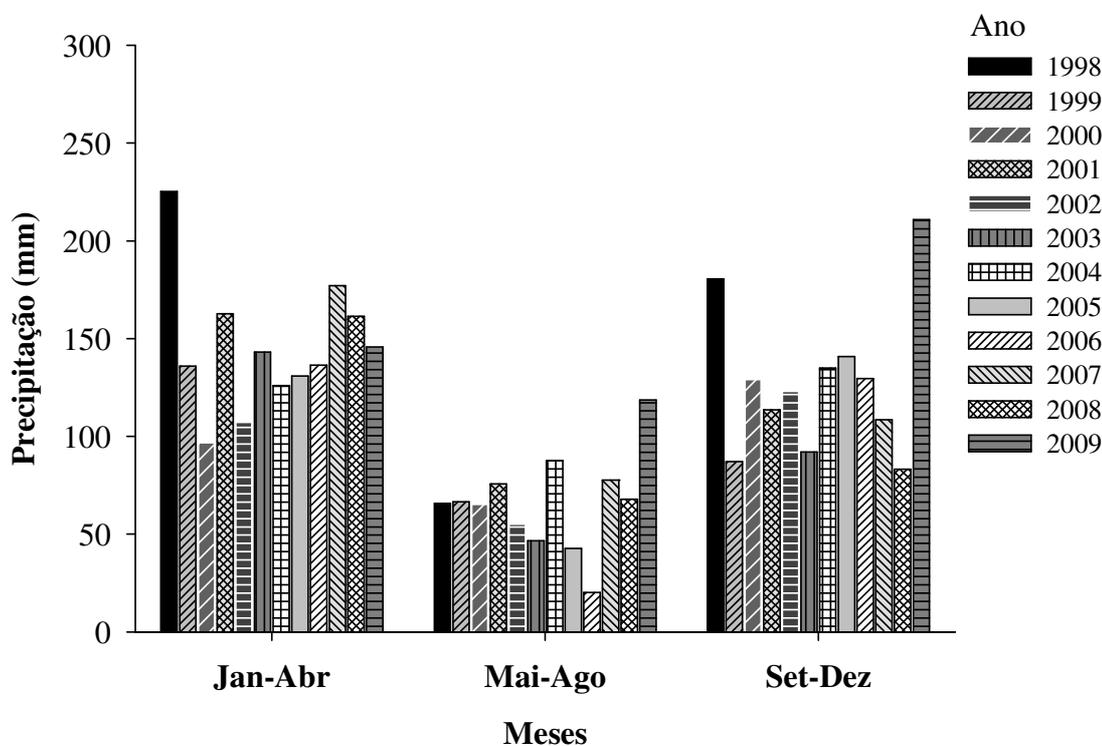


Figura 1. Índices pluviométricos mensais (mm) registrados no município de Londrina, PR, no período de janeiro de 1998 a agosto de 2009. Fonte: Embrapa Soja.

As culturas de verão são plantadas a partir de novembro até meados de dezembro e são colhidas em março ou abril. Este período recebe a maior parte das chuvas e as temperaturas são mais elevadas, podendo chegar a 40/41°C.

3.4.2. Histórico da área experimental

A vegetação nativa da região é constituída por floresta semidecídua tropical, mas não há registro de quando a área foi convertida para a agricultura. Antes do experimento, a área havia sido cultivada com café (*Coffea arabica* L.) durante cerca de 40 anos, e toda a área havia recebido um manejo e quantidade de insumos semelhante (FRANCHINI et al., 2012). A instalação do experimento começou no ano de 1989 e a partir de 1991 a soja e o trigo foram cultivados de forma contínua, no verão e no inverno, respectivamente, sob sistema de PC. No

PC o preparo do solo envolve uma aração com arado de discos e duas passadas de grade aradora.

A partir da safra de inverno de 1995, as áreas foram divididas em duas faixas para instalação dos sistemas de preparo do solo: 1) Plantio direto (PD), 2) Plantio convencional (PC) (Figura 2). Neste momento, foram adicionadas as culturas do milho, no verão, e aveia preta ou tremoço branco para o inverno, junto com as rotações de culturas que já existiam, soja (verão) e trigo (inverno). No PC, o solo é preparado no verão, com arado e grade niveladora e, no inverno, com grade aradora e grade niveladora. No PD não houve revolvimento do solo além do realizado pelos discos de corte nas linhas de semeadura.

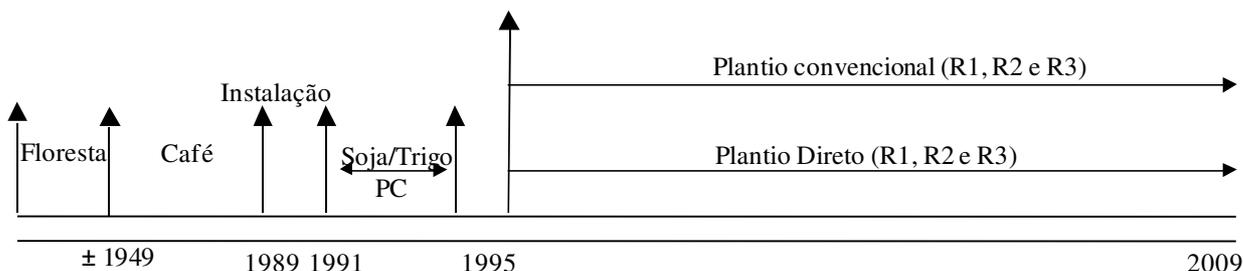


Figura 2. Esquema da descrição da área experimental de Londrina.

A área experimental foi subdividida em diferentes sistemas de rotação de cultura descritos na Tabela 1, constituídos das seguintes culturas de grãos: trigo (*Triticum aestivum* L.), soja (*Glycine max* L.), milho (*Zea mays*); e plantas de cobertura: aveia preta (*Avena strigosa*), tremoço branco (*Lupinus albus*) e no ano de 2009 foi plantado nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.) devido a falta a disponibilidade de sementes das culturas de aveia preta e tremoço.

A rotação de culturas de 3 anos, soja/trigo - soja/tremoço - milho/aveia preta (verão/inverno) instalada no verão 1997/98 foi avaliada em parcelas sob PD e PC em delineamento de blocos ao acaso com 4 repetições (Tabela 1). No final de 1998, três tratamentos diferentes foram estabelecidos (rotações 1, 2 e 3 - R1, R2 e R3 sob PD e PC). Esta rotação de culturas foi praticada até março de 2000, e desde então a frequência de cada espécie de cultura deixou de ser regular (Tabela 1).

Nas safras de verão, a R1 foi explorada principalmente com soja e milho a cada dois ou três anos. As culturas de inverno foram trigo e aveia preta, com tremoço branco a cada 3 ou 4 anos. Para a rotação R2, a soja e o milho foram alternados com mais frequência no verão, embora o milho tenha sido mais frequente, especialmente na última metade do período experimental. O tremoço branco foi cultivado com mais frequência no inverno, sempre precedendo os cultivos de milho. A terceira rotação de culturas, R3, foi composta apenas de espécies de gramíneas, desde 2000, sendo a cultura do milho utilizada apenas no verão. A intensa seca que ocorreu no inverno de 2006 provocou a germinação e crescimento irregulares das plantas, e a área permaneceu em pousio com algumas plantas espontâneas.

Nos últimos 10 anos, a rotação R1 (rica em leguminosas) teve 4 plantios de leguminosas (adubo verde) e 7 plantios de soja. No mesmo período, a rotação R3 (pobre em leguminosas) teve apenas um plantio de soja.

Tabela 1. Sequência e identificação de culturas plantadas em três diferentes sistemas de rotação no PC e PD por estação em cada ano (1989 a 2009).

| Ano | Período | Plantio Direto e Convencional | | |
|---------------|-------------------|-------------------------------|-----------------|----------------|
| | | Rotação 1 | Rotação 2 | Rotação 3 |
| 1994/1995 | Inverno/ Verão | Soja/Trigo | Soja/Trigo | Soja/Trigo |
| 1995 | Inverno | Tremoço-branco | Tremoço-branco | Tremoço-branco |
| 1995/1996 | Verão | Milho | Milho | Milho |
| 1996 | Inverno | Aveia-preta | Aveia-preta | Aveia-preta |
| 1996/1997 | Verão | Soja | Soja | Soja |
| 1997 | Inverno | Aveia-preta | Aveia-preta | Aveia-preta |
| 1997/1998 | Verão | Milho | Soja | Soja |
| 1998 | Inverno | Aveia-preta | Tremoço-branco | Trigo |
| 1998/1999 | Verão | Soja | Milho | Soja |
| 1999 | Inverno | Trigo | Aveia-preta | Tremoço-branco |
| 1999/2000 | Verão | Soja | Soja | Milho |
| 2000 | Inverno | Tremoço-branco | Trigo | Aveia-preta |
| 2000/2001 | Verão | Milho | Soja | Milho |
| 2001 | Inverno | Aveia-preta | Tremoço-branco | Trigo |
| 2001/2002 | Verão | Soja | Milho | Milho |
| 2002 | Inverno | Aveia-preta | Tremoço-branco | Aveia-preta |
| 2002/2003 | Verão | Soja | Milho | Milho |
| 2003 | Inverno | Trigo | Trigo | Trigo |
| 2003/2004 | Verão | Soja | Soja | Milho |
| 2004 | Inverno | Tremoço-branco | Aveia-preta | Aveia-preta |
| 2004/2005 | Verão | Milho | Soja | Milho |
| 2005 | Inverno | Aveia-preta | Trigo | Trigo |
| 2005/2006 | Verão | Soja | Milho | Milho |
| 2006 | Inverno | Pousio | Pousio | Pousio |
| 2006/2007 | Verão | Milho | Milho | Milho |
| 2007 | Inverno | Aveia-preta | Tremoço-branco | Trigo |
| 2007/2008 | Verão | Soja | Milho | Milho |
| 2008 | Inverno | Aveia-preta | Tremoço-branco | Aveia-preta |
| 2008/2009 | Verão | Soja | Milho | Milho |
| 2009 | Inverno | Nabo forrageiro | Nabo forrageiro | Trigo |
| 2009/2010 | Verão | Milho | Milho | Milho |
| 2010 | Inverno | Tremoço | Tremoço | Aveia-preta |
| 2010/2011 | Verão | Milho | Milho | Milho |
| 2011 | Inverno | Aveia-Preta | Tremoço | Aveia-Preta |
| TOTAL | Tremoço | 3 | 6 | 2 |
| (Referente ao | Aveia | 8 | 4 | 6 |
| ano entre | Trigo | 2 | 3 | 6 |
| inverno de | Soja | 9 | 6 | 3 |
| 1995 e 2009) | Milho | 5 | 8 | 11 |
| | Pousio | 1 | 1 | 1 |
| | Nabo | 1 | 1 | 0 |

O delineamento experimental foi um fatorial de 3X2X4, três rotações de culturas por dois tipos manejo do solo, dispostos em blocos casualizados com quatro repetições, com diferentes profundidades de amostragem. A área útil de cada parcela experimental compreendeu 76,8 m², conforme ilustrado pela Figura 3.

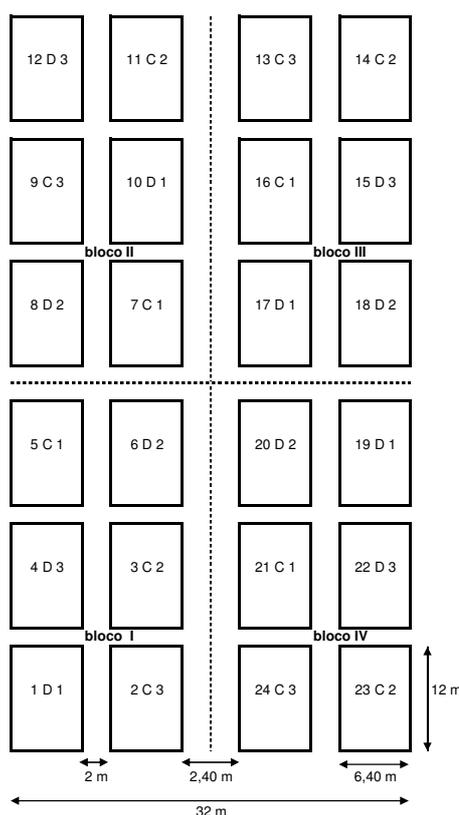


Figura 3. Esquema do delineamento experimental em blocos casualizados, na área experimental da Embrapa Soja. Manejo do solo sob sistema plantio direto (PD) e plantio convencional (PC), nas rotações de culturas R1 (milho/aveia-soja/aveia-soja/nabo forrageiro); R2 (milho/tremçoço – milho/tremçoço - milho/nabo forrageiro) e R3 (milho/trigo – milho/aveia – milho/trigo) em Londrina, PR.

3.4.3. Detalhes da condução da área experimental

Independente da rotação de culturas, em todas as parcelas e plantio de soja e milho foram adubadas com uma média de 20 kg de P_2O_5 e 37 kg de K_2O ha^{-1} na forma de superfosfato simples e cloreto de potássio, respectivamente. As sementes de soja foram inoculadas com inoculante comercial de *Bradyrhizobium* spp. Parcelas cultivadas com milho em R3 também receberam 40 kg N ha^{-1} de na forma de uréia no plantio e 40 kg N ha^{-1} em cobertura aos 45 dias após o plantio. Quando o milho foi semeado após o tremçoço, não foi realizada a adubação. As exceções foram para R2 quando a cultura do milho foi semeada após o tremçoço, adubado com 80 kg N ha^{-1} , em 1998/99 e 2001/02. O mesmo ocorreu em 2000/01 para R1. O trigo foi a única cultura de inverno adubada com N, P e K (60 kg N ha^{-1} , 14 kg P_2O_5 ha^{-1} e 23 kg K_2O ha^{-1}). Inseticidas e fungicidas foram aplicados às sementes, tais como recomendados na região.

As culturas de inverno foram semeadas a partir do final de abril até maio e foram colhidas em agosto/setembro. Os adubos verdes foram plantados sempre no inverno e geralmente cortados em meados do estágio de floração. A densidade de plantio de soja foi de 18 plantas por metro linear (18 pl m^{-1}), com um espaçamento de 0,45 m entre linhas. A densidade do milho foi de 5 pl m^{-1} linear com 0,90 m de espaço entre linhas; a densidade do trigo e aveia preta foi de 60 pl m^{-1} com 0,18 m de espaço entre linhas; tremçoços, 14 pl m^{-1} com 0,45 m de espaçamento entre linhas.

As colheitas dos grãos de soja e trigo foram realizadas mecanicamente, enquanto o milho foi colhido manualmente. Um cortador de silagem foi utilizado para fragmentar os resíduos da parte aérea do milho na área após a colheita. Os rendimentos foram calculados a partir dos 40 m² de área interna de cada parcela. No caso dos adubos verdes, um rolo faca foi usado para cortar a biomassa da aveia preta no estágio de grão leitoso e o tremoço branco em fase de pleno florescimento.

3.4.4. Característica física e química da área experimental

Na Tabela 2 encontram-se os valores das médias de densidade do solo, referentes aos quatro anos em que foram feitas amostragens, 1997, 2000, 2003 e 2009, nos sistemas de plantio direto e de plantio convencional. Para os anos 2003 e 2009, os valores de 0-20 cm são médias ponderadas calculadas a partir de valores de densidade das profundidades 0-5, 5-10, 10-20 cm nas diferentes rotações.

Foram utilizados para coleta anéis de metal com volume interno de 99,8 cm³ (anéis de Kopeck). Foi feita uma trincheira para cada parcela, totalizando 16 trincheiras de 1,0 x 1,20 x 1,20 m. Amostras de terra foram coletadas em três paredes de cada trincheira. O anel foi cuidadosamente inserido, sem compactação, em cada profundidade do solo amostrada e, após a retirada do excesso de solo externamente aos anéis, o conteúdo foi transferido para sacos plásticos. No laboratório, as amostras foram colocadas para secar em estufa a 105°C, por 48 horas, para determinação do peso seco.

Tabela 2. Densidade do solo, nas diferentes profundidades, obtidos com o uso de anel de Kopeck, nos diferentes sistemas agrícolas, Londrina, PR. Os valores são as médias de dezesseis amostras, referentes a amostragens realizadas nos quatro blocos em quatro anos diferentes, mais ou menos o desvio padrão.

| Profundidade (cm) | Plantio Direto | | | Plantio Convencional | | |
|----------------------|--------------------------|------------|------------|----------------------|------------|------------|
| | R 1 | R 2 | R 3 | R 1 | R 2 | R 3 |
| | Mg m⁻³ | | | | | |
| 0-20 | 1,24 ±0,01 | 1,23 ±0,02 | 1,23 ±0,01 | 1,19 ±0,01 | 1,18 ±0,03 | 1,18 ±0,02 |
| 20-40 | 1,14 ±0,02 | 1,10 ±0,06 | 1,12 ±0,01 | 1,16 ±0,02 | 1,12 ±0,04 | 1,14 ±0,01 |
| 40-60 | 1,09 ±0,02 | 1,06 ±0,03 | 1,09 ±0,03 | 1,05 ±0,01 | 1,03 ±0,03 | 1,07 ±0,02 |
| 60-80 | 1,08 ±0,01 | 1,02 ±0,03 | 1,05 ±0,03 | 1,00 ±0,02 | 1,03 ±0,04 | 1,06 ±0,01 |

R1 (milho/aveia-soja/aveia- soja/ nabo forrageiro); R2 (milho/tremoço – milho/tremoço- milho/nabo forrageiro) e R3 (milho/trigo – milho/aveia – milho/trigo).

Na Tabela 3 estão apresentadas a granulometria dos solos obtidos por Zotarelli (2001) nas diferentes profundidades. Os teores de argila e areia total variaram de 868 a 783 g kg⁻¹ e de 43 a 22 g kg⁻¹, respectivamente, sendo que não existe alteração em profundidade e entre os tratamentos. Os teores de areia total e argila total permitiram caracterizar a textura da camada superficial como argiloso, segundo a classificação da EMBRAPA (2006).

Tabela 3. Granulometria do solo, nas diferentes camadas, nos diferentes sistemas agrícolas, Londrina, PR. Fonte: Zotarelli, 2001.

| Prof. (cm) ¹ | Argila | | Silte | | Areia | |
|-------------------------|--------|-----|-------|-----|-------|----|
| | PD | PC | PD | PC | PD | PC |
| g kg ⁻¹ | | | | | | |
| 0-5 | 783 | 798 | 179 | 168 | 34 | 38 |
| 5-10 | 797 | 798 | 164 | 180 | 22 | 40 |
| 10-20 | 844 | 793 | 123 | 177 | 30 | 33 |
| 20-30 | 845 | 818 | 126 | 147 | 35 | 29 |
| 30-40 | 851 | 844 | 108 | 117 | 39 | 40 |
| 40-50 | 850 | 824 | 118 | 142 | 35 | 33 |
| 50-60 | 868 | 844 | 106 | 113 | 43 | 27 |
| 60-80 | 783 | 798 | 179 | 168 | 34 | 38 |
| 80-100 | 797 | 798 | 164 | 180 | 22 | 40 |

¹ Valor representa a média das três rotações de cultura, R1, R2 e R3, para cada sistema de manejo, plantio direto e convencional, PD e PC.

Para a caracterização da fertilidade do solo foram feitas amostragens nas profundidades de 0-10, 10-20 e 20-30 cm, com análise dos seguintes parâmetros do solo: pH em água, Al, Ca e Mg trocáveis segundo o método do KCl, e o P e K (Mehlich-1), de acordo com EMBRAPA (1997). Os resultados da fertilidade encontram-se na Tabela 4.

Tabela 4. Características químicas do solo da área experimental, no início do experimento, 1997 e na época da amostragem. (Campo Experimental – Embrapa Soja, município de Londrina, PR).

| Fertilidade do solo | Prof. (cm) | PD1 | PC1 | PD2 | PC2 | PD3 | PC3 |
|---|--------------|------|------|------|-------|-------|------|
| pH (H ₂ O) | 0-10 | 4,72 | 5,07 | 5,32 | 5,20 | 4,48 | 5,08 |
| | 10-20 | 4,99 | 4,95 | 5,58 | 5,15 | 4,53 | 4,89 |
| | 20-30 | 5,01 | 4,99 | 5,46 | 5,38 | 4,84 | 5,00 |
| P (mg.dm ⁻³) | 0-10 | 9,43 | 4,73 | 7,58 | 10,59 | 12,94 | 6,56 |
| | 10-20 | 3,15 | 4,74 | 5,00 | 11,97 | 5,04 | 5,39 |
| | 20-30 | 3,27 | 3,48 | 3,16 | 4,65 | 3,37 | 2,94 |
| K (cmol _c .dm ⁻³) | 0-10 | 0,22 | 0,24 | 0,58 | 0,53 | 0,25 | 0,51 |
| | 10-20 | 0,14 | 0,21 | 0,62 | 0,53 | 0,31 | 0,40 |
| | 20-30 | 0,13 | 0,16 | 0,35 | 0,21 | 0,20 | 0,31 |
| Ca (cmol _c .dm ⁻³) | 0-10 | 2,25 | 2,95 | 2,34 | 3,50 | 1,68 | 2,60 |
| | 10-20 | 2,88 | 2,95 | 4,24 | 3,39 | 2,03 | 2,76 |
| | 20-30 | 3,06 | 2,79 | 3,44 | 3,57 | 3,00 | 3,09 |
| Mg (cmol _c .dm ⁻³) | 0-10 | 0,68 | 0,78 | 0,94 | 0,95 | 0,47 | 0,75 |
| | 10-20 | 0,75 | 0,75 | 1,17 | 0,97 | 0,65 | 0,75 |
| | 20-30 | 0,72 | 0,76 | 1,06 | 1,06 | 0,78 | 0,80 |

Estas determinações físicas e químicas do solo no experimento foram importantes para este tipo de estudo para constatar se o solo da área experimental pertence à mesma classe

textural, e se possui densidade e fertilidade semelhante nas profundidades, permitindo assim que as comparações dos resultados entre os tratamentos foram em função da rotação e não das características do solo.

3.4.5. Determinação do rendimento de grãos e massa seca das culturas e entrada de C e N

Para todos os anos de estudo, os rendimentos de milho, soja e trigo foram mensurados, bem como a biomassa das coberturas verdes. Para este último, não há dados para os anos de 2007 e 2008, e para o tremoço quando a produção de biomassa foi extremamente baixa, pois foi afetada por períodos de seca. Neste caso, a produção mais baixa de biomassa foi registrada no inverno de 2008, sendo considerado como rendimento zero. O rendimento de grãos foi determinado a partir da colheita de toda a parcela, sendo corrigido para 13% de umidade. Todas as colheitas e quantificações dos rendimentos em cada safra foram realizadas pela equipe da Embrapa Soja.

A produtividade de massa seca e entrada de C e N a partir de resíduos de culturas, bem como o N exportado nos grãos colhidos, foram estimadas com base nas informações obtidas a partir desta área experimental em 1998 e 1999 (Tabela 5) por Zotarelli (2001). Nestes dois anos, foram realizadas avaliações da massa de grãos e resíduo seco e dos teores de N por amostragem em cada cultura. Para as culturas de grãos, a avaliação da biomassa da parte aérea no estado de grão maduro foi realizada em dois segmentos de fileiras, com comprimento de um metro cada. O material colhido foi separado em grãos e resíduos remanescentes (folhas, caules e outros resíduos). A matéria seca acumulada pelas plantas de aveia preta e tremoço foi medida por corte e pesagem da biomassa existente em uma área de 1 m² no centro de cada parcela, seguindo os mesmos procedimentos para as culturas de cereais. A amostragem no tremoço foi realizada no estágio de florescimento e a aveia preta no estágio de enchimento de grãos. Todo o material amostrado foi seco em estufa a 65°C, pesado e moído (moinho tipo “Wiley”) e analisado para a concentração do N conforme descrito por Urquiaga et al. (1992).

Tabela 5. Produção de grãos e massa seca de residual (g m⁻²), e nitrogênio no grão e no resíduo de soja, milho, trigo, aveia preta e tremoço nas safras de 1997/98 e 1998/99 em sistema de PD e PC. Fonte: Zotarelli, 2000.

| Safras de | 1997/98 | | | | 1998/99 | | | |
|------------|-------------------|---------|----------------------|---------|-------------------|---------|----------------------|---------|
| | MS | MS | N | N | MS | MS | N | N |
| | Grão | Resíduo | Grão | Resíduo | Grão | Resíduo | Grão | Resíduo |
| Verão | g m ⁻² | | g N kg ⁻¹ | | g m ⁻² | | g N kg ⁻¹ | |
| Soja PD | 589 | 794 | 54,6 | 8,8 | 451 | 678 | 64,0 | 9,3 |
| Soja PC | 541 | 702 | 61,0 | 9,7 | 438 | 697 | 63,5 | 9,4 |
| Milho PD | 431 | 686 | 12,8 | 8,1 | 927 | 1155 | 13,6 | 5,4 |
| Milho PC | 486 | 811 | 15,9 | 7,5 | 780 | 1132 | 13,8 | 5,2 |
| Safras de | 1998 | | | | 1999 | | | |
| | MS | MS | N | N | MS | MS | N | N |
| | Grão | Resíduo | Grão | Resíduo | Grão | Resíduo | Grão | Resíduo |
| Inverno | g m ⁻² | | g N kg ⁻¹ | | g m ⁻² | | g N kg ⁻¹ | |
| Trigo PD | 246 | 392 | 23,0 | 5,8 | 253 | 378 | 23,2 | 6,1 |
| Trigo PC | 231 | 473 | 24,0 | 6,3 | 271 | 391 | 24,1 | 5,7 |
| Aveia PD | - | 612 | - | 14,5 | - | 1051 | - | 17,1 |
| Aveia PC | - | 711 | - | 17,2 | - | 977 | - | 14,8 |
| Tremoço PD | - | 944 | - | 28,6 | - | 1048 | - | 29,4 |
| Tremoço PC | - | 1120 | - | 28,1 | - | 1011 | - | 29,7 |

A partir dessas análises, a média de concentração de N na planta inteira e nos grãos foi determinada. O C dos resíduos e os índices de N na planta foram desenvolvidos para estimar o

C e o N total nos resíduos das culturas de grãos e plantas de cobertura com base nos dados de produtividade de grãos, a fim de estimar o retorno de C e N total para o solo no período de 1997 a 2009. O índice para a entrada de C foi estimado segundo Zotarelli (2005) como:

$$\text{C-resíduo} = \{[(\text{MSresíduo}) / (\text{MSgrãos} \times 1,13)] + [(\text{MSraízes}) / (\text{MSgrão} \times 1,13)]\} \times 0,45 ;$$
 onde, MS resíduo, MS raízes e MS grãos são matéria seca de resíduos de parte aérea, raízes e matéria seca de grãos, respectivamente.

O peso de grãos foi corrigido para 13% de umidade, e assumiu-se a concentração de C nos resíduos de colheita de 450 g kg⁻¹ de matéria seca. Para a soja e o milho, as relações da quantidade de matéria seca de raiz para a produção de grãos foram obtidas a partir da coleta de raízes a 1 m de profundidade nas mesmas parcelas desta área experimental em 2006 por Bordin et al. (2008). A relação de raízes/rendimento de grãos foi obtida para o milho e usada para o trigo, por não haver outra informação disponível para este último. Para o tremoço a matéria seca de raízes foi estimada com base em dados de McNeill e Fillery (2008), que estimou a quantidade de N na raiz de tremoço como sendo 32% de todo o N da planta no estágio de máximo acúmulo de biomassa, no estágio de florescimento, com uma relação C:N de aproximadamente 25. Foi assumido que a matéria seca da raiz de aveia preta representa 20% da matéria seca da parte aérea das plantas também no estágio de enchimento de grãos.

O conteúdo de N total das plantas foi desenvolvido a partir da matéria seca do resíduo e o respectivo teor de N de cada material. Neste caso, o N da raiz para a soja e o milho foi obtido a partir de Bordin et al. (2008). A estimativa do teor de N na raiz (36-38 kg N ha⁻¹) de soja relatado por estes autores correspondeu a aproximadamente 21 e 23% do total de N acumulado no momento da colheita, um valor muito semelhante à estimativa de Rochester et al. (1998), correspondente a 24% em um estudo realizado em New South Wales, Austrália. A concentração de N das raízes para o trigo e aveia preta foram os mesmos do calculado para o milho. Foi utilizada a média de N estimada como 32% do N total em plantas tremoços (MCNEILL e FILLERY, 2008).

3.4.6. Cálculo do balanço de N no sistema

O balanço de N nas rotações para os dois sistemas de preparo do solo foi determinado com base nas quantidades de fertilizantes nitrogenados adicionados, o N removido em produtos (grãos de soja, milho e trigo) e da contribuição da FBN para a soja e tremoço obtida por Zotarelli (2005). Assumiu-se neste trabalho que todo o N fertilizante adicionado foi absorvido pela cultura ou permaneceu no solo. A aveia preta foi considerada neutra no balanço de N, pois não recebeu adubação nitrogenada e toda a biomassa produzida foi deixada no campo para a cobertura do solo PD ou incorporada por aração PC.

3.4.7. Concentração de C e N e avaliação de estoques C e N no solo

Os dados referentes aos anos de 1997, 2000, 2003 foram obtido por Zotarelli (2005). Para realização da amostragem nas parcelas sob PD nos anos 1997, 2000, 2003 e 2009 foram abertas trincheiras com dimensões de 1,0 x 1,20 x 1,20 m de profundidade, uma em cada parcela, e amostras de solo foram coletadas em três paredes da trincheira nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20, 20-40, 40-60 e 60-80 cm. Nas parcelas sob PC as amostragens realizadas no ano de 1997 ocorreram nas profundidades 0-20, 20-40, 40-60 e 60-80 cm, e em 2000 as profundidades foram 0-10, 10-20, 20-40, 40-60 e 60-80 cm. Em 2003 e 2009 as amostragens nas parcelas sob PC foram realizadas nas mesmas profundidades utilizadas no PD. Para uniformizar os dados foi realizado cálculo de média ponderada entre os intervalos de profundidades. Além das amostras para determinação da concentração de C e N, foram coletadas amostras indeformadas para medir a densidade do solo, como descrito por Sisti et al. (2004) para o cálculo dos estoques de C e N do solo. As amostras de solo para as análises de concentração de C e N foram acondicionadas em sacos plásticos e transportadas para o

Laboratório da Embrapa Soja, secas ao ar e passadas em peneira de 2,0 mm (terra fina seca ao ar - TFSA) e foram removidos pedras e fragmentos de raízes, para posterior execução das análises. As amostras de TFSA foram levadas para a área de preparo e recepção de amostras, na Embrapa Agrobiologia, onde sub-amostras do material foram trituradas em moinho de rolagem até a pulverização, sendo uniformizadas a partículas menores que 0,105 mm, conforme metodologia descrita por Arnold e Schepers (2004). Estas amostras foram utilizadas para determinar os teores de C e N. As amostras foram analisadas para C total usando um analisador LECO CHN-100 (Leco Corp, St. Joseph, MI) e de N total pelo método de Kjeldahl digestão/titulação (URQUIAGA et al., 1992). Todas as amostras de solo foram analisadas da mesma forma, e no mesmo aparelho.

Os estoques de C no solo foram calculados para a camada de solo de 0-80 cm. A densidade do solo foi utilizada para calcular a massa de solo presente em cada intervalo de profundidade amostrada, 0-20, 20-40, 40-60 e 60-80 cm e o excesso de massa de solo de um perfil específico foi descontado a partir do intervalo de profundidade mais profundo (60-80 cm), utilizando a massa total do solo em PD na R2 (o perfil com a menor massa de solo, PD2). Este procedimento foi expresso matematicamente por Sisti et al. (2004).

3.4.8. Amostragem e quantificação do sistema radicular

As coletas de raízes foram no ano de 2011, tendo sido aberta uma trincheira por parcela, totalizando 16, com dimensões de 1,0 x 1,20 x 1,20 m de profundidade. A primeira coleta foi realizada em fevereiro na cultura do milho e a segunda foi em agosto na cultura de aveia preta, sendo realizadas quando as culturas estavam no estágio de enchimento de grãos. Nas paredes de cada trincheira foi efetuado um acabamento com a pá reta e um gabarito de madeira, cerca de 0,5 m, para remoção do solo exposto e também de forma a deixá-las lisas e verticais (Böhm, 1979). As coletas das raízes foram feitas utilizando um monólito de metal, de 5 x 22 x 25 cm de dimensões, sendo retirado volume de raiz e solo ao mesmo tempo. As coletas foram realizadas nas profundidades de 0-22, 22-44, 44-66 e 66-88 cm.

As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos e transportadas para o Laboratório da Embrapa Soja, e no mesmo dia da coleta foram realizadas as lavagens das raízes. Os procedimentos foram baseados na técnica de decantação-flotação proposta por Schuurman e Goedewaagen (1991) e adaptada por Brasil (2001). No laboratório, a amostra de solo contendo raízes foi acomodada em balde de 10 litros, sendo adicionada água para lavagem das raízes. O material foi agitado de forma manual com o intuito de quebrar os agregados, obtendo-se um sobrenadante de raízes, que foi capturado com peneira de 1 mm. Neste processo foram excluídos pedaços de madeira, liteira, e outros materiais diferentes de raízes. O procedimento foi repetido até que se retirassem todas as raízes da amostra, conforme sugerido por Brasil (2001). A secagem do material foi feita em estufa de circulação forçada a 45°C durante 72 horas, ou até adquirir peso constante. Após a secagem foram determinados os pesos da fitomassa, em balança analítica, com precisão de duas casas decimais.

3.4.9. Análise estatística

Análises descritivas dos dados foram realizadas em tabelas ou plotados em Box-plot. Análises de variância (teste-F) foram realizadas utilizando o software SISVAR, produzido pela Universidade Federal de Lavras, Minas Gerais, para determinar os efeitos dos tratamentos sobre o rendimento de milho e soja, considerando o sistema plantio direto como um único fator; para comparar os estoques de C e N nas diferentes rotações de culturas e anos. Regressões lineares e correlações de Pearson foram calculadas para avaliar as relações entre o balanço de N e as alterações no estoque de C e N do solo. Os mesmos foram submetidos à análise de variância utilizando o software SISVAR, e teste Tukey com nível de significância de 5% ($p < 0,05$), utilizando o software SISVAR.

3.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

3.5.1. Produtividade de grãos

Durante 12 anos de cultivo, o rendimento médio de grãos de soja, milho e trigo foram, 2,42 Mg ha⁻¹, 6,81 Mg ha⁻¹ e 2,8 Mg ha⁻¹, respectivamente. Independente da rotação de culturas, as produções de soja sob PD ultrapassaram as de PC, enquanto o oposto foi observado nos rendimentos do milho, principalmente em R3 (Tabela 6). Os rendimentos do milho foram influenciados pela presença de tremoço como a cultura antecessora, assim como os rendimentos de milho não fertilizado com N, após tremoço nos anos de 2005/06 a 2008/09, em R2, foram mais elevados do que aqueles em rotação R3, onde o milho recebeu adubação nitrogenada de 80 kg ha⁻¹. Devido à precipitação insuficiente nos meses de inverno em 2004, 2007, 2008, especialmente em maio e junho (Figura 1), correspondente ao período de germinação e estabelecimento da planta, o acúmulo de biomassa de tremoço foi reduzido pela metade, de 10-13 Mg ha⁻¹ de matéria seca para de 5-6 Mg ha⁻¹ de matéria seca. A matéria seca de aveia preta também variou com os anos, mas não entre sistemas de preparo (5,5-13,2 Mg ha⁻¹). O mesmo se aplica para os rendimentos do trigo que variam de 2,4 a 3,0 Mg ha⁻¹.

Tabela 6. Rendimento médio de grãos de soja, milho e trigo (safras de 1998 a 2010), nos sistemas de plantio direto (PD) e convencional (PC) nas rotações de culturas, R1 (milho/aveia-soja/aveia-soja/nabo forrageiro); R2 (milho/tremoço – milho/tremoço – milho/nabo forrageiro) e R3 (milho/trigo – milho/aveia – milho/trigo) em Londrina, PR.

| Cultura | Soja | | | | | | Milho | | | | | | Trigo | | | | | |
|---------|---------------------|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-----|-----|-----|-----|-----|-------|-----|-----|-----|-----|-----|
| | R1 | | R2 | | R3 | | R1 | | R2 | | R3 | | R1 | | R2 | | R3 | |
| Manejo | PD | PC | PD | PC | PD | PC | PD | PC | PD | PC | PD | PC | PD | PC | PD | PC | PD | PC |
| Ano | Mg ha ⁻¹ | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 97/98 | - | - | 2,9 | 2,6 | 2,6 | 2,7 | 4,3 | 4,9 | - | - | - | - | - | - | - | - | - | - |
| 98/99 | 2,6 | 2,9 | - | - | 2,9 | 2,9 | - | - | 7,5 | 8,2 | - | - | - | - | - | - | 2,7 | 3,1 |
| 99/00 | 2,0 | 1,7 | 2,4 | 2,0 | - | - | - | - | - | - | 6,3 | 6,4 | 2,5 | 2,7 | - | - | - | - |
| 00/01 | - | - | 2,1 | 2,4 | - | - | 7,3 | 8,0 | - | - | 6,0 | 7,5 | - | - | 2,1 | 2,1 | - | - |
| 01/02 | 1,8 | 2,1 | - | - | - | - | - | - | 6,7 | 7,2 | 3,7 | 3,7 | - | - | - | - | 2,4 | 2,9 |
| 02/03 | 2,6 | 1,8 | - | - | - | - | - | - | 7,8 | 7,5 | 4,3 | 6,2 | - | - | - | - | - | - |
| 03/04 | 1,8 | 1,4 | 1,9 | 1,8 | - | - | - | - | - | - | 5,1 | 5,8 | 3,4 | 3,3 | 2,9 | 2,7 | 2,6 | 2,5 |
| 04/05 | - | - | 2,4 | 1,6 | - | - | 8,7 | 8,4 | - | - | 4,9 | 6,9 | - | - | - | - | - | - |
| 05/06 | 2,6 | 2,5 | - | - | - | - | - | - | 5,1 | 5,2 | 5,2 | 4,5 | - | - | 2,4 | 2,4 | 2,4 | 2,4 |
| 06/07 | - | - | - | - | - | - | 7,7 | 7,5 | 6,6 | 6,5 | 7,8 | 7,7 | - | - | - | - | - | - |
| 07/08 | 3,6 | 3,2 | - | - | - | - | - | - | 9,1 | 9,9 | 8,0 | 9,4 | - | - | - | - | 3,1 | 3,1 |
| 08/09 | 2,0 | 2,0 | - | - | - | - | - | - | 7,9 | 7,7 | 5,3 | 4,9 | - | - | - | - | - | - |
| 09/10 | - | - | - | - | - | - | 8,6 | 6,6 | 7,6 | 5,0 | 6,9 | 5,9 | - | - | - | - | 3,7 | 3,4 |
| Média | 2,4 | 2,2 | 2,4 | 2,1 | 2,8 | 2,8 | 7,3 | 7,1 | 7,3 | 7,2 | 5,8 | 6,3 | 3,0 | 3,0 | 2,5 | 2,4 | 2,8 | 2,9 |

A adoção da rotação de culturas sob PD e PC com maior frequência de tremoço branco como adubo verde, provocou diferenças significativas no rendimento de grãos. Por três safras diferentes (1999/2000, 2004/2005 e 2008/2009) os rendimentos de soja foram superiores no PD em relação ao PC, nos demais anos, no entanto, não houve diferença significativa. No caso do milho, a produtividade de grãos foi maior no PC comparado ao PD em algumas safras, mas na média os valores estão próximos (Tabela 6). O resíduo depositado no solo presente no sistema PD promove vários benefícios para as culturas (DERPSCH et al., 2010), alguns deles a longo prazo (estrutura do solo e mudança nos teores de MOS) e outros quase imediatos, como a redução da perda de água do solo e mudança na disponibilidade de nutrientes. Boddey et al. (1997) discutiram esses efeitos do resíduo vegetal do PD sobre a

limitação da disponibilidade de N em decorrência da imobilização do N proveniente do solo e do fertilizante aplicado às culturas de cereais como o milho, especialmente quando precedido pelo cultivo da aveia. Segundos estes autores, essa é uma situação que tende a se reverter com o tempo, especialmente quando leguminosas de adubo verde são utilizadas na rotação sob PD. Para os três primeiros anos do estudo as diferenças significativas entre PD e PC foram observadas nas três rotações na cultura do milho. Com o tempo, as diferenças foram elucidadas quando o milho foi implantado na rotação 3 (Tabela 6), onde a fonte de N foi apenas fertilizante nitrogenado. Os rendimentos do milho após tremoço como adubo verde foram similares ou superiores aos rendimentos do milho adubado com fertilizante nitrogenado (80 kg N ha^{-1}) e introduzidos depois do trigo ou, principalmente, aveia preta. Esta limitação de N provocada pela aveia preta também foi relatada por Rosolem et al. (2004), que destacaram a necessidade de altas doses de fertilizantes nitrogenados para garantir a produção de milho sob PD após aveia preta. Os sistemas de manejo não apresentaram grande influência no rendimento da soja, que se beneficiou do PD em alguns dos anos.

3.5.2. Total de entradas de C e N

O rendimento das colheitas dos grãos e biomassa acumulada por adubos verdes foram convertidos em entradas totais C e N por resíduos de culturas (Figura 4 e 5). Os estoques de C e N no solo foram computados para três períodos diferentes (1997/98 a 1999/2000; 2000-2003; 2003/04 a 2008/09) e por esta razão as entradas C e N acumulados de resíduos também foram avaliadas para os mesmos períodos.

Os resultados apresentados na Figura 4 mostraram pequenas diferenças na entrada de C acumulado de resíduos entre o PD e PC em qualquer rotação de culturas. Para o primeiro período (97/98 a 99/2000), quase 23 Mg C ha^{-1} retornaram ao solo sob a rotação R2, 21 Mg C ha^{-1} na rotação R3 e 15 Mg C ha^{-1} sob rotação R1. Para o segundo período (2000-2003), a entrada de C para as rotações R1, R2 e R3 foram cerca de 30 Mg C ha^{-1} , com apenas uma diferença de 1 Mg C ha^{-1} entre eles. Para o terceiro período, os resíduos retornados nas rotações R2 e R3 representaram 45 Mg C ha^{-1} , cerca de 7 Mg C ha^{-1} acima da entrada C acumulada para rotação R1.

A presença da soja no sistema de rotação, representou uma entrada C de $2,1 \text{ Mg C ha}^{-1}$, um pouco menos do que a contribuição obtida com os resíduos de trigo ($2,6 \text{ Mg C ha}^{-1}$). No entanto, o acúmulo de C entre anos (Figura 4) ocorreu pela deposição dos resíduos de milho ($5,8 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ safra}^{-1}$), aveia preta ($3,9 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ safra}^{-1}$) e tremoço ($6,0 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ safra}^{-1}$).

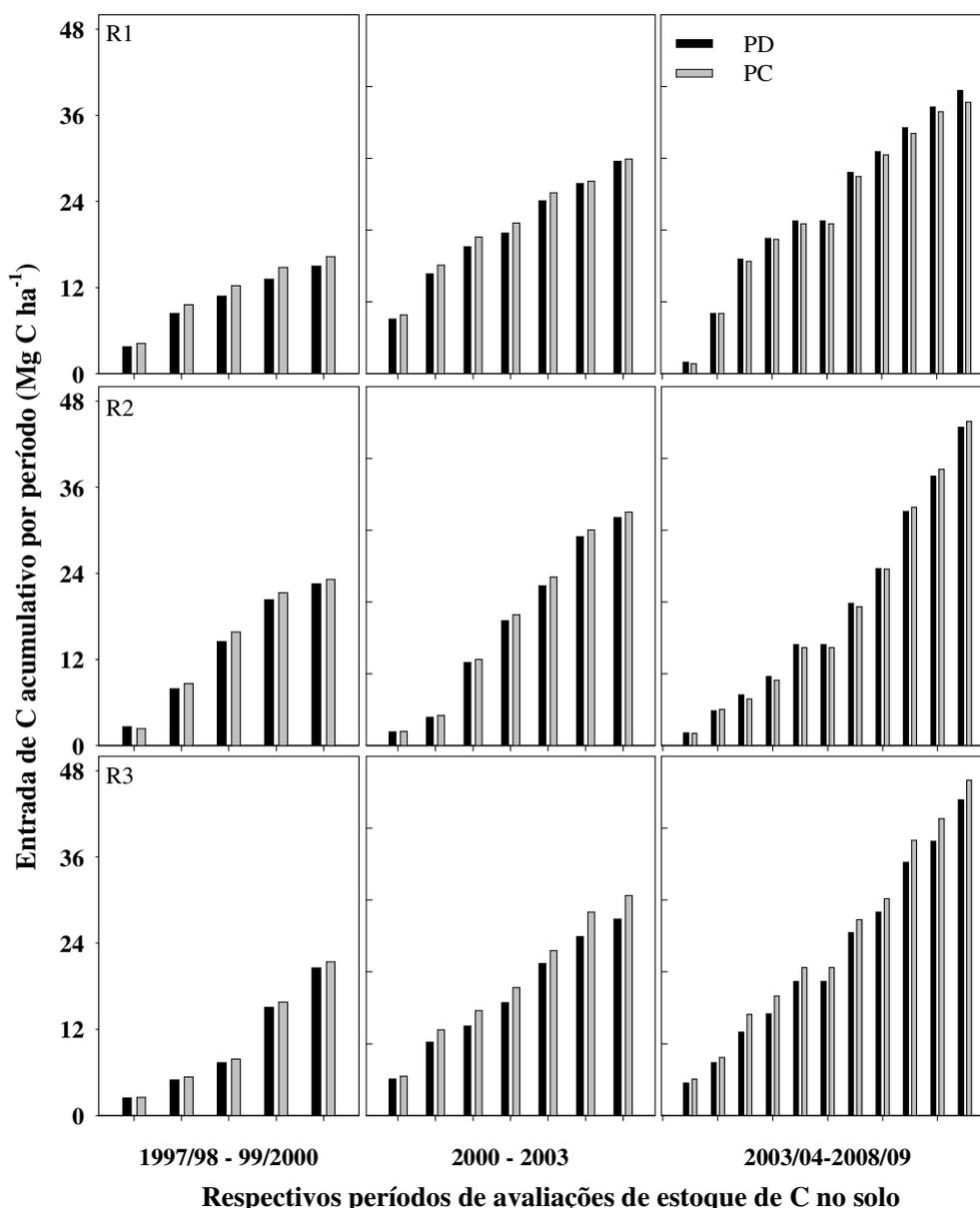


Figura 4. Entrada acumulativa de C através dos resíduos de cultura, para três períodos (97/98 a 99/2000; 2000-2003; 2003/04 a 2008/09) por 12 anos de experimento nos sistemas de plantio direto (PD) e convencional (PC) nas rotações de culturas, R1 (milho/aveia-soja/aveia-soja/nabo forrageiro); R2 (milho/tremoço – milho/tremoço - milho/nabo forrageiro) e R3 (milho/trigo – milho/aveia – milho/trigo) em Londrina, PR.

Os resultados apresentados na Figura 5 não mostraram diferenças na entrada de N acumulados de resíduos entre o PD e PC em qualquer rotação de culturas e período. Para o primeiro período (97/98 a 99/2000) quase 0,9 Mg N ha⁻¹ retornaram ao solo sob a rotação R2 em três anos, 0,6 Mg N ha⁻¹ na rotação R3 e 0,3 Mg N ha⁻¹ sob rotação R1. Nesse primeiro período a rotação R2 e R3 foram as que tiveram plantação de tremoço no inverno, aumentando assim, a contribuição do N do resíduo depositado no solo em relação ao R1 que teve somente a cultura da soja como leguminosa. Para o segundo período (2000-2003), a entrada de N para as rotações R1 e R2 foi em média de 0,94 Mg N ha⁻¹, sendo superior 70% em relação a rotação R3. Nesse segundo período a rotação R3 foi composta apenas por

gramíneas, resultando em um acúmulo de cerca $0,55 \text{ Mg N ha}^{-1}$ sob PD e PC. Para o terceiro período, os resíduos retornados nas rotações R2 e R3 representaram $0,65 \text{ Mg N ha}^{-1}$, cerca de $0,6 \text{ Mg N ha}^{-1}$ abaixo da entrada de N acumulada para rotação R1.

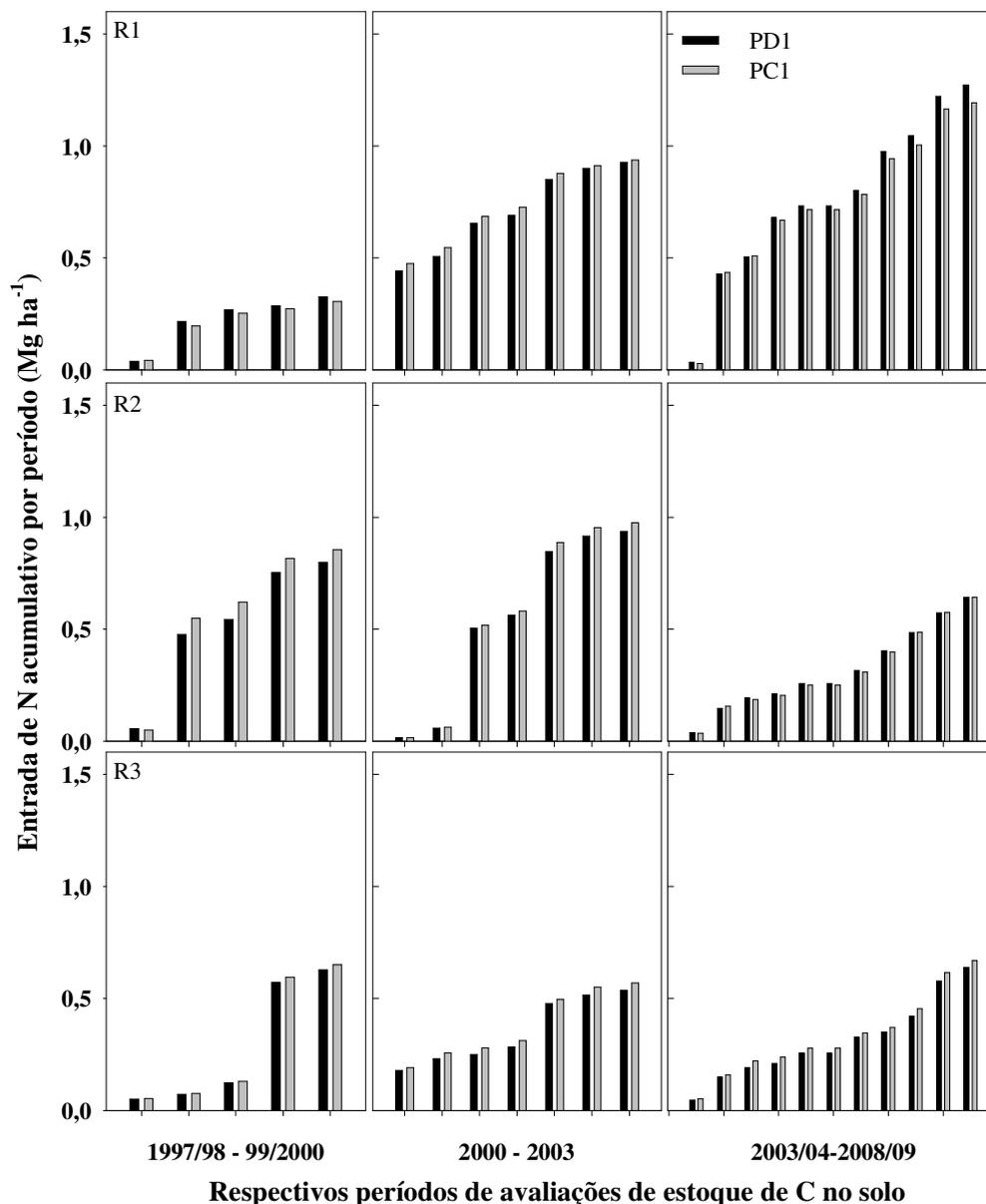


Figura 5. Entrada acumulativa de N através dos resíduos de cultura, para três períodos (97/98 a 99/2000; 2000-2003; 2003/04 a 2008/09) por 12 anos de experimento nos sistemas de plantio direto (PD) e convencional (PC) nas rotações de culturas, R1 (milho/aveia-soja/aveia-soja/nabo forrageiro); R2 (milho/tremoço – milho/tremoço - milho/nabo forrageiro) e R3 (milho/trigo – milho/aveia – milho/trigo) em Londrina, PR.

A presença da soja e milho no sistema de rotação, representou uma entrada de N de cerca $0,05 \text{ Mg N ha}^{-1} \text{ safra}^{-1}$, um pouco mais do que a contribuição obtida com os resíduos de trigo ($0,02 \text{ Mg N ha}^{-1} \text{ safra}^{-1}$). No entanto, o acúmulo de N entre anos (Figura 5) ocorreu pela deposição dos resíduos de tremoço ($0,34 \text{ Mg N ha}^{-1} \text{ safra}^{-1}$) e aveia preta ($0,16 \text{ Mg N ha}^{-1} \text{ safra}^{-1}$).

ha⁻¹ safra⁻¹). Apesar da cultura do milho contribuir pouco a cada safra na rotação R3 no final dos 12 anos de cultivos adicionou 0,65 Mg N ha⁻¹.

3.5.3. Balanço de N no sistema

Os cálculos de balanço de N foram apresentados da mesma forma adotada para os dados de entrada de resíduos de C e N, com valores acumulados para cada intervalo de amostragem do estoque de C no solo. Para o primeiro período (1997-99/2000), as entradas de N nas rotações R1 e R3 foram semelhantes às remoções de N e os saldos líquidos de N foram próximos de zero na maioria dos anos, exceto para o PC onde os saldos de N tendem a ser ligeiramente negativos, especialmente no R3 até a terceira safra (Figura 6). Em 1999, na rotação R3, a presença de trevo explica a mudança de um equilíbrio negativo para um equilíbrio positivo N (Figura 6), semelhante ao dado de N no resíduo (Figura 5). A rotação R2 apresentou um equilíbrio positivo de N no primeiro período (Figura 6), resultado do plantio de trevo em 1998, quando comparada a R3. Segundo os dados apresentados por Zotarelli (2001), a biomassa acumulada pelo trevo cultivado na rotação R2 representou uma entrada de N proveniente da FBN de 283 kg de N ha⁻¹ na safra de PD e de 298 kg N ha⁻¹ na safra sob PC, e na rotação R3, uma entrada de 303 e 278 kg N ha⁻¹ para o PD e PC, respectivamente.

No segundo período (2000-2003), os equilíbrios de N estimados para as três rotações foram todos positivos, com a presença de trevo compensando qualquer resultado líquido negativo de N proporcionado pela exportação de N nos cereais colhidos nas rotações R1 e R2 (Figura 6). Na rotação R3, o trevo não foi cultivado, o saldo positivo de N é atribuído ao fertilizante nitrogenado aplicado ao trigo e milho.

O terceiro período (2003/04 a 2008/09) foi o mais longo monitorado e apresentou balanços negativos de N para as rotações R2 e em algumas safras no R3. Enquanto que, o R1 apresentou resultado positivo na maior parte dos resultados. O trevo contribuiu com entradas significativas de N, mas as grandes quantidades de N exportadas nos grãos de trigo, milho e soja resultaram em um saldo líquido negativo calculado sobre todo o período, em especial para culturas sob PC (Figura 6).

Na rotação R2 (Figura 6), apesar de o trevo ter sido plantado em dois anos consecutivos, as entradas de N através da FBN de 95,9 e 91,8 kg N ha⁻¹ ano⁻¹ (segundo dados encontrados por Zotarelli, 2005) foram insuficientes para compensar o N exportado nos grãos de trigo, milho e de soja, que foi agravado pela não utilização da adubação com N no milho nesta rotação. No final desse período, a rotação R2 apresentou um saldo negativo de 273 N kg ha⁻¹ no PD e de 314 kg ha⁻¹ em PC.

Para a rotação R3, os saldos de N foram inicialmente positivos e apresentaram tendência a redução no final do período, mas poderia ser considerado neutro para PD e ligeiramente negativa para PC (Figura 6), sendo não significativos. Essa mesma tendência foi encontrada em R1, no entanto, o PD apresentou sempre um saldo positivo (Figura 6).

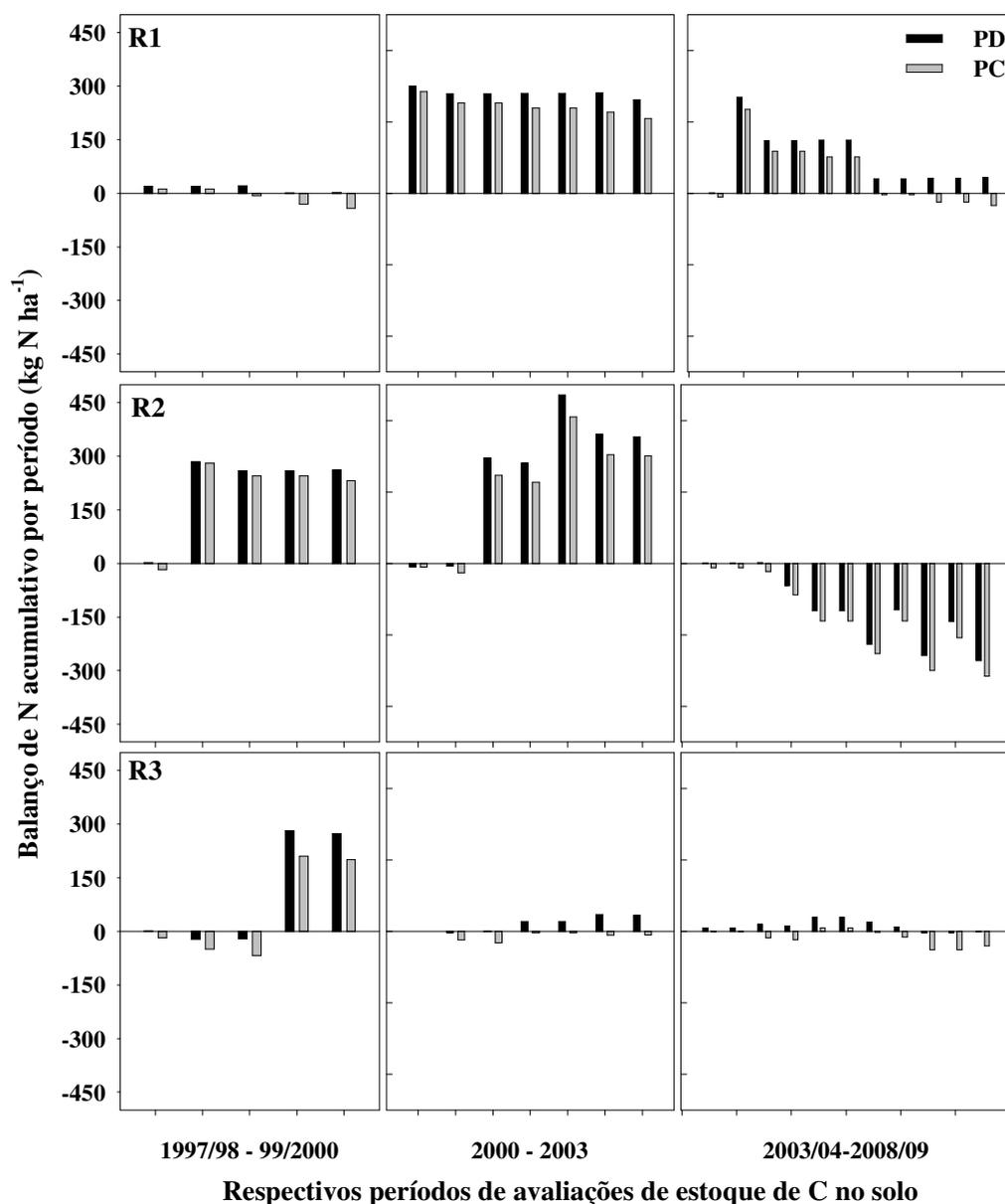


Figura 6. Balanço de N acumulativo por período no solo nos sistemas de plantio direto (PD) e convencional (PC) nas rotações de culturas, R1 (milho/aveia-soja/aveia-soja/nabo forrageiro); R2 (milho/tremoço – milho/tremoço - milho/nabo forrageiro) e R3 (milho/trigo – milho/aveia – milho/trigo) em Londrina, PR. Para os períodos de monitoramento do experimento: 97/98 a 99/2000; 2000-2003; 2003/04 a 2008/09.

Os resultados indicam que a utilização de PD associada a coberturas com alta relação C:N, tais como aquelas formadas por aveia preta, pode levar a uma redução na disponibilidade de N do solo, o que acaba reduzindo a produção de culturas dependentes do N de fertilizantes, tais como milho, mas pode aumentar a dependência da FBN pelas plantas leguminosas. A introdução de leguminosas de adubo verde, culturas como tremoço branco que está bem adaptada à região, na rotação de culturas se mostrou capaz de mitigar a imobilização do N, como ficou evidente nos maiores rendimentos de milho sem adubação nitrogenada do que após a aveia preta, mas com adubação nitrogenada.

3.5.4. Concentração de C e N totais no solo

As concentrações de C no solo nos intervalos de profundidades 0-20, 20-40, 40-60 e 60-80 cm em relação aos períodos observados de 1997-2000, 2000-2003 e 2003-2009 foram influenciados pelas rotações de culturas (Figura 7). O uso do PC levou a uma diminuição de C no solo na profundidade de 40-60 cm em todas as rotações após 12 anos de cultivo, e na rotação R1 as perdas também ocorreram em 60-80 cm de profundidade. Para a rotação R2, a perda de C no solo foi maior sob sistema de PD em relação ao PC chegando até 5 g C kg^{-1} na profundidade de 60-80 cm e 3 g C kg^{-1} para as profundidades de 20-40 e 40-60 cm. Nas rotações R1 e R3 sob PD durante 12 anos ocorreram perdas de C no solo em algumas profundidades, porém, insignificantes estatisticamente.

É possível que o saldo negativo de N (Figura 6) nessas rotações de culturas tenha relação direta com o resultado de C no solo, já que as rotações de culturas nas quais ocorreram as perdas de C foram as mesmas rotações que tiveram o saldo negativo de N, principalmente nos últimos 4 anos. De maneira geral, o saldo positivo ou nulo de N no sistema ao longo desses anos, provavelmente, contribuiu para preservação da concentração de C no solo, porém não foi suficiente para aumentar o seu valor. Além do balanço de N no sistema, pode-se ter outro fator contribuindo para a explicação desses resultados, ou talvez em conjunto com o balanço de N, que seria a entrada de C oriundo do sistema radicular. Pode-se observar que não houve perda de C no intervalo de profundidade 0-20 cm, na superfície onde se concentra a maior parte do sistema radicular das culturas, promovendo uma adição de C ao solo que em conjunto com o saldo positivo de N no sistema, pode estar impedindo uma perda de C no solo. Outra hipótese seria que, na superfície do solo ocorre uma maior adição de resíduo vegetal, que sob sistema de PC esse material é incorporado até a camada de 0-20 cm e sob PD esse material fica retido na superfície contribuindo para o aumento de C no solo. As rotações R1 e R3 sob PD preservou o C em todas as profundidades analisadas, não somente na superfície, evidenciando mais uma vez que o sistema radicular pode ter contribuição significativa nas concentrações de C no solo, já que, a contribuição da parte aérea ocorreria apenas na superfície do solo.

Em trabalho desenvolvido em Santa Maria, RS, Gonçalves e Ceretta (1999), encontraram um teor médio de C_{org} 18% maior do que o observado com o pousio de inverno na camada de 0-17,5 cm, após 6 anos sob PD, sob rotação tremoço-milho.

Com relação ao N no solo, observou-se (Figura 8) que a concentração de N não foi alterada após 12 anos na rotação R1 e R3 sob PD e PC. Na rotação R2 ocorreu perda de N no solo nas camadas 20-40 e 40-60 cm em ambos os sistemas de manejo, PD e PC, em todas as rotações de culturas.

O fato de ter ocorrido perda de N na rotação R2, deve-se ao fato de que a cultura de tremoço teve baixo rendimento da matéria seca em alguns anos nessa rotação, diminuindo a sua contribuição nas quantidades de N, via FBN, refletindo diretamente no N do solo. Nas rotações de cultura R1 e R3 houve adição de N via FBN e adubação nitrogenada, respectivamente.

Resultados obtidos por Fontoura e Bayer (2009), realizando 61 experimentos em diferentes locais da região Sul do Brasil, mostraram que nos experimentos onde os resíduos culturais foram removidos e não foi realizada adubação nitrogenada, a quantidade de N absorvido pelo milho manteve uma relação direta com os teores de MOS. Isso indica que o N absorvido era proveniente da mineralização da MOS, levando à redução do estoque de N. A introdução de leguminosas de adubação verde, como tremoço branco, bem adaptada à região para a rotação de culturas, se mostrou capaz de manter os teores de C e N, como ficou evidente nos maiores rendimentos de milho sem adubação nitrogenada do que após a aveia preta, mas com adubação nitrogenada.

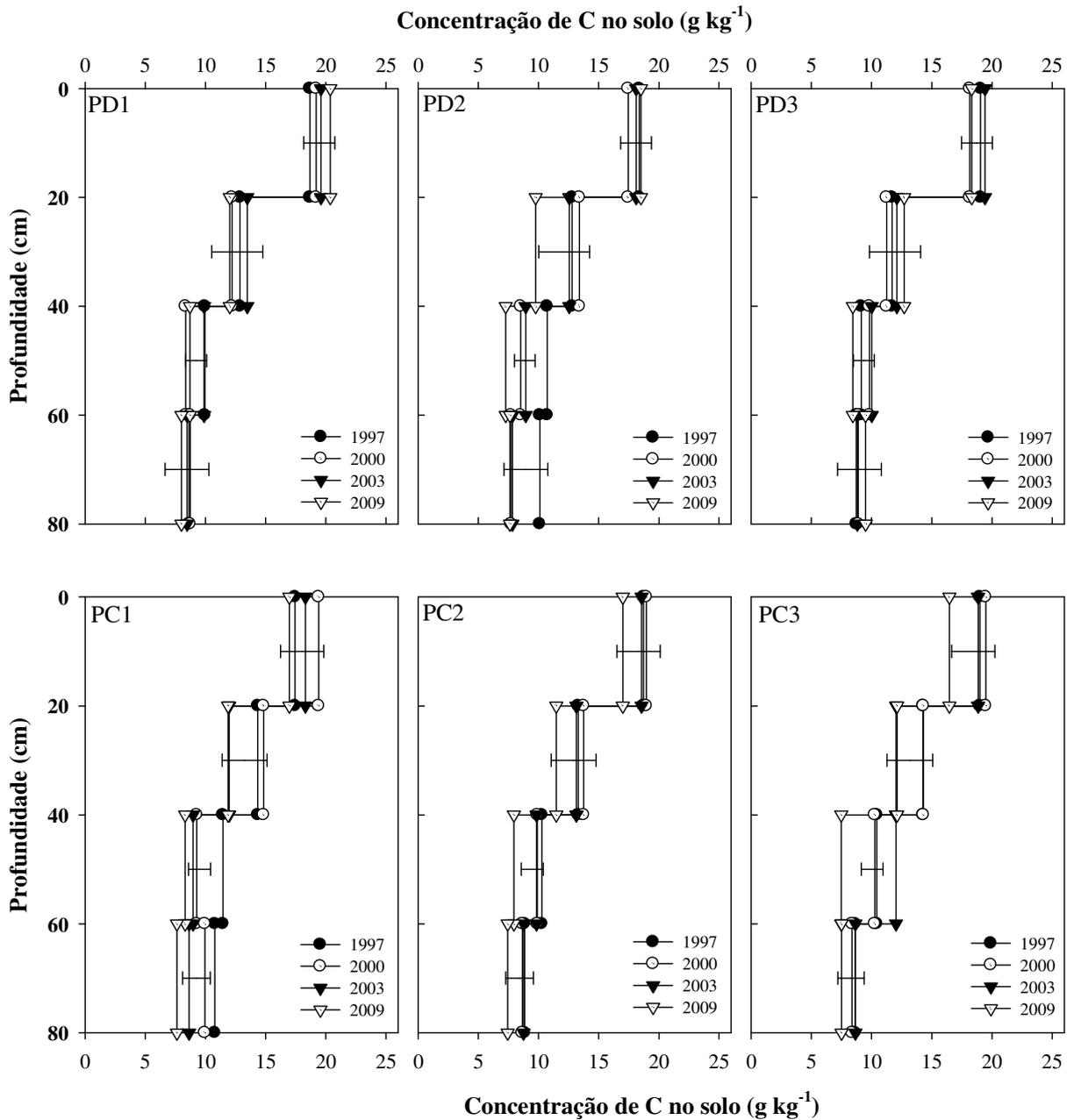


Figura 7. Distribuição de carbono total no perfil do solo, de 0 a 80 cm, nos sistemas de plantio direto (PD) e convencional (PC) nas rotações de culturas, R1 (milho/aveia-soja/aveia-soja/nabo forrageiro); R2 (milho/tremoço – milho/tremoço - milho/nabo forrageiro) e R3 (milho/trigo – milho/aveia – milho/trigo), nos anos 1997, 2000, 2003 e 2009 em Londrina, PR. As barras horizontais representam o valor da diferença mínima significativa (DMS) obtido no teste de Tukey a 5% a partir dos resultados.

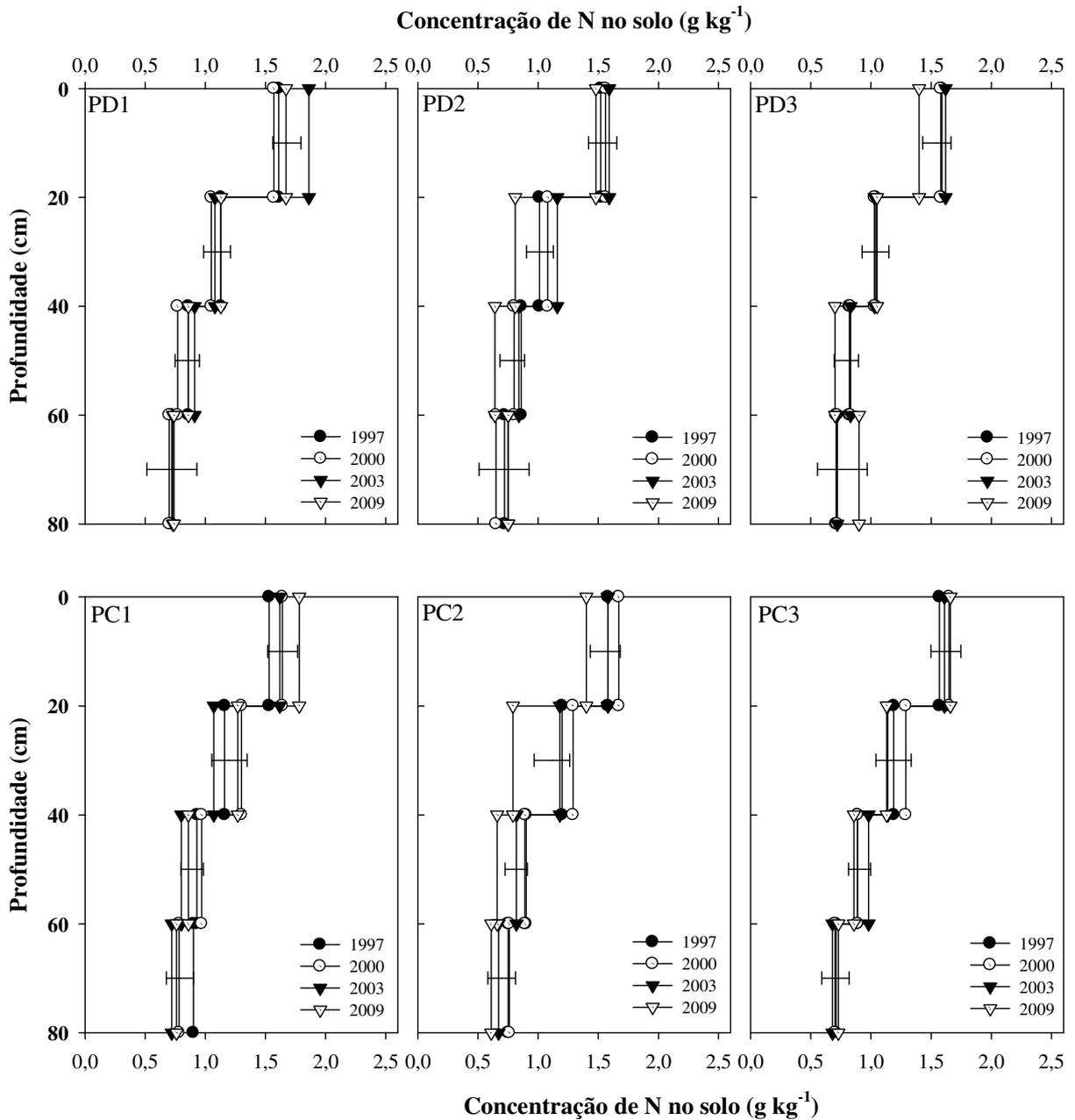


Figura 8. Distribuição de nitrogênio total no perfil do solo, de 0 a 80 cm, nos sistemas de plantio direto (PD) e convencional (PC) nas rotações de culturas, R1 (milho/aveia-soja/aveia-soja/nabo forrageiro); R2 (milho/tremoço – milho/tremoço - milho/nabo forrageiro) e R3 (milho/trigo – milho/aveia – milho/trigo) em Londrina, PR. As barras horizontais representam o valor da diferença mínima significativa (DMS) obtido no teste de Tukey a 5% a partir dos resultados.

3.5.5. Estoques de C e N no solo

O estoque de C no solo foi calculado para os intervalos de profundidades de solo 0- 20 e 0-80 cm nas três rotações de culturas para cada intervalo de amostragem. Observou-se que as mudanças nos período de 1997-2000, 2000-2003 e 2003-2009 foram influenciadas pelas rotações de culturas no intervalo de 0-80 cm (Figura 9). O uso do PC levou a uma diminuição no estoque de C, com perdas da ordem de 13 Mg C ha⁻¹ registradas após 12 anos de produção de culturas na rotação R2 no intervalo de 0-80 cm, (Figura 9). Nesta mesma rotação sob PD,

houve uma perda de C no solo de 22 Mg C ha⁻¹ após 12 anos de cultivo. Já no intervalo de 0-20 cm não houve diferença sob sistema de PD e no PC ao longo desses anos. Para a rotação R1, a avaliação ao longo prazo revelou uma redução de C no solo de 19,2 Mg C ha⁻¹ em PC e uma mudança de 1,4 Mg C ha⁻¹ sob PD (Figura 9) e no ano de 2009 houve diferença entre o sistema de PD e PC para o intervalo de 0-20 cm. Não houve diferença no sistema de PD após 12 anos de cultivo na rotação R3, mas houve perda de C do solo sob PC e foi de 22 Mg C ha⁻¹ e praticamente nenhuma perda ou ganho de C foram registrados no intervalo de 0-20 cm sob PD e PC (Figura 9).

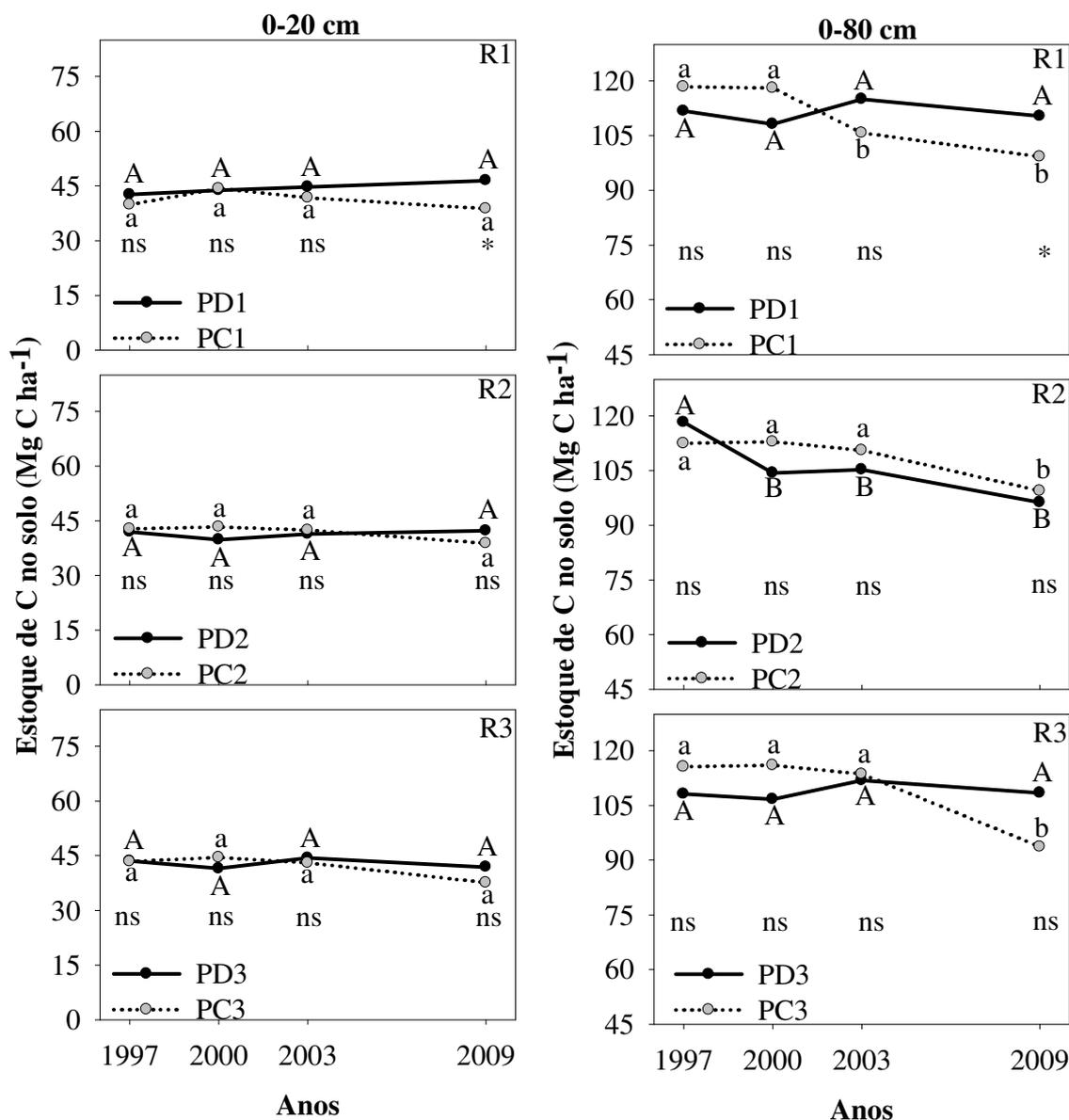


Figura 9. Estoques de C no solo (0-20 e 0-80 cm) quantificados nos anos de 1997, 2000, 2003 e 2009, para a rotaçao R1, R2 e R3, sob plantio direto (PD) e plantio convencional (PC). Crculos cinza com diferentes letras minsculas indicam diferencas significativas ($P < 0,05$) sob PC nos diferentes anos. Crculos pretos com letras maiusculas diferentes indicam diferencas significativas ($P < 0,05$) sob PD nos diferentes anos e "ns" indica que no ha diferencas significativas entre PD e PC ($P < 0,05$) e * indicam diferencas significativas entre PD e PC ($P < 0,05$), dentro de cada ano.

As mudanças nos estoques de N foram positivas para a rotação R1, sob PD, mas negativos em PC no intervalo de profundidade de 0-80 cm (Figura 10), já em 0-20 cm houve uma variação ao longo dos anos sob PD e PC, mas em 2009 os estoques de N praticamente foram semelhantes entre PD e PC. A redução das reservas de N foi observada para rotação R2 (Figura 10) sob PD e PC no intervalo de 0-80 cm e no intervalo de 0-20 cm sob PC, mas as diferenças ocorreram no terceiro período de avaliação (2003-2009).

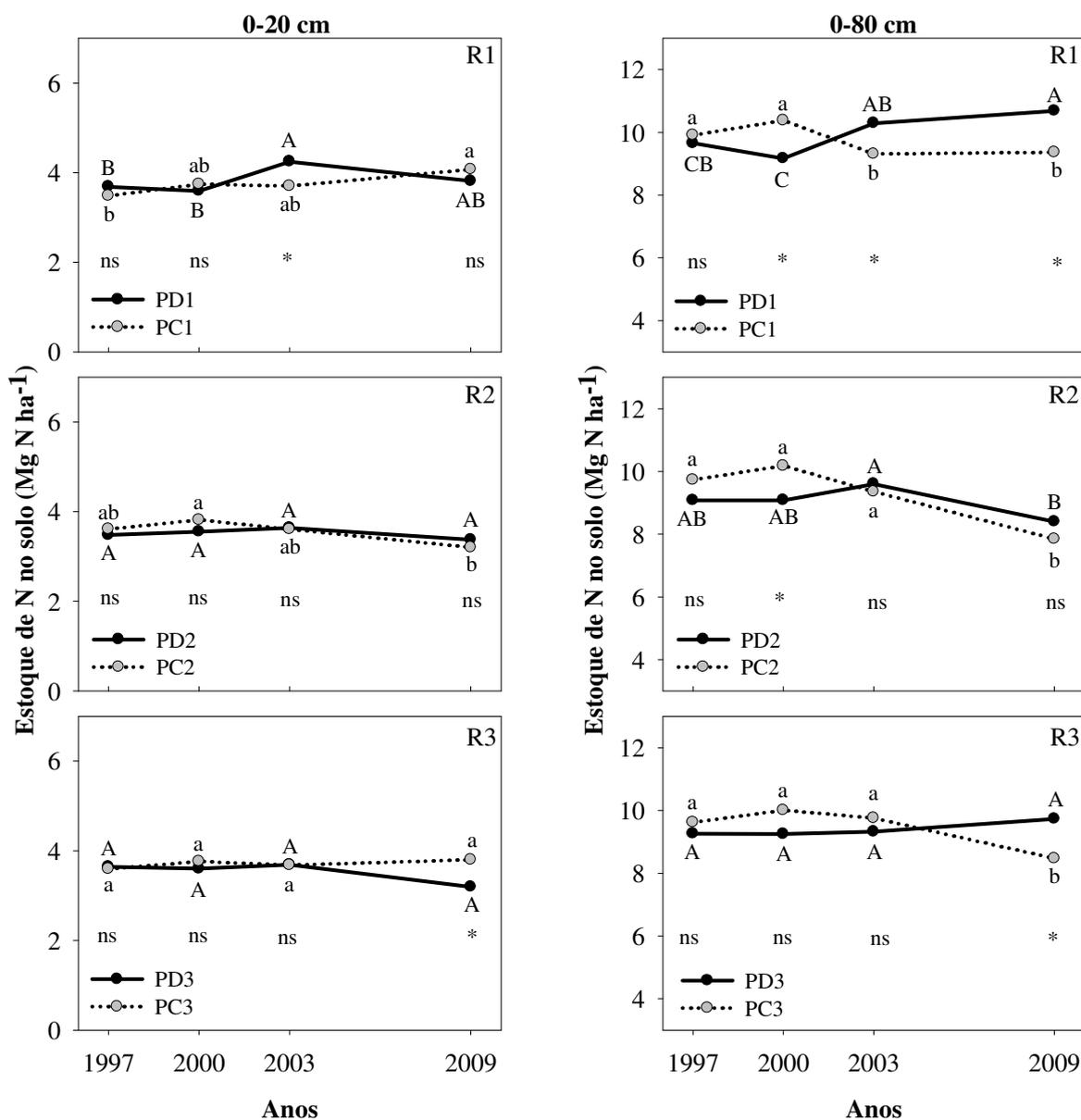


Figura 10. Estoque de N no solo (0 a 20 e 0 a 80 cm) quantificados nos anos de 1997, 2000, 2003 e 2009, para a rotação R1, R2 e R3, sob plantio direto (PD) e plantio convencional (PC). Círculos cinza com diferentes letras minúsculas indicam diferenças significativas ($P < 0,05$) sob PC nos diferentes anos. Círculos pretos com letras maiúsculas diferentes indicam diferenças significativas ($P < 0,05$) sob PD nos diferentes anos e “ns” indica que não há diferenças significativas entre PD e PC ($P < 0,05$) e * indicam diferenças significativas entre PD e PC ($P < 0,05$), dentro de cada ano.

Não foram observadas alterações nos estoques de N para rotação R3 sob PC e PD no intervalo de 0-20 cm e sob PD em 0-80 cm, mas sim uma diminuição nos estoques de N no PC durante o terceiro período (Figura 10). Na rotação R2, o estoque de N no solo diminuiu 0,93 Mg N ha⁻¹ no PD e 2,35 Mg N ha⁻¹ no PC, considerando os 12 anos de monitoramento, quando a amostragem foi feita até 80 cm.

A relação C:N das amostras de solos de todas as profundidades estão apresentados como um gráfico tipo Box-plot. A mediana variou entre 11 e 12, com a maioria dos dados variando de 10 a 13, indicando um material orgânico relativamente uniforme para os diferentes anos de amostragem, independentemente da rotação de cultura e sistema de cultivo (Figura 11). Os *outliers* não foram relacionados ao cultivo anterior ou à profundidade de amostragem.

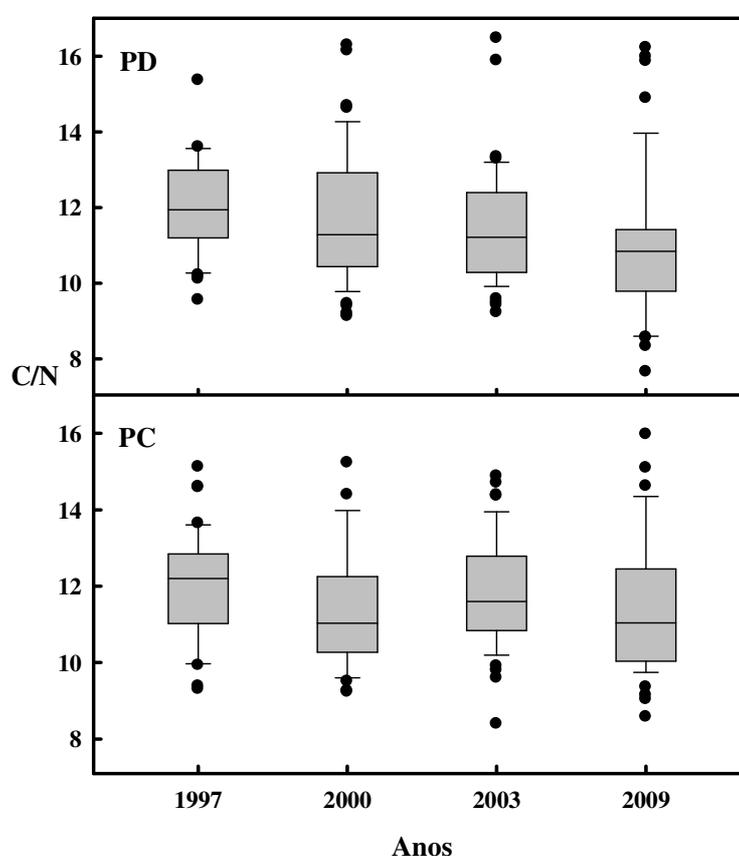


Figura 11. Relação C:N do solo obtida no anos de 1997, 2000, 2003 e 2009 para rotações de cultura sob os sistemas de plantio direto (PD) e convencional (PC), em Londrina, PR. A linha central indica a mediana, as bordas superiores e inferiores das caixas indicam o terceiro quartil e primeiro quartil, respectivamente. A linha vertical indica os valores máximos e mínimos e os círculos indicam os *outliers*.

3.5.6. Influência da frequência de cultivo da leguminosa para adubação verde em rotações de culturas no balanço de N e preservação do estoque de carbono no solo

As correlações, incluindo todas as rotações de cultura (R1, R2 e R3), entre os estoques de C e N do solo (Figura 9 e Figura 10) e a entrada de C acumulado (Figura 4), mais o saldo do balanço N acumulado (Figura 6) para cada período que correspondente à avaliação de

estoques de C e N no solo, no sistema de PD e PC, do respectivo período são apresentadas na Tabela 7. A análise estatística dos dados apresentados na Tabela 7 mostrou que os estoques de C e N no sistema de PD mostraram uma correlação significativa com o balanço de N, ambos a 1% de probabilidade de erro. Quanto ao sistema de PC, não houve correlação entre o estoque de C e o balanço de N. No entanto, apresentou correlação negativa com a quantidade de C dos resíduos, ou seja, quanto mais resíduo de C entrou no sistema menor foi o estoque de C no solo, provavelmente, em razão de uma maior decomposição do resíduo não promovendo um acúmulo de C. Além disso, no PC o estoque de N se correlacionou positivamente com o balanço de N acumulativo e não se correlacionou com o estoque de C (Tabela 7). Entre os sistemas de manejos dos solos adotados, que apresentaram um comportamento de estoque de C e N diferenciado, parece que no PD o estoque de C no solo está intimamente relacionado com o aumento no saldo de N no sistema, enquanto que, no PC isso não ocorre (Tabela 7).

Tabela 7. Correlação entre os valores em cada sistema de manejo do solo (PD e PC) e nas diferentes rotações de culturas em relação ao balanço de N, quantidade de C presente nos resíduos e os estoques de C e N do solo. Os dados utilizados foram em função aos dados obtidos do balanço de N acumulado e a diferença no estoque de C e N para os três períodos (97/98 a 99/2000; 2000-2003; 2003/04 a 2008/09) de monitoramento experimento.

| Atributo | Estoque de C | Resíduo de C | Balanço de N | Estoque de N |
|-----------------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Plantio direto | | | | |
| Estoque de C | 1 | | | |
| Resíduo de C | -0,571 | ns | 1 | |
| Balanço de N | 0,815 | *** | -0,596 | * |
| Estoque de N | 0,625 | * | -0,403 | ns |
| | | | 0,627 | * 1 |
| Plantio Convencional | | | | |
| Estoque de C | 1 | | | |
| Resíduo de C | -0,931 | *** | 1 | |
| Balanço de N | 0,476 | ns | -0,627 | * |
| Estoque de N | 0,271 | ns | -0,432 | ns |
| | | | 0,628 | * 1 |

Valor de Significância do teste T: *10%; ** 5%; ***1%

Não obstante, as perdas de C do solo computados para áreas de PC podem ser explicadas pelo revolvimento do solo ocasionado pelo preparo periódico do solo com a utilização dos implementos agrícolas, nesta área foi arado e grade (Tabela 7). Babujia et al. (2010) em um estudo entre sistema de PD e PC, em uma área experimental em Londrina, PR, revelou que o PD apresentou maiores valores de C e N na biomassa microbiana em comparação ao PC, para camada de 0 a 60 cm (BABUJIA et al., 2010). O resultado encontrado nesse trabalho, parece que, a entrada de C proveniente dos resíduos das culturas acumulado neste sistema de manejo dos solos favoreceu a atividade dos microrganismos que atuam na decomposição produzindo CO₂, e os teores de C no solo foram diminuindo ao longo prazo.

As perdas de C nos solos de clima temperado observadas sob PC podem ser explicadas segundo Six et al. (2002) pelo efeito prejudicial na dinâmica de formação dos macro e micro agregados do solo, que explica o acúmulo de C no solo, tendo em vista a proteção física da MOS, já em climas tropicais ainda há necessidade de mais estudos. Neste trabalho não foi realizado análise de agregados do solo, no entanto, um estudo realizado no Brasil por Zotarelli

et al. (2005) na mesma área experimental desta presente tese de doutorado. Os autores detectaram, após 4 anos de implantação do experimento, que as práticas de PC contribuíram para a existência de menores agregados em comparação com aqueles de PD. Foi demonstrado que a matéria orgânica fina particulada intra-agregado desempenha um papel importante na estabilização e acumulação de C no solo, quadro favorecido sob PD e influenciado pela cultura anterior (ZOTARELLI et al., 2007). Esta relação permite deduzir que o conteúdo de C no solo depende não somente do aporte de resíduos ao solo, mas também está ligado a diversos outros fatores.

A variação negativa no estoque de C registrada da adoção da rotação R2 sob PD foi semelhante ao PC, onde a rotação que apresentou a maior produção de resíduo de C, pode ser explicada por outros diferentes motivos: os Latossolos profundos típicos de uma grande parte da área cultivada no Brasil acumulam quantidades significativas de C nas camadas mais profundas do solo, abaixo dos 30 cm de profundidade (SISTI et al., 2004; LORENZ e LAL, 2005; DIEKOW et al., 2005; BODDEY et al., 2010). Mesmo considerando a importância da fauna no transporte do C de resíduos superficiais para as camadas mais profundas do solo ou a percolação de substâncias húmicas no perfil do solo, a decomposição das raízes das plantas e a atividade microbiana associada pode ser uma melhor explicação para o maior acúmulo de C a curto prazo (LORENZ e LAL, 2005). As raízes das plantas não são apenas uma fonte de C no solo, mas também hospedeiras de microrganismos envolvidos no processo de agregação, tais como FMAs. Wilson et al. (2009) apresentaram resultados que indicavam as hifas de FMAs como responsáveis pela maioria dos processos de agregação em solos de clima temperado e, conseqüentemente pelas elevadas taxas de acúmulo de C e N. A colonização micorrizica em *Brachiaria* spp. é bastante eficiente, além disso, as pastagens produtivas são um dos sistemas agrícolas mais eficientes para acumular C no solos de regiões tropicais (MORAES et al., 1996; TARRÉ et al., 2001, FISHER et al., 2007), provavelmente por apresentar um sistema radicular denso e uma intensa renovação. Assim, os efeitos das hifas de FMAs na agregação do solo e o acúmulo de C e N no solo podem ser seriamente afetados pela supressão da colonização por FMAs e pela dispersão nos solos. A alta frequência com que o tremoço foi plantado na rotação R2 nos anos posteriores poderia ter afetado o *turnover* da agregação. Esta cultura não estabelece simbiose com FMAs e promove uma redução na colonização por FMAs na cultura subsequente (GIANINAZZI-PEARSON e GIANINAZZI, 1992).

Outra possibilidade para explicar porque o estoque de C no solo foi reduzido sob PD na rotação R2, é o balanço de N estimado. Os dois primeiros períodos de amostragem para as mudanças nos estoques de C no solo, 1997-2000 e 2000-2003, corresponderam a curtos períodos de excesso de N nos sistemas, basicamente devido à influência do cultivo do tremoço como adubo verde. No entanto, para o intervalo de tempo mais longo do período de avaliação de 2003-2009, a rotação R2 foi caracterizada por um balanço de N negativo. Apesar da alta frequência de tremoço na rotação, a decisão de suspender a aplicação de fertilizante nitrogenado para a cultura de milho sucessiva, levou a uma entrada de N insuficiente através da FBN para compensar as saídas de N, com os rendimentos elevados de milho. Uma tentativa de verificar a relação direta entre os balanços de N acumulados no solo e as mudanças nos estoques de C do solo nos diferentes períodos revelou, ao menos, a existência de uma tendência positiva e significativa, principalmente para as rotações em PD (Tabela 7). Isto está de acordo com a teoria da formação de húmus em solos que prediz que, para a produção de C no solo também se requer N no processo, o qual é principalmente mediado pela biomassa microbiana do solo (CHRISTOPHER e LAL, 2007).

Existe uma semelhança entre as alterações nos estoques de C e N observados para as rotações de culturas (Figura 9 e Figura 10) com a relação C:N das amostras de solo de todas as camadas de solo de 0 a 80 cm. Bayer et al. (2000) mostraram que a quantidade de resíduos

que entram no solo é crucial para a melhoria dos estoques de C. Sisti et al. (2004) chegaram à mesma conclusão, mas apontam os benefícios de uma leguminosa de adubo verde em uma rotação de culturas para o balanço de N do solo, resultando em acúmulo de C.

As vantagens de se avaliar as alterações do estoque de C do solo utilizando um experimento de longo prazo são evidentes. Para a rotação R1, a avaliação em longo prazo revelou uma redução no estoque de C do solo de 19,2 Mg C ha⁻¹ em PC e de 1,4 Mg C ha⁻¹ sob PD. No entanto, se as análises fossem feitas a partir de uma única coleta de campo, após 12 anos de manejo de culturas, a diferença significativa entre os sistemas de manejo encontrados no último ano amostrado levaria à conclusão de que o PD teria promovido significativo acúmulo de C no solo de 11,1 Mg C ha⁻¹, ou uma taxa de acúmulo de C no solo de 0,93 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹. No entanto, tal resultado revela que o sistema sob PC apresentou perdas de C ao longo dos anos, enquanto que o sistema sob PD preservou a quantidade de C no solo. O efeito combinado de adição de C e uma menor disponibilidade de N junto com o revolvimento do solo pode ter ocasionado um aumento nas taxas de decomposição.

3.5.7. Influência do sistema radicular na preservação do estoque de carbono e nitrogênio do solo, em sistema plantio direto

Houve diferença significativa no rendimento de matéria seca entre os diferentes sistemas de rotações de cultura em diferentes períodos de amostragem (Tabela 8). No sistema PD na rotação R1, onde o N do sistema é proveniente da FBN, o rendimento de matéria seca da cultura do milho foi superior à quantidade produzida no R3, ressaltando que este último recebeu adubação nitrogenada e não houve leguminosas desde 1999. No entanto, não houve diferença no rendimento de MS da parte aérea da aveia preta entre os sistemas de rotação.

No trabalho desenvolvido por Zotarelli et al. (2012) foram encontrados valores bastante parecidos nessa mesma área experimental em Londrina PR com uma produção de matéria seca total para o milho variando de 13,8 a 6,2 Mg ha⁻¹ entre os anos de 1998 a 2003. Em muitos casos, as doses de N aplicadas a esta cultura foram um pouco abaixo dos níveis necessários para a máxima produtividade. A introdução de uma cultura de leguminosa de adubação verde pode contribuir com grandes quantidades de N ao sistema, o suficiente para equilibrar as perdas de N e o N exportado em grãos colhidos (ZOTARELLI et al., 2012).

Tabela 8. Produtividade do grão, rendimento da biomassa da parte aérea, sistema radicular e matéria seca total (Mg ha⁻¹) em dois sistemas de rotação de cultura (PD - rotação R1 e R3), no ano de 2011. Dados referentes a média de quatro repetições.

| Período | Rotação | Cultura | Produtividade Mg. ha ⁻¹ | Matéria seca (Mg ha ⁻¹) | | | | | |
|---------|---------|-------------|---------------------------------------|-------------------------------------|------|-------|---|-------|---|
| | | | | Parte aérea | Raiz | Total | | | |
| Verão | PD R1 | Milho | 8,7 A | 12,28 | A | 6,55 | A | 18,38 | A |
| | PD R3 | | 7,6 A | 9,85 | B | 4,65 | B | 14,5 | B |
| Inverno | PD R1 | Aveia preta | - | 5,27 | A | 4,33 | A | 9,6 | A |
| | PD R3 | | | 6,15 | A | 4,05 | A | 10,2 | A |
| CV% | | | 8,37 | 18,69 | | 12,22 | | 16,53 | |

A utilização de uma leguminosa proporcionou um melhor desenvolvimento da planta de milho em comparação com o tratamento que recebeu adubação nitrogenada. Quanto maior a massa produzida pela planta de adubo verde, maior foi a quantidade de nutrientes que podem ser reciclados pela cultura subsequente, uma vez que estes nutrientes ficam retidos nos restos da cobertura, impossibilitando a lixiviação dos mesmos. Embora a quantidade de

nutrientes presentes na MOS de resíduos vegetais seja pequena em comparação com o conteúdo total do solo, estes nutrientes são muito importantes do ponto de vista do manejo, pois em conjunto, determinam o grau de fertilidade ou a capacidade do solo de fornecer as condições necessárias para o adequado crescimento das culturas agrícolas (URQUIAGA et al., 2006).

A quantidade de raízes ao longo do perfil em todos os tratamentos foi maior na camada de 0-22 cm. Quanto à influência do sistema de rotação de cultura, não foram constatadas diferenças quanto à biomassa de raízes independente da cultura nas profundidades de 22 a 88 cm. Observamos também um maior acúmulo, cerca de 32% a mais de matéria seca de raiz do milho na camada superficial na rotação que ao longo dos anos utilizou uma leguminosa do tipo adubo verde, no PD na rotação R1 (Figura 12).

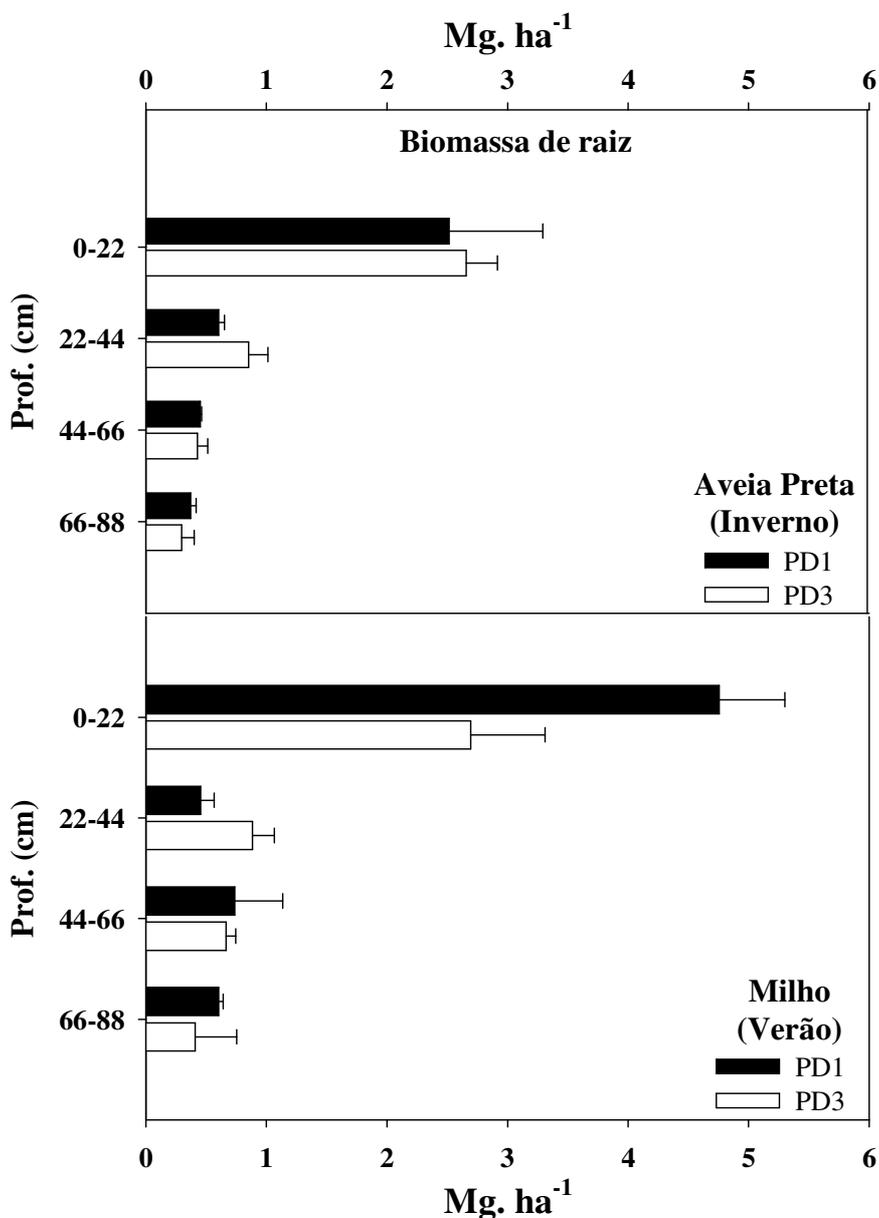


Figura 12. Densidade de raízes (Mg dm⁻³) de milho e aveia preta em diferentes profundidades sob sistema de PD.

A distribuição do sistema radicular no perfil do solo mostra a mesma tendência observada por Bordin et al. (2008) em Londrina. Estudando a distribuição do sistema

radicular em relação ao sistema de manejo do solo, com soja e milho, os autores verificaram que a maior porcentagem de raízes ocorreu na camada de 0-10 cm, decrescendo nas demais camadas. Segundo Tavares Filho et al. (2001), este fato está relacionado ao fato das plantas concentrarem as raízes nas camadas superficiais, que possuem maior quantidade de poros e fissuras entre elementos estruturais, sendo estas vias preferenciais ao crescimento das raízes.

Venzke Filho et al. (2004), em experimento em Latossolo Vermelho-Escuro, textura argilosa, cultivado por 22 anos sob PD, no município de Tibagi (PR), encontrou que 36% das raízes de milho e 30% das raízes de soja estavam concentradas na camada 0-10 cm do solo. O sistema radicular do milho apresentou 1.324 kg C ha⁻¹ e 58 kg N ha⁻¹, com maior densidade por matéria seca e de raízes em vias de decomposição na camada superficial do solo, decrescendo com a profundidade. O sistema radicular da soja (392 kg C ha⁻¹ e 21 kg N ha⁻¹) teve contribuição maior de raízes finas e de densidade por comprimento do que do milho.

O crescimento radicular e de parte aérea do milho no sistema PD na rotação R1, foi favorecido pela adição da leguminosa do tipo de adubo verde a cada três anos, mesmo sem receber adubação nitrogenada (Figura 12 e Tabela 8).

Embora em comparação com a parte aérea as raízes tenham contribuído com menores quantidades de resíduos ao solo, sua distribuição pode ter maior influência nos processos químicos, físicos e biológicos do solo, devido a uma menor taxa de decomposição do C em relação à parte aérea. Contudo, embora a maioria das raízes e atividade microbiana esteja nos 20 cm superiores da maioria dos solos, Trumbore et al. (1995) registraram alterações de radiocarbono em MOS ao longo do período 1960-2000, demonstrando a existência de um ciclo ativo do C em profundidade no solo acompanhando o desenvolvimento das raízes das plantas. Mesmo integrando pequenas concentrações de C e biomassa microbiana ativa, sobre os grandes volumes de solo abaixo de 20 cm onde os fluxos associados a esses grupos podem ser significativos (TRUMBORE et al., 1995).

Na Tabela 9 encontra-se a análise de correlação de Pearson entre os teores de C e N em relação à quantidade de raízes no perfil do solo nos diferentes sistemas de rotações de cultura (no sistema PD nas rotações R1 e R3). Destaca-se a elevada correlação observada no estoque de C e N com a biomassa radicular, principalmente no sistema PD na rotação R1. Esses resultados sugerem que a adoção de sistemas que adicionam a leguminosa no sistema de manejo proporcionou um aumento de C e N nos solos. Essa possibilidade é amparada pelo fato de que para formação da MOS estabilizada não é necessário apenas C, mas também outros elementos que fazem parte da sua composição, principalmente o N.

Segundo Urquiaga et al. (2006), a inclusão de leguminosas como adubos verdes na rotação de culturas de inverno parece ser a melhor estratégia para a promover o sequestro de C por sistemas agrícolas. Como o resíduo das leguminosas é rico em N, este fator relaciona-se com a acumulação de C nos solos. Também é possível que o uso de leguminosas estivesse disponibilizando quantidades significativas de C e N ao solo pelo sistema radicular produzindo condições mais favoráveis para a atividade biológica através da exsudação e decomposição de raízes (ANDERSON e FLANAGAN, 1989).

Tabela 9. Coeficientes de correlação de Pearson entre os valores de estoque de C e N e de biomassa de raiz, nas diferentes camadas de solo estudadas e rotações de culturas R1 e R3), sob sistema plantio direto com uso de milho (verão) e aveia preta (inverno) como planta de cobertura do solo.

| Sistema radicular | Rotações | Carbono | | | Nitrogênio | | |
|--------------------------|------------|----------------------|----------------|-----|----------------------|----------------|-----|
| | | Equação | R ² | F | Equação | R ² | F |
| Milho (Verão 2010/11) | PD R1 | $y = 6,509x + 19,80$ | 0,6446 | *** | $y = 0,513x + 1,856$ | 0,6453 | *** |
| | PD R3 | $y = 10,76x + 16,13$ | 0,8307 | *** | $y = 0,709x + 1,516$ | 0,4565 | *** |
| | PD R1 e R3 | $y = 7,460x + 19,14$ | 0,6762 | *** | $y = 0,562x + 1,733$ | 0,5517 | *** |
| Aveia (Inverno 2011) | PD R1 | $y = 11,85x + 16,29$ | 0,7931 | *** | $y = 0,844x + 1,673$ | 0,6483 | *** |
| | PD R3 | $y = 11,45x + 16,35$ | 0,8658 | *** | $y = 0,752x + 1,533$ | 0,4724 | *** |
| | PD R1 e R3 | $y = 11,68x + 16,29$ | 0,8214 | *** | $y = 0,806x + 1,595$ | 0,5606 | *** |

*** As médias diferem ao nível de 0,01%

(n = 32 para cada rotação de cultura (8 profundidades x 4 repetições), PD1 ou PD3; n=64 para todas as rotações, PD1 e PD3)

3.6. CONCLUSÕES

As áreas sob sistema de plantio convencional, independentemente do sistema de rotação de cultura, apresentaram estoques de carbono inferiores ao plantio direto.

O sistema de plantio direto manteve os estoques de C com o passar dos anos quando o balanço de N foi positivo ou nulo e perdeu C quando o balanço de N foi negativo.

Na rotação em que foi cultivada com mais frequência a combinação tremoço/milho sem aplicação de N (R2), não houve diferenças entre o plantio direto e o preparo convencional nos estoques de carbono e nitrogênio no perfil do solo de 0-100 cm, ocorrendo perda nos estoques destes elementos nos últimos anos.

O plantio de leguminosa como adubo verde antecedendo o cultivo de gramínea não proporcionou um incremento no estoque de carbono do solo. No entanto, houve uma manutenção no conteúdo de C nas áreas que ocorreu um balanço positivo de N com a utilização da leguminosa.

4. CAPITULO II

BALANÇO DE N E ESTOQUES DE C E N EM ROTAÇÕES DE CULTURAS SOB SISTEMA PLANTIO DIRETO EM UM LATOSSOLO VERMELHO EM COXILHA – RS

4.1. RESUMO

Sistemas de manejo agrícola que promovam a conservação e melhorias nas características do solo contribuem para a sustentabilidade da produção de alimentos. A avaliação adequada dos impactos dos sistemas de produção sobre o ambiente pode direcionar práticas que mantenham os níveis de produtividade e que ocasionem o mínimo impacto ambiental ao longo do tempo. O objetivo deste estudo foi avaliar o balanço de N e os estoques de C e N sob três sistemas de rotação de cultura, em sistema plantio direto ao longo prazo na região Sul. Os sistemas de rotação de cultura foram: Sistema I (SI) - trigo/soja e pastagem de aveia preta + ervilhaca/milho; Sistema II (SII) - trigo/soja e pastagem de aveia preta + ervilhaca + azevém/milho; Sistema IV (SIV) - trigo/soja e pastagem de aveia preta + ervilhaca + azevém/pastagem de milheto. O desenho experimental foi de blocos ao acaso, com duas subparcelas experimentais (P1 e P2) para cada um dos sistemas de rotação, em cada bloco. Foi realizado o levantamento de dados de produção e de deposição de resíduos, juntamente com a determinação dos estoques de C e N. Foram retiradas amostras de solo até 100 cm de profundidade para determinação da granulometria, densidade, teores de C e N e de $\delta^{13}\text{C}$. Os três tratamentos de rotação de cultura conseguiram aportar, ao longo dos anos, quantidade suficiente de N, seja via FBN ou adubação, para manter a produtividade agrícola e manter o balanço entre entradas de saída de N positivo. Após 13 anos da implantação das rotações de cultura em sistema plantio direto não se observou diferença significativa nos estoques de carbono e nitrogênio totais do solo até um metro de profundidade. Pode-se concluir que existe uma estreita relação das variáveis C e N do solo com o saldo positivo de nitrogênio no sistema.

Palavras-Chave: Relação C:N. *Poacea*. Balanço de nitrogênio solo-planta

4.2. ABSTRACT

Agricultural management systems that promote conservation and improvements of soil characteristics contribute to the sustainability of food production. A proper assessment of the impact of production systems on the environment can direct practices that maintain productivity levels and which cause minimal environmental impact over time. The aim of this study was to evaluate the N balance and C and N stocks under three crop rotation systems under long-term no-tillage systems in the South Brazil. The crop rotations were: System I (SI) - wheat / soybean and oat + vetch / maize; System II (SII) - wheat / soybean and oat + vetch + rye grass / maize; System IV (SIV) - wheat / soybean and oat + vetch + ryegrass / pearl millet. The experimental design was of randomized blocks, with two experimental plots (P1 and P2) for each system of rotation in each block. There were evaluated crop yield data and residual biomass, plus the determination of soil C and N stocks. Samples were taken up to 100 cm soil depth to determine soil texture, bulk density, C and N contents and $\delta^{13}\text{C}$. The three treatments of crop rotation could contribute, through the years, with enough N, through fertilization or BNF to maintain agricultural productivity and to maintain the positive balance between N inputs and outputs. After 13 years of implementation of crop rotations in the no-tillage system, there was no significant difference in the carbon stocks and soil total nitrogen up to one meter depth. It may be concluded that there is a close relation of the variables of soil C and N with positive nitrogen balance in the system.

Key-words: C/N ratio. *Poacea*. N balance in soil-plant system.

4.3. INTRODUÇÃO

A produtividade das culturas agrícolas é resultado de diversos fatores, incluindo as características do solo, as condições ambientais e o suprimento dos nutrientes durante o cultivo. A utilização de manejo agrícola que promova a conservação e melhorias nas características do solo pode ser a solução para a sustentabilidade da produção agrícola. Portanto, existe a necessidade da avaliação adequada dos impactos dos sistemas de produção sobre o ambiente para que seja possível a recomendação de práticas que mantenham os níveis de produtividade e que ocasionem o mínimo impacto ambiental ao longo do tempo (JANTALIA et al., 2006).

Vários trabalhos científicos demonstram que a utilização de sistema convencional de cultivo com o revolvimento do solo com arados e grades pode reduzir as taxas de acúmulo ou provocar a redução dos estoques de C e N total no solo. Outros encontraram uma relação positiva entre as quantidades de resíduos vegetais retornados ao solo e de estoque de C, principalmente em sistema de PD (LOVATO et al., 2004; DIECKOW et al., 2005; SIQUEIRA NETO et al., 2009).

Resíduos vegetais são a principal entrada de C no solo em sistemas agrícolas (LAL e KIMBLE, 1997). O aumento da produção de resíduos devido a práticas de manejo deve, portanto aumentar, o conteúdo de C no solo ou pelo menos mantê-lo. Segundo Follett (2001) e Lal (2004), o conteúdo de C no solo está relacionado com a quantidade e qualidade do resíduo que retorna ao solo. A dinâmica dos resíduos é complexa e depende de uma série de características da planta, principalmente a relação C:N, o teor de lignina e, a relação lignina/N (AITA e GIACOMINI, 2003). No entanto, se pode esquecer que as condições ambientais poderão ou não favorecer o processo de decomposição desses resíduos (MOREIRA e SIQUEIRA, 2006).

Os principais constituintes da MOS são o C e o N orgânico no solo e estudos mostram que o incremento dos níveis de MOS está intimamente associado à entrada de N (CHRISTOPHER e LAL, 2007). Considerando que a MOS apresenta, entre outras características, uma relação C:N estável (variando ao redor de 10 ou 12 independentemente das condições edafoclimáticas), do conteúdo de N e da natureza da vegetação, o N é o elemento essencial para o sequestro de C nos solos agrícolas (JANTALIA et al., 2006a, URQUIAGA et al., 2005b; URQUIAGA et al., 2008). Justamente por desconhecimento deste fenômeno é que muitos sistemas de manejo do solo, inclusive o plantio direto, onde grandes quantidades de resíduos ingressam no solo, não têm produzido os resultados de sequestro de C esperados (JANTALIA et al., 2007; SISTI et al., 2004; URQUIAGA et al., 2005b).

A disponibilidade de N no solo é controlada pelos processos microbianos de mineralização e imobilização, os quais dependem basicamente da relação C:N e da composição bioquímica dos resíduos culturais em decomposição (HEINZMANN, 1985; MARY et al., 1996). Segundo Allison (1966), há um equilíbrio entre esses dois processos quando a relação C:N dos resíduos situa-se em torno de 25. Abaixo desse valor, a mineralização irá predominar sobre a imobilização, ocorrendo o inverso para valores de C:N superiores a 25. Segundo Urquiaga et al. (2008), com o balanço positivo de N no solo em sistemas agrícolas, é possível prever o potencial de acúmulo de C no solo ou da MOS.

Em revisão sobre o efeito da adição de N no conteúdo de MOS, Alvarez (2005) reuniu dados de 137 locais e concluiu que o aumento na MOS com aplicação de fertilizante nitrogenado foi consistente apenas quando houve o retorno de resíduos ao solo. O autor afirma que este efeito dependeu da aplicação cumulativa de N, da rotação, do clima e da textura do solo e obteve uma variação positiva de 2 Mg ha⁻¹ no estoque de C para cada 1 Mg

ha⁻¹ de N aplicado. Em contrapartida, Fog (1988) concluiu, em revisão, que a adição de N não teve efeito sobre a decomposição da MOS.

Assim, o levantamento de dados de produção e de deposição de resíduos, juntamente com a determinação dos estoques de C e N no solo em experimentos de longo prazo podem contribuir para um melhor entendimento da dinâmica da MOS.

O objetivo deste estudo foi avaliar o efeito do balanço de N de diferentes sistemas de rotação de cultura no estoque de C e N no solo em sistema plantio direto longo prazo (15 anos) na região sul do Brasil.

4.4. MATERIAL E MÉTODOS

4.4.1. Localização e descrição da área de estudo

O estudo foi realizado em experimento de longo prazo intitulado “Sistemas de Produção Integração Lavoura-Pecuária” (SPILP) da estação experimental da Embrapa Trigo, no município de Coxilha, RS. A localização geográfica está entre as coordenadas 28° 15'S, 52° 24'W, a 648 m de altitude. O experimento iniciou-se em 1995 e as coletas foram realizadas em 2010. Esse experimento de longa duração envolvendo sistemas de rotação de culturas vem sendo desenvolvido na Embrapa Trigo desde a década de 1970 (SANTOS e REIS, 2001). Todas as informações referentes ao experimento foram cedidas pelo Pesquisador Dr. Henrique P. do Santos. Na área experimental, antes da instalação do experimento, foram cultivadas lavouras de trigo, no inverno, e de soja, no verão, sob sistema plantio direto por vários anos.

O experimento completo de SPILP avaliou seis modelos mistos de sistema de produção, onde todas as culturas foram estabelecidas em sistema plantio direto. Basicamente os sistemas de rotação consistiam de diferentes rotações tendo como culturas principais o trigo, soja e milho com SPILP, sendo as pastagens implantadas de dois em dois anos, no inverno. Nesse estudo foram selecionados apenas três destes sistemas, denominados de sistema I (SI), sistema II (SII) e sistema IV (SIV) (Tabela 10). No decorrer do experimento houve a mudança em algumas culturas conforme descrição dos sistemas na Tabela 10. O primeiro período, denominado de fase 1 ocorreu de 1995-2002 e o restante foi denominado de fase 2 entre 2003-2010 (Tabela 10). Assim foram avaliados dois sistemas de rotação de culturas que utilizam cobertura com leguminosa e um sistema que utiliza gramínea como cobertura verde e alimento para o gado.

Tabela 10 Descrição dos três sistemas de rotações de cultura em cada parcela, na fase 1 do experimento que compreendeu os anos de 1995 a 2003 e na fase 2 entre 2003 e 2010, em Coxilha, RS.

| Período | | Rotações de cultura | | | | |
|---------|---------|---------------------|---|---------------------|--|------------|
| Sistema | Parcela | Código | Fase 1 -1995 a 2002 | Fase 2- 2003 a 2010 | | |
| SI | P1 | SIP1 | trigo/soja e pastagem de aveia preta + ervilhaca/milho | T/S e Ap+E | trigo/soja e ervilhaca/milho | T/S e Er/M |
| | P2 | SIP2 | pastagem de aveia preta + ervilhaca/milho e trigo/soja | Ap+E e T/S | ervilhaca/milho e trigo/soja | Er/M e T/S |
| SII | P1 | SIIP1 | trigo/soja e pastagem de aveia preta + ervilhaca + azevém/milho | T/S e Ap+E+Az | trigo/soja e pastagem de aveia preta/milho | T/S e Av/M |
| | P2 | SIIP2 | pastagem de aveia preta + ervilhaca + azevém/milho e trigo/soja | Ap+E+Az e T/S | pastagem de aveia preta/milho e trigo/soja | Av/M e T/S |
| SIV | P1 | SIVP1 | trigo/soja e pastagem de aveia preta + ervilhaca + azevém/pastagem de milheto | T/S e Ap+E+Az | trigo/soja e ervilha forrageira/milho | T/S e Ef/M |
| | P2 | SIVP2 | pastagem de aveia preta + ervilhaca + azevém/pastagem de milheto e trigo/soja | Ap+E+Az e T/S | ervilha forrageira/milho e trigo/soja | Ef/M e T/S |

Em todos os sistemas de rotação houve o objetivo de avaliar a produtividade de cada cultura em todos os anos de plantio. Para isso, um mesmo tratamento de rotação de culturas foi subdividido em duas parcelas experimentais (P1 e P2) em cada bloco (Tabela 11). Assim

para as duas culturas, tanto de inverno quanto de verão, foram obtidos dados de produção em todas as safras. O delineamento experimental utilizado foi de blocos casualizados, totalizando quatro blocos. As parcelas experimentais possuem dimensões de 50 x 40 m (área de 2000 m²).

A representação sequencial das culturas com as explorações entre os anos de 1995 e 2010 constam na Tabela 11.

No período de inverno, na fase 1, ocorreu o pastejo utilizando-se bovinos de aptidão mista (corte e leite). O controle do consumo animal levou em consideração o crescimento da aveia preta ou milheto. O critério adotado foi a altura, onde quando a aveia preta atingia a altura média de 25-30 cm, os animais iniciavam o pastejo e permaneciam até as plantas atingirem altura de 7 a 10 cm. No caso do milheto, a entrada dos animais ocorreu com as plantas atingindo 70 cm, permanecendo até que se atingisse de 10 a 15 cm de altura. Os bovinos (de 7 a 10 animais) foram introduzidos nas parcelas e a forragem disponível geralmente era consumida no primeiro dia. Antes e depois da entrada dos animais foi realizada a determinação da matéria verde sendo posteriormente, determinada a matéria seca.

Na rotação SIVP1 e SIVP2 durante a fase 2 do experimento houve o pastejo de rebrote o que ocorria após 30 a 40 dias do primeiro pastejo. Neste período houve o acúmulo médio de biomassa de 1,5 t a 2,0 t ha⁻¹ de matéria seca. Para o plantio de verão era realizada a dessecação química da vegetação. Na rotação SI e SII durante a fase 2 não houve mais o pastejo.

Os tratamentos fitossanitários, bem como época de semeadura, e o controle de plantas daninhas obedeceram às indicações para cada cultura. Para a colheita de aveia branca, soja e o trigo foram utilizados colhedora automotriz especial para parcelas experimentais. O milho foi colhido manualmente. O rendimento de grãos (aveia branca, milho, soja e trigo) foi determinado a partir da colheita de 1/3 da parcela, ajustando-se para umidade de 13%. Além disso, a quantidade de palha na superfície do solo foi avaliada após coleta do resíduo cultural remanescente de inverno em área de 0,5 m².

Tabela 11. Sequência de três sistemas de rotações de cultura em cada parcela, na fase 1 do experimento que compreendeu os anos de 1995 a 2003 e na fase 2 de 2003 a 2010, Coxilha, RS.

| Sistema | | SI | | SII | | SIV | |
|-----------|---------|-------|-------|----------|----------|----------|----------|
| Parcela | | P1 | P2 | P1 | P2 | P1 | P2 |
| Ano | Período | SIP1 | SIP2 | SIIP1 | SIIP2 | SIVP1 | SIVP2 |
| 1995 | Inverno | T | Ap+Er | T | Ap+Er+Az | T | Ap+Er+Az |
| 1995/1996 | Verão | S | M | S | Mi | S | Mi |
| 1996 | Inverno | Ap+Er | T | Ap+Er+Az | T | Ap+Er+Az | T |
| 1996/1997 | Verão | M | S | M | S | M | S |
| 1997 | Inverno | T | Ap+Er | T | Ap+Er+Az | T | Ap+Er+Az |
| 1997/1998 | Verão | S | M | S | Mi | S | Mi |
| 1998 | Inverno | Ap+Er | T | Ap+Er+Az | T | Ap+Er+Az | T |
| 1998/1999 | Verão | M | S | M | S | M | S |
| 1999 | Inverno | T | Ap+Er | T | Ap+Er+Az | T | Ap+Er+Az |
| 1999/2000 | Verão | S | M | S | Mi | S | Mi |
| 2000 | Inverno | Ap+Er | T | Ap+Er+Az | T | Ap+Er+Az | T |
| 2000/2001 | Verão | M | S | M | S | Mi | S |
| 2001 | Inverno | T | Ap+Er | T | Ap+Er+Az | T | Ap+Er+Az |
| 2001/2002 | Verão | S | M | S | M | S | Mi |
| 2002 | Inverno | Ap+Er | T | Ap+Er+Az | T | Ap+Er+Az | T |
| 2002/2003 | Verão | M | S | Mi | S | Mi | S |
| 2003 | Inverno | T | Er | T | Ap | T | Ef |
| 2003/2004 | Verão | S | M | S | M | S | M |
| 2004 | Inverno | Er | T | Ap | T | Ef | T |
| 2004/2005 | Verão | M | S | M | S | M | S |
| 2005 | Inverno | T | Er | T | Ap | T | Ef |
| 2005/2006 | Verão | S | M | S | M | S | M |
| 2006 | Inverno | Er | T | Ap | T | Ef | T |
| 2006/2007 | Verão | M | S | M | S | M | S |
| 2007 | Inverno | T | Er | T | Ap | T | Ef |
| 2007/2008 | Verão | S | M | S | M | S | M |
| 2008 | Inverno | Er | T | Ap | T | Ef | T |
| 2008/2009 | Verão | M | S | M | S | M | S |
| 2009 | Inverno | T | Er | T | Ap | T | Ef |
| 2009/2010 | Verão | S | M | S | M | S | M |

Ab: aveia branca; Ap: aveia preta; Az: azevém; Er: ervilhaca; Ef: ervilha forrageira; M: milho; Mi: milheto; Soja e T: trigo.

Sistema I: trigo/soja + ervilhaca/milho; Sistema II: trigo/soja + aveia preta/milho; Sistema IV: trigo/soja + ervilha forrageira/milho.

4.4.2. Clima

O clima predominante na região é o Cfa Subtropical, conforme classificação de Köppen, com temperaturas médias anuais variando entre 13,2°C e 23,6°C (mínima e máxima), os índices pluviométricos médios anuais são de 1800 mm a 1900 mm ano⁻¹ (Embrapa Trigo, 2012). As condições meteorológicas ocorridas durante janeiro de 2003 até março de 2010, quando ocorreu a coleta de dados podem ser observadas na Figura 13.

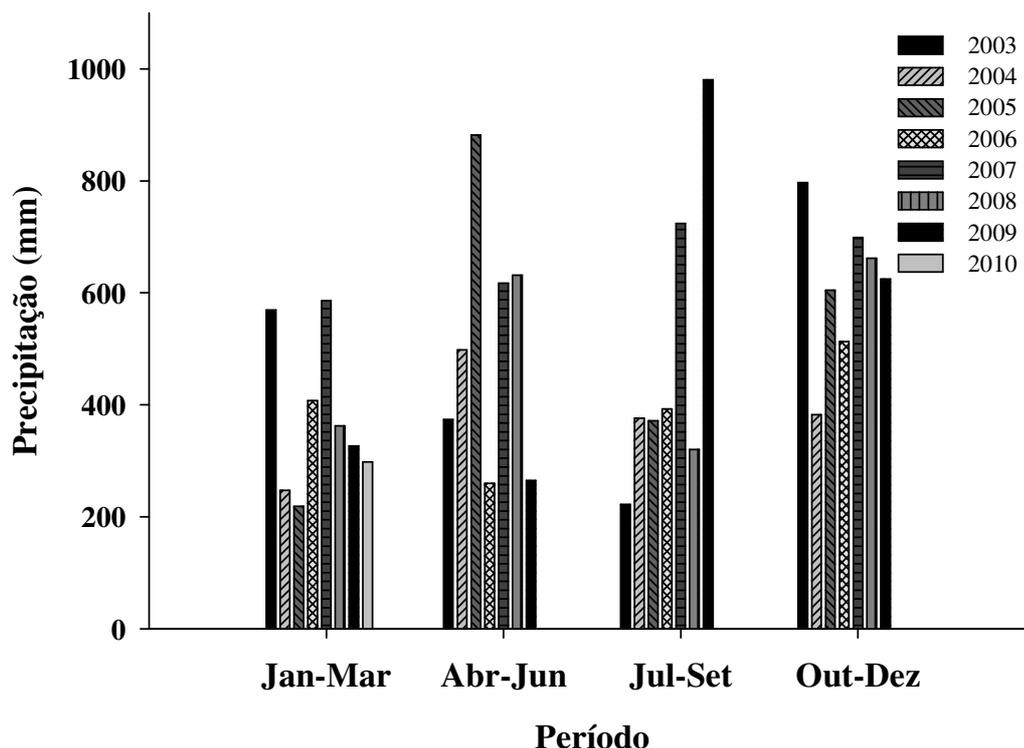


Figura 13. Precipitação média mensal registrada na região de Coxilha, RS, durante a fase 2 no período de Janeiro de 2003 até 2010.

4.4.3. Amostragem e características físicas e químicas do solo

O solo da área de estudo foi identificado (STRECK et al., 2002), como sendo um LATOSSOLO VERMELHO distrófico típico, a área apresenta um relevo suavemente ondulado.

Seguindo resultados da análise de solo realizada 4 anos antes da implantação do experimento, houve aplicação de calcário dolomítico com base no método SMP (pH 6,0) (SANTOS et al., 2004). Somente houve nova correção da acidez do solo em maio de 2009, onde foi colocado calcário na superfície do solo, de acordo com a indicação para sistema plantio direto, em torno de 2,0 Mg ha⁻¹ (informação pessoal do Dr. Henrique P. do Santos).

A amostragem do solo na área experimental foi realizada em maio de 2010. Em cada parcela dos tratamentos foram tomadas aleatoriamente quatro amostras compostas com trado holandês nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-60, 60-80 e 80-100 cm para realização de análise de C e N e granulométrica do solo. Após a coleta, as amostras foram secas ao ar, homogeneizadas e peneiradas (preparo de terra fina seca ao ar - TFSA).

Para a determinação da fertilidade do solo foram feitas amostragens nas profundidades de 0-5, 5-10, 10-15 e 15-20 cm no início do experimento e no ano de 2010 nas profundidades 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm (Tabela 12). Foi realizada a análise dos seguintes parâmetros do solo: pH em água, Al, Ca e Mg trocáveis segundo o método do KCl, e o P e K (Mehlich-1), de acordo com EMBRAPA (1997). Os resultados da fertilidade do início do experimento (SANTOS et al., 2004) e da época da amostragem de solo encontram-se na Tabela 12.

Tabela 12 Características químicas do solo da área experimental, no início do experimento, 1995 e na época da amostragem, 2010. São valores baseados em médias dos sistemas I, II e IV, (Campo Experimental – Embrapa Trigo, município de Coxilha, RS).

| Fertilidade do solo (1995*) | 0-5 cm | 5-10 cm | 10-15 cm | 15-20 cm |
|--|---------------|----------------|------------------|-----------------|
| pH em água | 5,58 | 5,65 | 5,51 | 5,18 |
| Al trocável (mmolc dm ⁻³) | 1 | 1,13 | 2,71 | 8,66 |
| Ca+ Mg trocáveis (mmolc dm ⁻³) | 93 | 94 | 81 | 62 |
| Matéria orgânica (g kg ⁻¹) | 41 | 36 | 33 | 32 |
| P extraível (mg kg ⁻¹) | 13,7 | 10,5 | 6,3 | 3,8 |
| K disponível (mg kg ⁻¹) | 158 | 77 | 51 | 36 |
| Fertilidade do solo (2010) | 0-5 cm | 5-10 cm | 10- 20 cm | 20-30 cm |
| pH em água | 5,64 | 5,38 | 5,31 | 5,25 |
| Al trocável (mmolc dm ⁻³) | 0,33 | 0,80 | 0,74 | 0,99 |
| Ca+ Mg trocáveis (mmolc dm ⁻³) | 84 | 52 | 46 | 37 |
| Matéria orgânica (g kg ⁻¹) | 42 | 30 | 26 | 25 |
| P extraível (mg kg ⁻¹) | 30,3 | 16,9 | 5,4 | 2,5 |
| K disponível (mg kg ⁻¹) | 275 | 172 | 173 | 91 |

* Fonte: SANTOS et al. (2004).

Nas amostras de TFSA de todos os tratamentos e profundidades foi realizada a análise granulométrica. O método utilizado para a separação das frações granulométricas foi o método da pipeta, segundo DAY (1965). Na Tabela 13 estão apresentadas a granulometria dos solos obtidos nas diferentes profundidades e entre os diferentes blocos.

Concomitantemente à amostragem com trado, foi realizada também a coleta para determinação da densidade do solo nas mesmas profundidades em todos os tratamentos. Para isso foi aberta uma trincheira por parcela, totalizando 24 trincheiras, com dimensões de 1,0 x 1,20 x 1,20 m de profundidade para coleta de amostras indeformadas no perfil do solo. Foram utilizados para coleta anéis de metal com volume interno de 83,6 cm³ (anéis de Kopeck). O anel foi cuidadosamente inserido, sem compactação, em cada profundidade do solo amostrada e, após a retirada do excesso de solo externamente aos anéis, foi transferido o conteúdo para saco plástico. No laboratório, as amostras foram colocadas para secar em estufa a 105°C, por 48 horas, para determinação do peso de matéria seca.

Estas determinações físicas são importantes neste tipo de estudo, para constatar se o solo da área experimental pertence à mesma classe textural e se possui densidade semelhante nas profundidades abaixo de 30 cm, permitindo assim que as comparações dos resultados de estoque de C e N entre os tratamentos seja em função da rotação e não das características do solo. Os resultados mostram que não houve variação destes parâmetros entre os tratamentos avaliados, conforme resultados da Tabela 12 e Tabela 13.

Tabela 13. Granulometria do perfil do solo, em diferentes profundidades, com intervalo de 0-100 cm, nos diferentes blocos na área experimental, Coxilha, RS.

| Bloco | Bloco 1 | | Bloco 2 | | Bloco 3 | | Bloco 4 | |
|-------------------|--------------------------|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------|----------------|--------------|
| Textura | Argila | Areia | Argila | Areia | Argila | Areia | Argila | Areia |
| Prof. (cm) | g kg⁻¹ | | | | | | | |
| 0 – 5 | 556 | 335 | 633 | 209 | 457 | 340 | 522 | 246 |
| 5-10 | 525 | 328 | 542 | 247 | 402 | 317 | 581 | 251 |
| 10-20 | 518 | 313 | 564 | 256 | 413 | 298 | 596 | 234 |
| 20-30 | 521 | 325 | 601 | 247 | 459 | 197 | 635 | 217 |
| 30-40 | 637 | 248 | 595 | 298 | 445 | 288 | 666 | 172 |
| 40-50 | 603 | 231 | 628 | 277 | 500 | 292 | 719 | 169 |
| 50-60 | 690 | 206 | 690 | 191 | 558 | 275 | 740 | 137 |
| 60-80 | 704 | 194 | 675 | 171 | 636 | 233 | 765 | 114 |
| 80-100 | 711 | 210 | 666 | 158 | 674 | 198 | 742 | 111 |

Tabela 14. Densidade do solo, nas diferentes profundidades, obtidos pela aplicação do uso de anel de Kopeck, nos diferentes sistemas agrícolas, Coxilha, RS.

| Sistema | SI | | SII | | SIV | |
|-------------------|--------------------------|-------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Parcela | P1 | P2 | P1 | P2 | P1 | P2 |
| Tratamento | SIP1 | SIP2 | SIIP1 | SIIP2 | SIVP1 | SIVP2 |
| Prof. (cm) | Mg m⁻³ | | | | | |
| 0-5 | 1,15 ±0,01 ¹ | 1,17 ±0,03 | 1,16 ±0,02 | 1,15 ±0,03 | 1,14 ±0,06 | 1,18 ±0,03 |
| 5-10 | 1,31 ±0,01 | 1,29 ±0,02 | 1,28 ±0,01 | 1,28 ±0,02 | 1,29 ±0,02 | 1,28 ±0,01 |
| 10-20 | 1,27 ±0,01 | 1,24 ±0,02 | 1,24 ±0,01 | 1,23 ±0,05 | 1,24 ±0,01 | 1,23 ±0,00 |
| 20-30 | 1,20 ±0,02 | 1,15 ±0,04 | 1,15 ±0,04 | 1,12 ±0,04 | 1,14 ±0,01 | 1,18 ±0,04 |
| 30-40 | 1,17 ±0,03 | 1,09 ±0,04 | 1,07 ±0,04 | 1,09 ±0,03 | 1,09 ±0,04 | 1,11 ±0,07 |
| 40-50 | 1,09 ±0,07 | 1,07 ±0,03 | 1,08 ±0,05 | 1,09 ±0,05 | 1,07 ±0,03 | 1,08 ±0,05 |
| 50-60 | 1,06 ±0,04 | 1,04 ±0,03 | 1,04 ±0,06 | 1,04 ±0,05 | 1,07 ±0,06 | 1,04 ±0,03 |
| 60-80 | 1,03 ±0,06 | 1,04 ±0,02 | 1,02 ±0,05 | 1,04 ±0,05 | 1,03 ±0,06 | 1,00 ±0,02 |
| 80-100 | 0,95 ±0,03 | 1,02 ±0,05 | 1,00 ±0,04 | 1,00 ±0,04 | 1,03 ±0,02 | 0,99 ±0,03 |

¹: erro padrão da média de quatro repetições.

As amostras de TFSA foram levadas para a área de preparo e recepção de amostras, na Embrapa Agrobiologia, onde sub-amostras do material foram trituradas em moinho de rolagem até a pulverização, conforme metodologia descrita por Smith e Myung (1990). Nestas amostras foram determinados os teores de C e N em um auto-analisador de carbono (Modelo Elemental Combustion System ECS 4010, Costech Analytical Technologies Inc., Valencia, USA), no laboratório de Química Agrícola da Embrapa Agrobiologia.

4.4.4. Determinação dos estoques de carbono e nitrogênio do solo

Os estoques de C e N do solo foram determinados utilizando a concentração do C e N nas profundidades 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-40, 40-50, 50-60, 60-80 e 80-100 cm, com a sua respectiva densidade do solo. O processo de ajuste da massa de solo foi de camada a camada, seguindo a diferença entre a densidade do solo de cada camada. O estoque de carbono foi calculado utilizando a equação descrita por SISTI et al. (2004).

4.4.5. Quantificação do balanço de N nos sistemas de rotação de cultura

O balanço de N sobre as rotações de culturas foi calculado através da quantidade de N adicionada e a removida na fase 2 do experimento (2003-2010). Para se chegar a este resultado foi necessário uma série de levantamentos e etapas que serão descritos a seguir.

Para avaliar a quantidade do N que entrou no sistema foram utilizadas as quantidades de fertilizantes nitrogenados aplicadas, somadas à contribuição da FBN para a soja, ervilhaca e ervilha forrageira. Não foi computada neste cálculo as perdas de N por desnitrificação, lixiviação ou volatilização. Ainda são poucos os estudos em relação às perdas de N utilizando fertilizante nitrogenado (uréia), por lixiviação de nitrato e por volatilização de amônia aplicado superficialmente ou incorporado nos solos. Além disso, as perdas de N estão relacionadas com diversos fatores e por isso não foram incluídas nos cálculos do balanço de N nos sistemas. Assumiu-se que todo o N fertilizante adicionado foi absorvido pela cultura ou permaneceu no solo.

4.4.6. Quantidade de fertilizantes utilizados nos tratamentos

A adubação de manutenção foi realizada de acordo com a indicação para cada cultura (SOCIEDADE, 2004) e baseada nos resultados de análise de solo. O milho cultivado após as leguminosas (ervilha e ervilhaca) não recebeu adubação nitrogenada de cobertura. Os totais de fertilizantes aplicados nos tratamentos encontram-se na Tabela 15.

Tabela 15. Média anual de N, P₂O₅ e K₂O adicionados pelas adubações de plantio e de cobertura realizadas entre os diferentes períodos 1995 a 2010 nos diferentes sistemas de rotação de cultura. Coxilha, RS.

| Período | | | 1995-2003 | | | 2003-2010 | | |
|--------------------|----|-------|-------------------------------|-------------------------------|------------------|-----------|-------------------------------|------------------|
| Fertilizantes | | | N | P ₂ O ₅ | K ₂ O | N | P ₂ O ₅ | K ₂ O |
| Rotação de Cultura | | | (kg ha ⁻¹ por ano) | | | | | |
| SI | P1 | SIP1 | 52 | 45 | 98 | 36 | 45 | 98 |
| | P2 | SIP2 | 53 | 45 | 98 | 29 | 45 | 98 |
| SII | P1 | SIIP1 | 52 | 37 | 76 | 60 | 45 | 98 |
| | P2 | SIIP2 | 53 | 37 | 76 | 55 | 45 | 98 |
| SIV | P1 | SIVP1 | 44 | 40 | 83 | 36 | 45 | 98 |
| | P2 | SIVP2 | 48 | 40 | 83 | 35 | 45 | 98 |

4.4.7 Cálculo de rendimento dos grãos

O rendimento de grãos foi determinado a partir da colheita de toda a parcela, sendo corrigido para 13% de umidade. Todos os rendimentos das safras foram avaliados pela equipe da Embrapa Trigo. Foram obtidos os valores médios da produtividade dos grãos das culturas avaliadas nos períodos de 1995-2003 e os valores médios das repetições de todas as safras dos anos entre 2003 e 2010. No entanto, para os cálculos de balanço de N foram utilizados apenas os dados da segunda fase do experimento de 2003-2010.

4.4.8 Biomassa da parte aérea das culturas

Foi realizada coleta para análise de biomassa da parte aérea nas culturas de inverno, ervilhaca, aveia preta e ervilha forrageira nas duas coletas amostradas, foi realizada uma amostragem da parte aérea em cada parcela, totalizando 24 parcelas, com o auxílio de um

gabarito (quadrado metálico de 0,5 m² de área) disposto aleatoriamente na área todos os anos. Foi coletado todo o material contido na área delimitada pelo gabarito. O material foi seco em estufa com circulação forçada a 65°C, por 72 h, e posteriormente pesado. Para as culturas de trigo, soja e milho foram realizados cálculos da estimativa de biomassa da matéria seca da parte aérea dos resíduos utilizando o índice de colheita para essas culturas, conforme Tabela 16. Utilizou-se como valor de referência o trabalho de Tomm (1996). O índice de colheita seria o rendimento de MS de grãos (kg ha⁻¹) em relação à MS total (kg ha⁻¹) (MS da parte aérea mais do grão).

4.4.9 Cálculos para determinação do balanço acumulativo de N nos sistemas de rotação

A exportação do N de cada sistema foi computada baseada na quantidade de N extraída nos grãos das culturas da soja, milho e trigo. Além do N no grão ocorreu o pastejo no sistema com aveia preta, SIIP1 e SIIP2, onde foi estimado o valor de retirada de N da parte aérea da cultura.

A quantidade de N que entrou no sistema via a FBN foi estimada para a soja e para as leguminosas de inverno, ervilhaca e ervilha forrageira. Destaca-se que a quantidade de N total que entra no sistema através da FBN das leguminosas varia com a espécie, fase de crescimento e pelo manejo adotado (HERRIDGE et al., 2008). A estimativa da quantidade de N proveniente da FBN foi calculada utilizando a porcentagem de N na planta fixado da atmosfera (%Ndfa) para cada espécie com base em dados da literatura. Na cultura da soja e ervilhaca foram considerados os valores obtidos por Jantalia (2005), que avaliou a contribuição da FBN na cultura da soja e ervilhaca sob PD e PC em diferentes rotações de cultura em Passo Fundo, RS, estimada pela técnica de $\delta^{15}\text{N}$ que foi soja 90% e 81% para ervilhaca. Em relação à cultura de ervilha forrageira, não foi encontrado nenhum trabalho de contribuição da FBN no Brasil. Dessa forma, foram utilizados os valores obtidos no artigo de People et al. (2009) que encontrou como média 65 % em diferentes localidades.

Para a aveia preta utilizada para pastejo foi considerado que de 100% do N da MS, apenas 5% foi consumido pelo gado, sendo o restante excretado na forma de fezes e urina. Utilizando o percentual de perdas de N nas fezes e urina, segundo o IPCC (2006), estima-se que de 20% do N é perdido por volatilização. Assim, foi considerado que 25% do N total quantificado foram retirados do sistema através do pastejo dos animais.

O resultado do cálculo de entradas de N menos as saídas de cada ano foram somados e ao final do período chegou-se ao balanço acumulativo de todas as rotações.

4.4.10 Estimativa do total de nitrogênio e carbono adicionado pelas culturas

O teor de N total da referente à biomassa da parte aérea das plantas foi calculado a partir da porcentagem desses elementos na matéria seca da planta obtido na literatura (Tabela 16) e para algumas culturas os valores foram obtidos na safra do ano de 2009 conforme a Tabela 16. Para as culturas de inverno, o teor de N na matéria seca foi realizado no período de pleno florescimento, pela equipe Dr. Henrique P. Santos na Embrapa Trigo pelo método de Kjeldahl (TEDESCO et al., 1995). Índices de colheita obtidos na literatura, utilizados para a estimativa de resíduo de colheita (parte aérea) das culturas (Embrapa Trigo, Passo Fundo, RS). Teores utilizados para estimar a quantidade de N nos resíduos de colheita nos tratamentos de manejo do solo e rotações culturais.

Tabela 16. Índices de colheita obtidos na literatura e utilizados para a estimativa de resíduo da parte aérea das culturas. Teores de nitrogênio e carbono da parte aérea das culturas. Coxilha, RS

| Culturas de cobertura | Soja | Milho | Trigo | Ervilhaca | Aveia | Ervilha |
|------------------------------|-------------|--------------|--------------|------------------|--------------|----------------|
| Índice de colheita* | 0,43 | 0,41 | 0,30 | - | - | - |
| Carbono (%)* | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 | 45 |
| Nitrogênio (%) | 1,7* | 1,0* | 1,0* | 3,2** | 1,2** | 2,9** |
| Relação C/N | 26,5 | 45 | 45 | 14,2 | 37,5 | 15,5 |

*Valor estimado de acordo com a literatura.

** Valor da média de quatro repetições para cada rotação, referente a safra do ano de 2009. (Embrapa Trigo).

A adição de C pelas culturas de cobertura do solo foi avaliada a partir de amostragem, no período de pleno florescimento da fitomassa (método do quadrado de 1 m²). A massa fresca coletada foi seca em estufa até peso constante e quantificada em relação a sua massa de resíduos secos. As adições de C pelo trigo, milho e da soja foram estimadas a partir da relação entre a produtividade da cultura nos diferentes sistemas de manejo e a produção de MS da parte aérea. Considerou-se o percentual de 45% de C na matéria seca (MS) das plantas de cobertura e milho (AITA et al., 1994; BAYER et al., 1998; SPAGNOLLO et al., 2002) e a contribuição do sistema radicular na adição de C equivalente a 30% do C adicionado pela parte aérea das culturas (FEHRENBACHER e ALEXANDER, 1955; BUYANOVSKY e WAGNER, 1986; BALESSENT e BALABANE, 1992; CROZIER e KING, 1993; BOLINDER et al., 1997; KISSELE et al., 2001).

4.4.11 Análises estatísticas

As características químicas, físicas e biológicas das áreas de estudo em diferentes profundidades e épocas de coleta nas distintas coberturas do solo foram submetidas à análise de variância e os valores médios comparados entre si pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

4.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.5.1. Rendimento de grãos e biomassa da parte aérea das culturas

Durante as safras de 2003-2010 a produção média da cultura da soja variou de 1,5 a 2,7 Mg ha⁻¹, enquanto na cultura do trigo a variação foi de 1,4 a 3,0 Mg ha⁻¹. Não foram observadas diferenças entre os tratamentos de rotação de culturas no rendimento de grãos de soja e de trigo. Na cultura do milho as variações entre os anos foi maior, com rendimento variando entre 1,4 e 9,6 Mg ha⁻¹. A menor produtividade do milho foi observada na safra de 2004/05. Segundo informação do pesquisador responsável (Henrique Pereira dos Santos) o baixo rendimento de grãos e de algumas características agrônômicas do milho na safra 2004/05, foi devido à forte estiagem que ocorreu na região nos meses de dezembro de 2004 e fevereiro de 2005. Entre os tratamentos foram observadas diferenças no rendimento do milho em duas safras. Na safra de 2003/04, o tratamento SIVP2 apresentou a menor produção, enquanto no ano de 2009/10 o tratamento SIIP2 apresentou maior produção. O tratamento SIIP2 foi o tratamento que manteve boa produtividade de milho durante os anos, resultando na maior média geral entre os tratamentos.

Segundo dados do IBGE (2011), a produtividade média da safra do Estado do Rio Grande do Sul no ano de 2011 foi de 2,78 Mg ha⁻¹ para soja, 2,94 Mg ha⁻¹ para o trigo e 5,25 Mg ha⁻¹ para o cultivo do milho. Como podemos observar na Tabela 17 com os dados do IBGE (2011), que na média, as produtividades desses experimentos apresentaram baixo rendimento em relação a média da região. Esse resultado é devido a alguns fatores inerentes às condições de cultivo e também à distribuição das chuvas durante o experimento, onde foram registrados períodos de estiagem, não favorecendo o desenvolvimento das culturas. No entanto, estiveram próximos das médias do estado em alguns anos os rendimentos obtidos para as culturas da soja, trigo e milho.

Tabela 17. Rendimento de grãos (corrigidos para 13% de umidade) de soja milho e trigo (Mg ha^{-1}) cultivados em sucessão com plantas para cobertura do solo no inverno. Sistema I trigo/soja e ervilhaca/milho; Sistema II trigo/soja e aveia preta/milho; e Sistema IV trigo/soja e ervilha/milho.

| Cultura | Soja | | | | | | Milho | | | | | | Trigo | | | | | |
|--------------|----------------------|----|-----|----|-----|----|--------|----|-----|----|-----|----|--------|----|-----|----|-----|----|
| | SI | | SII | | SIV | | SI | | SII | | SIV | | SI | | SII | | SIV | |
| Rotação | P1 | P2 | P1 | P2 | P1 | P2 | P1 | P2 | P1 | P2 | P1 | P2 | P1 | P2 | P1 | P2 | P1 | P2 |
| Parcela | Mg. ha^{-1} | | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 95/96 | 2, | 2, | 2, | 2, | 2, | 2, | 6, | 6, | 6, | 6, | 4, | 4, | 2, | 2, | 2, | 2, | 2, | 2, |
| 02/03 | 7 | 7 | 6 | 6 | 7 | 7 | 4 | 4 | 7 | 7 | 4 | 4 | 3 | 3 | 3 | 3 | 2 | 2 |
| 03/04 | 2, | - | 2, | - | 2, | - | - | 5, | - | 5, | - | 3, | - | 1, | - | 1, | - | 2, |
| | 1 | | 1 | | 2 | | | 4 | | 5 | | 6 | | 9 | | 9 | | 0 |
| 04/05 | - | 2, | - | 2, | - | 2, | 1, | - | 1, | - | 1, | - | 2, | - | 2, | - | 3, | - |
| | | 3 | | 2 | | 4 | 7 | | 5 | | 4 | | 9 | | 8 | | 0 | |
| 05/06 | 1, | - | 1, | - | 1, | - | - | 6, | - | 7, | - | 5, | - | 2, | - | 2, | - | 2, |
| | 5 | | 8 | | 6 | | | 6 | | 5 | | 9 | | 6 | | 5 | | 6 |
| 06/07 | - | 2, | - | 2, | - | 2, | 4, | - | 5, | - | 5, | - | 1, | - | 1, | - | 1, | - |
| | | 2 | | 2 | | 3 | 4 | | 4 | | 0 | -- | 4 | | 5 | | 7 | |
| 07/08 | 1, | - | 1, | - | 1, | - | - | 5, | - | 5, | - | 4, | - | 2, | - | 2, | - | 2, |
| | 8 | | 7 | | 8 | | | 1 | | 2 | | 9 | | 2 | | 3 | | 2 |
| 08/09 | - | 2, | - | 2, | - | 2, | 6, | - | 6, | - | 6, | - | 2, | - | 2, | - | 2, | - |
| | | 2 | | 0 | | 1 | 4 | | 3 | | 0 | | 2 | | 6 | | 5 | |
| 09/10 | 2, | - | 2, | - | 2, | - | - | 6, | - | 9, | - | 6, | - | 1, | - | 1, | - | 2, |
| | 4 | | 7 | | 6 | | | 2 | | 3 | | 8 | | 9 | | 9 | | 0 |
| Média | 1, | 2, | 2, | 2, | 2, | 2, | 4, | 5, | 4, | 6, | 4, | 5, | 2, | 2, | 2, | 2, | 2, | 2, |
| | 9 | 3 | 1 | 2 | 0 | 3 | 2 | 8 | 4 | 9 | 1 | 3 | 2 | 2 | 3 | 3 | 4 | 3 |
| F | 0,8019 | | | | | | 0,0012 | | | | | | 0,4049 | | | | | |
| CV | 7,59 | | | | | | 8,40 | | | | | | 7,53 | | | | | |

*Médias das produtividades entre os anos de 1995 até 2002/03.

A produção de matéria seca da parte aérea das culturas nos sistemas de rotação encontra-se na Figura 14. Como era esperado, a maior produção de MS foi observada nos anos onde houve o cultivo de gramíneas, independente da rotação de cultura, aportando uma grande quantidade de resíduos vegetais no solo após a colheita. Quando foi realizada a soma acumulativa de MS de resíduo no período de 2003 até 2010, tem-se a rotação SIIP2 com 88 Mg ha^{-1} de MS, enquanto que as outras rotações demonstraram variação de 64 até 83 Mg ha^{-1} .

Entre as rotações de cultura, a rotação SIIP2 foi o tratamento com maior adição de MS ao longo dos anos, principalmente pela manutenção da produtividade de milho e aveia, mesmo em relação ao tratamento de mesma rotação o SIIP1.

No ano de 2006 e 2009 no período de abril e maio houve uma estiagem durante a semeadura das culturas de inverno, período crítico para germinação e desenvolvimento das plantas. Este evento climático prejudicou a produção de MS dessas culturas. No ano de 2006, nas rotações SIP1 e SIVP1, e no ano de 2009, na rotação SIP2, o rendimento foi inferior à metade da média da cultura para ervilhaca e ervilha forrageira (Figura 14).

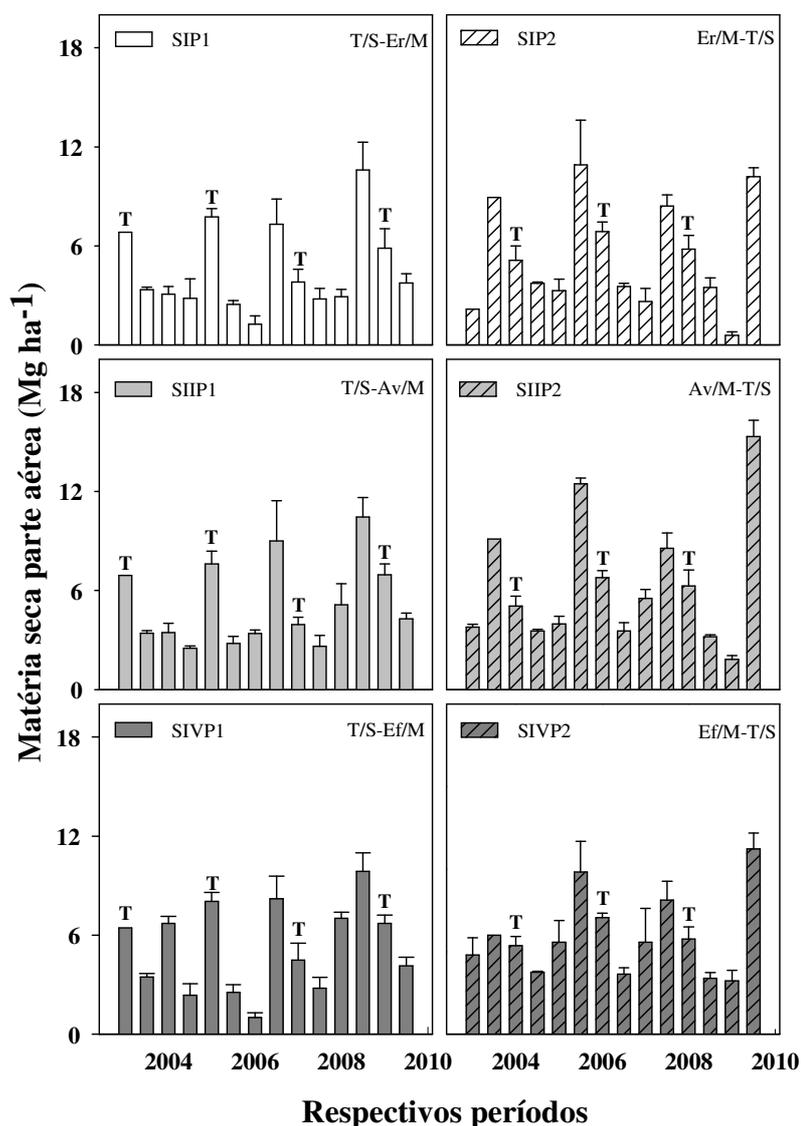


Figura 14. Matéria seca de parte aérea (Mg. ha⁻¹) das culturas de trigo (T), soja (S), milho (M), ervilhaca (Er), aveia (Av) e ervilha forrageira (Ef) nos diferentes tratamentos de rotação de cultura. A letra T que se encontra acima das barras é referente a massa seca de trigo seguido das demais culturas de acordo com o sistema de rotação.

A produção de MS da parte aérea das plantas utilizadas como adubo verde variou entre 0,6 a 3,3 Mg ha⁻¹ para ervilhaca, já para aveia preta a variação foi de 1,8 a 5,5 Mg ha⁻¹, e 1,0 a 7,0 Mg ha⁻¹ para ervilha forrageira (Figura 14). Em Santa Maria, RS, Aita et al. (2001) avaliaram o desempenho de plantas de cobertura do solo durante quatro anos em sistema plantio direto e as espécies que apresentaram a maior produção de MS na parte aérea foram o tremoço azul (5,2 Mg ha⁻¹) e a aveia preta (4,4 Mg ha⁻¹), seguidas de ervilha forrageira (2,7 Mg ha⁻¹) e ervilhaca comum (2,5 Mg ha⁻¹). Contudo, no presente estudo a produção de massa seca de ervilha forrageira foi superior ao encontrado por esses autores, enquanto que para as outras plantas de inverno aveia preta e ervilhaca, a produção de MS foi semelhante.

4.5.2. Estimativa da quantidade de C, N e Relação C:N dos resíduos nos sistemas de rotação ao longo dos anos

Nos três tratamentos de rotação de cultura na subparcela 1, a quantidade de N que permaneceu nos resíduos foi semelhante, com variação máxima de 140 kg N. ha⁻¹ entre as culturas (Tabela 18). Nos tratamentos na subparcela 2 a quantidade de N variou mais entre as culturas, apresentando variações entre 207 e 279 kg N. ha⁻¹ (Tabela 18). Quando foi considerado o total de N no período, a rotação SIV (T/S-Ef/M) foi o tratamento com maiores quantidades de N nos resíduos as duas subparcelas, SIVP1 e SIVP2, o que pode ser atribuído à cultura da ervilha forrageira, que contribuiu em média com 112 kg N. ha⁻¹ cada vez que foi cultivada. As outras coberturas de inverno, ervilhaca e aveia preta, colaboraram com 72 e 87 kg N. ha⁻¹, respectivamente.

Tabela 18. Estimativa da quantidade total de N e C nos resíduos das culturas, e a relação C:N em todo o período avaliado (2003-2010).

| Resíduo de Cultura | SI (T/S-Er/M) | | SII (T/S- Av/M) | | SIV (T/S-Ef/M) | |
|--------------------|-----------------------------|----------|-----------------|---------|----------------|-----------|
| | SIP1 | SIP2 | SIIP1 | SIIP2 | SIVP1 | SIVP2 |
| | N kg ha⁻¹ | | | | | |
| Soja | 210 ±22 | 183 ±11 | 223 ±23 | 175 ±11 | 219 ±27 | 183 ±7 |
| Milho | 207 ±37 | 385 ±31 | 220 ±32 | 454 ±19 | 204 ±29 | 351 ±31 |
| Trigo | 243 ±8 | 178 ±17 | 254 ±15 | 181 ±15 | 257 ±18 | 182 ±9 |
| Inverno | 230 ±33 | 275 ±33 | 136 ±0 | 181 ±0 | 343 ±24 | 446 ±99 |
| Entrada de N | 890 ±67 | 1020 ±77 | 832 ±34 | 992 ±23 | 1023 ±64 | 1162 ±97 |
| | C Mg ha⁻¹ | | | | | |
| Entrada de C | 29,1 ±1,1 | 34 ±1,2 | 32,6 ±0,6 | 40 ±0,4 | 33,2 ±1,0 | 37,5 ±1,7 |
| Relação C:N | 32,7 | 33,4 | 39,2 | 40,4 | 32,4 | 32,2 |

A quantidade de C que foi depositada nos resíduos está diretamente relacionada com a quantidade de MS, onde os tratamentos que apresentaram as maiores quantidades foram SIIP2 e SIVP2 (Tabela 18). Quanto à relação C:N, a rotação SII apresentou maior valor entre as rotações e é atribuído ao plantio de aveia no inverno, sendo observada uma relação C:N de 39,2 e 40,2 nas subparcelas 1 e 2 respectivamente, enquanto que, nas outras rotações o aumento na proporção de leguminosa provocou uma diminuição dos valores da relação C:N dos resíduos vegetais (Tabela 18).

4.5.3. Balanço de N anual nas diferentes culturas

Na Tabela 19, encontram-se os valores de entrada e saída de N para cada cultura e o saldo de N remanescente. Pode-se observar que independente do tratamento, as culturas de trigo e soja deixam um pequeno saldo positivo de N. A cultura do milho deixa um saldo negativo, menos intenso na rotação SIIP1. Quanto às culturas do tipo adubo verde, observa-se também um saldo positivo nas três rotações, lembrando que para a cultura aveia preta possibilitar um saldo positivo foi necessário receber adubação nitrogenada e que neste estudo considerou-se perda de 25% da quantidade de N no resíduo da cultura devido às perdas ocasionadas pelo pastejo. Outros trabalhos da literatura destacaram que, no consórcio de duas gramíneas, como aveia e milho, é necessário o acréscimo da adubação nitrogenada, caso contrário, poderá resultar em déficit de N para a cultura do milho e a diminuição do N no solo (SÁ, 1993; ZOTARELLI, 2000, ZOTARELLI, 2005).

Tabela 19. Balanço anual médio de N (kg N ha^{-1}) nas culturas em cada sistema de rotação e sub parcelas, em Coxilha, RS.

| Fonte de Nitrogênio | Sistema | (T/S-Er/M) | | (T/S- Av/M) | | (T/S-Ef/M) | |
|---|-------------------|--|------|-------------|-------|------------|-------|
| | | SIP1 | SIP2 | SIIP1 | SIIP2 | SIVP1 | SIVP2 |
| | | Entrada de N (kg N ha^{-1}) | | | | | |
| Adubo mineral | Planta | | | | | | |
| | Trigo | 61 | 57 | 61 | 58 | 61 | 58 |
| | Soja | - | - | - | - | - | - |
| | Cobertura inverno | - | - | 79 | 62 | - | - |
| FBN | Milho | 15 | 16 | 60 | 61 | 15 | 27 |
| | Trigo | - | - | - | - | - | - |
| | Soja | 130 | 151 | 139 | 145 | 136 | 152 |
| | Cobertura inverno | 58 | 52 | - | - | 74 | 72 |
| Adubo + FBN | Milho | - | - | - | - | - | - |
| | T/S | 191 | 208 | 199 | 203 | 197 | 210 |
| | AV/M | 74 | 68 | 139 | 122 | 90 | 99 |
| | | Saída de N (kg N ha^{-1}) | | | | | |
| N-grão | Trigo | 53 | 56 | 56 | 53 | 56 | 53 |
| | Soja | 118 | 137 | 126 | 132 | 124 | 138 |
| | Cobertura inverno | - | - | 23 | 21 | - | - |
| | Milho | 59 | 82 | 62 | 96 | 58 | 75 |
| | | Balanço de N (kg N ha^{-1}) | | | | | |
| Saldo Anual= Entrada N (Adubo + FBN) - N no grão | Trigo | 7 | 1 | 5 | 5 | 4 | 5 |
| | Soja | 12 | 14 | 13 | 14 | 13 | 14 |
| | Cobertura inverno | 58 | 52 | 56 | 41 | 74 | 72 |
| | Milho | -43 | -66 | -2 | -36 | -42 | -48 |

Deve ser levado em consideração que nas rotações de SI e SIV a dose da adubação nitrogenada é inferior àquela aplicada em SII. No entanto, as leguminosas utilizadas como cobertura de inverno contribuíram com quantidades significativas de N, com valores próximos ao que foi aplicado de fertilizante nitrogenado. Esta contribuição de N proveniente da FBN influenciou positivamente no balanço de N das rotações, onde sua ausência acarretaria saldos negativos.

4.5.4 Balanço acumulativo de N nas rotações de cultura

No decorrer dos anos de cultivo ocorreram alguns saldos negativos de N, mas de maneira geral observou-se saldos positivos no balanço de N nas rotações de cultura (Figura 15).

Nas rotações de cultura SI e SIV, a contribuição positiva ocorreu pela entrada significativa de N via FBN das espécies ervilhaca e ervilha forrageira (Figura 15). Apesar de a ervilhaca ser considerada mais eficiente na fixação de N (76% contra 65% da ervilha forrageira) sua produção foi menor, principalmente no sistema SIP2 (Figura 14). Este menor rendimento de MS refletiu diretamente no saldo acumulativo de N no sistema que foi menor em relação à rotação com ervilha forrageira, SIV (Figura 15). Na rotação SII, o saldo positivo está relacionado à aplicação adequada de N via adubo nitrogenado, o que foi importante para manutenção da produção de MS nas culturas de milho e aveia preta. Os saldos finais desse

período para essas rotações foram de 248 e 91 kg N ha⁻¹ para SIIP1 e SIIP2, respectivamente (Figura 15).

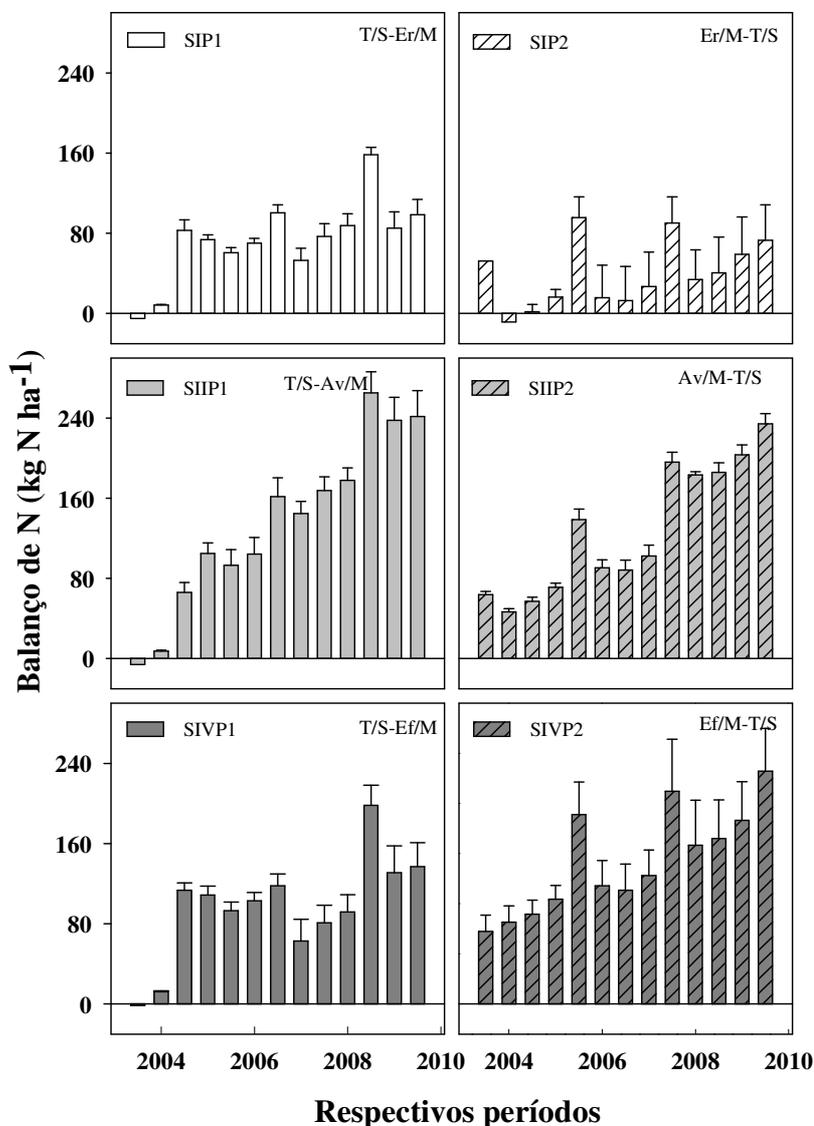


Figura 15. Balanço acumulativo de N (kg N ha⁻¹) nas culturas em cada sistema de rotação e sub parcelas, no período 2003-2010, em Coxilha, RS.

4.5.5 Efeito das diferentes rotações de culturas sobre a distribuição de C, N e relação C:N no perfil do solo

A deposição contínua e a manutenção de resíduos depositados ao longo dos anos na superfície no solo promoveram o aumento de C e N nas camadas superficiais em todas as rotações de cultura (Figura 16). Com exceção da rotação SIVP1, que na primeira camada apresentou menor concentração de C e N em relação às outras rotações de culturas, nas demais profundidades não foram observadas diferenças entre os sistemas de rotação (Figura 16).

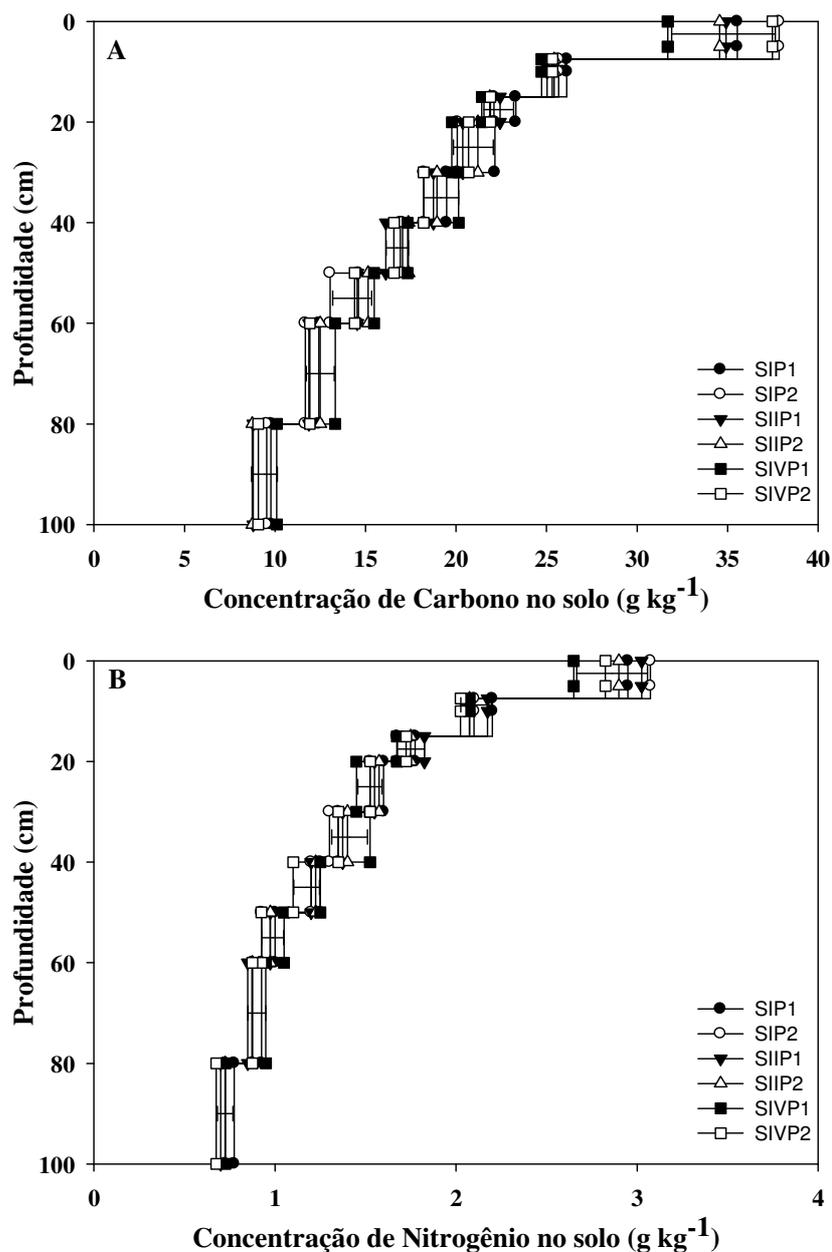


Figura 16. Concentração de C e N (A e B) no perfil do solo nos sistemas de rotações de culturas e profundidade, em Coxilha, RS. Na rotação T/S-Er/M, sistema SIP1 (●) e SIP2 (○); na rotação T/S- Av/M sistema SIIP1 (▼) e SIIP2 (△) e na rotação T/S-Ef/M, sistema SIVP1 (■) e SIVP2 (□). Barras horizontais em cada profundidade significam o valor da diferença mínima significativa (DMS) obtido no teste de Tukey a 5%.

A deposição de resíduos das culturas na superfície do solo conduz a maior teor de C e N na camada de 0 a 5 cm em relação à profundidade de 5 a 10 cm, apresentando em média um acréscimo de 27 e 28% na concentração de C e N, respectivamente. Esse maior conteúdo de C e N na superfície do solo concorda com outros estudos que verificaram efeitos semelhantes da cobertura do solo em sistema de PD (SISTI et al., 2004; BAYER et al., 2000; DIEKOW et al., 2005; SÁ e LAL, 2009; BODDEY et al., 2010).

Foram observadas diferenças expressivas na relação C:N ao longo do perfil do solo para todas as rotações de culturas, sem diferenças entre as subparcelas 1 e 2 (Figura 17). A

relação C:N no solo nas duas primeiras profundidades (0-5 e 5-10 cm) em todas as rotações de culturas foi, em média, de 12:1. Nestas camadas se concentram os resíduos da parte aérea das culturas. Abaixo dessa profundidade, houve uma tendência de aumento na relação C:N do solo até a camada de 50-60 cm, atingindo em média 14,1. No entanto, abaixo desta profundidade até 100 cm a tendência da relação C:N foi de reduzir até 12,8. Este padrão de distribuição da relação C:N pode estar associado ao sistema radicular mais profundo das gramíneas, espécies presentes em todas as rotações, que poderia adicionar maior quantidade de C em profundidade. As rotações SII e SIV apresentaram uma maior relação C:N do solo, diferenciando-se estatisticamente da rotação SI na camada de 40 a 60 cm.

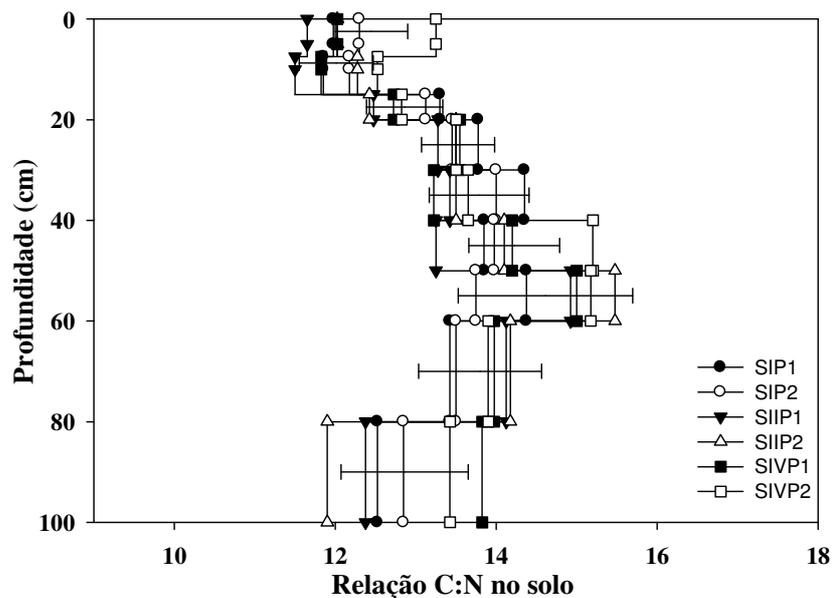


Figura 17. Relação C:N no perfil do solo, na profundidade de 0 a 100 cm, em áreas sob diferentes sistemas de rotação, em Coxilha, RS. Na rotação T/S-Er/M, sistema SIP1 (●) e SIP2 (○); na rotação T/S- Av/M, sistema SIIP1 (▼) e SIIP2 (△) e na rotação T/S-Ef/M, sistema SIVP1 (■) e SIVP2 (□). Barras horizontais em cada profundidade significam o valor da diferença mínima significativa (DMS) obtido no teste de Tukey a 5%.

Estes resultados vão ao encontro aos relatados por Diekow (2003) e Diekow et al. (2005), em experimento de longa duração (18 anos), em ARGISSOLO VERMELHO DISTRÓFICO típico, de textura franco-argilo-arenosa com três sistema de cultura em plantio direto (aveia/milho, guandu/milho e lab-lab/milho), Sul do Brasil. Os autores encontram um aumento da relação C:N até a profundidade de 47,5 cm e em seguida tornando a diminuir até a profundidade de 107,5 cm, e consideram que essa a diminuição da relação C:N abaixo profundidade de 47,5 cm está relacionada com a diminuição da matéria orgânica particulada (MOP) e passando a ficar diretamente relacionada com a matéria orgânica associada aos minerais (MOAM). A MOP corresponde ao material orgânico pouco decomposto, enquanto a MOAM está associada ao grau de decomposição mais elevado da fração pesada (DICK et al., 2009). Estes resultados mostram a importância de analisar a estabilidade da MOS.

Os dados de concentração de C e N no solo foram submetidos ao teste de correlação linear. Os resultados encontrados se correlacionaram significativamente ($P < 0,0001$), independente da rotação (Figura 18). Isto era esperado, pois os dados de C e N apresentaram um comportamento semelhante em profundidade e entre os tratamentos. Deve-se salientar que, utilizando o modelo linear, a relação C:N dessa área apresentou valor médio de 11,27.

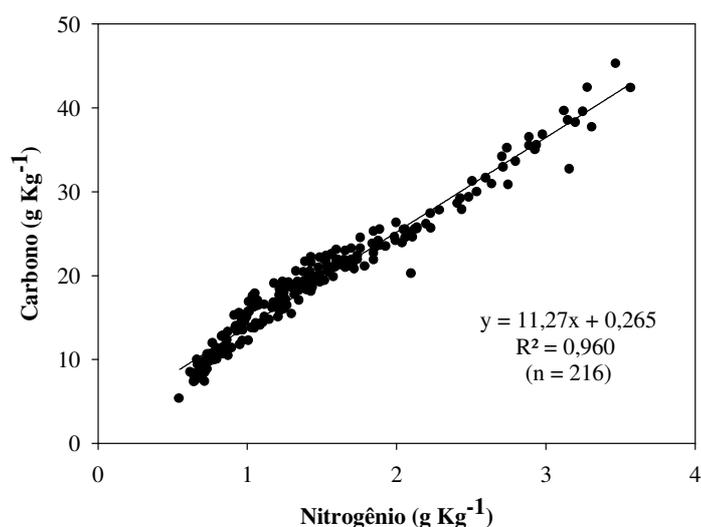


Figura 18. Correlação linear entre os teores de C e N (g kg^{-1}) no perfil do solo (0-100 cm), em área sob diferentes rotações de cultura.

Resultado semelhante foi obtido por Sisti (2001), onde a correlação entre os teores de C e N foi linear e ficou ao redor de 12,2, em experimento de longo prazo com diferentes sistemas de rotação de culturas e preparo do solo.

4.5.6 Efeito das diferentes rotações de culturas sobre a distribuição isotópica de $\delta^{13}\text{C}$

Os resultados da análise isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ nas rotações de culturas variaram entre -20‰ na superfície (0-10 cm) e -18‰ em profundidade (20-100 cm) (Figura 19); porém se comparadas as rotações de cultura não houve diferença estatística. Este enriquecimento em $\delta^{13}\text{C}$ com a profundidade do solo provavelmente está relacionado ao histórico da área.

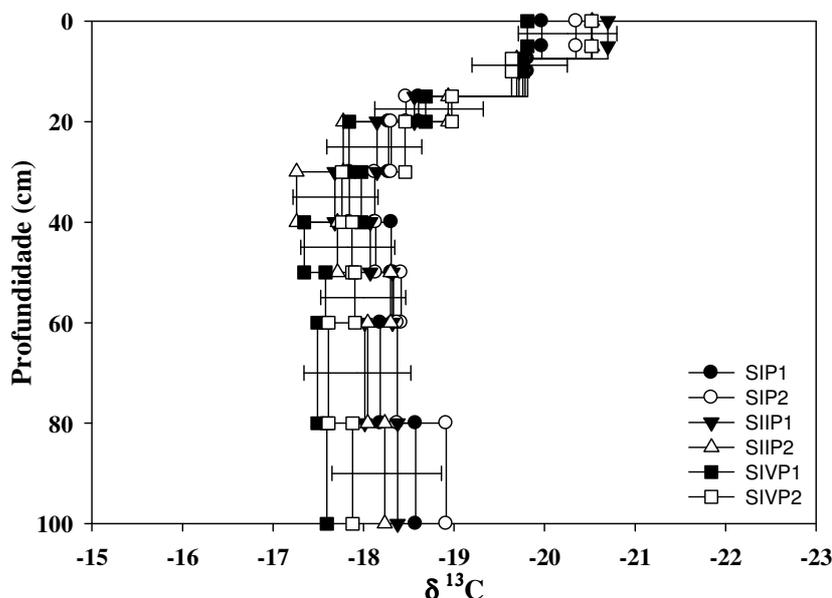


Figura 19. Distribuição isotópica de $\delta^{13}\text{C}$ no perfil do solo, na profundidade de 0 a 100 cm, em áreas sob diferentes sistemas de rotação, em Coxilha, RS. Na rotação T/S-Er/M, sistema SIP1 (●) e SIP2 (○); na rotação T/S- Av/M, sistema SIIP1 (▼) e SIIP2 (△) e na rotação T/S-Ef/M, sistema SIVP1 (■) e SIVP2 (□). Barras horizontais em cada profundidade significam o valor da diferença mínima significativa (DMS) obtido no teste de Tukey a 5%.

Em área experimental próximo do município de Coxilha, a 16 km de distância, Sisti et al. (2004) encontraram valores de $\delta^{13}\text{C}$ de -17‰ em floresta, que seria uma condição original do solo dessa região. Em superfície, podemos observar a forte influência dos resíduos no intervalo de 0-20 cm, pois houve um decréscimo de -2‰ , em relação às outras profundidades.

4.5.7 Estoque de C e N no solo

O estoque de C nos tratamentos variou de 80,97 a 88,89 Mg C ha^{-1} e de 179,38 a 190,19 Mg C ha^{-1} nas camadas de 0-30 cm e 0-100 cm de profundidade, respectivamente. No estoque de N esta variação foi de 6,6 a 7,3 Mg C ha^{-1} e 13,4 a 14,3 Mg C ha^{-1} na camada de 0-30 cm e 0-100 cm de profundidade, respectivamente. Observa-se que na rotação SI, o estoque de C chegou ser pelo menos 4 Mg C ha^{-1} e 10,8 Mg C ha^{-1} maior que as demais rotações, nas camadas de 0-30 e 0-100 cm, respectivamente. Quanto ao estoque de N, os valores não apresentaram nenhuma tendência em relação às sucessões de cultura. No entanto, os resultados de estoque de C e N não apresentaram diferença estatística nas profundidades 0-30 cm e 0-100 cm (Tabela 20).

Tabela 20. Estoque de C e N no perfil do solo, nas profundidades de 0-30 cm e 0-100 cm.

| Rotação | Estoque de C (Mg ha^{-1}) | | Estoque de N (Mg ha^{-1}) | |
|--|--------------------------------------|---------|--------------------------------------|--------|
| | Plantio direto | Média | Plantio direto | Média |
| Intervalo de profundidade: 0–30 cm | | | | |
| S1P1 | 88,89 | 87,67A | 7,31 | 7,13A |
| S1P2 | 86,45 | | 6,96 | |
| S2P1 | 84,95 | 85,03A | 7,14 | 7,02A |
| S2P2 | 85,11 | | 6,91 | |
| S4P1 | 80,97 | 83,71A | 6,60 | 6,73A |
| S4P2 | 86,45 | | 6,87 | |
| DMS | 4,604 | | 0,507 | |
| F | 0,1816 | | 0,1658 | |
| Intervalo de profundidade: 0–100 cm | | | | |
| S1P1 | 190,19 | 185,42A | 14,3 | 13,95A |
| S1P2 | 180,65 | | 13,6 | |
| S2P1 | 179,38 | 180,99A | 13,9 | 13,86A |
| S2P2 | 182,60 | | 13,8 | |
| S4P1 | 183,94 | 182,83A | 13,8 | 13,59A |
| S4P2 | 181,72 | | 13,4 | |
| DMS | 17,815 | | 0,974 | |
| F | 0,7246 | | 0,6160 | |

Os valores de estoque de C e N estão acima daqueles encontrados em outros estudos na região Sul do Brasil (PILLON, 2000; BAYER et al., 2000; BAYER et al., 2001; SÁ et al., 2001; LOVATO et al., 2004; DIEKOW et al., 2005, JANTALIA, 2005). No estudo realizado por Sisti (2001), foi determinado o estoque de C e N sob área de mata e rotações de culturas em experimento de longo prazo em Passo Fundo. O estoque de C sob área nativa foi de 72,5 e 171 Mg C ha^{-1} de 0-30 cm e 0-100 cm de profundidade, respectivamente, o que seria uma condição original do solo dessa região. Nos tratamentos de rotação de cultura variaram de 60,5 a 69,6 Mg C ha^{-1} e 161,3 e 179,4 Mg C ha^{-1} na camada de 0-30 cm e 0-100 cm de

profundidade respectivamente (SISTI et al., 2004). Os resultados de estoque de C obtidos em Coxilha são cerca de 18,5 e 4,3 Mg C ha⁻¹ maiores de 0-30 cm e 0-100 cm, respectivamente, que nas rotações em PD observados em Passo Fundo.

Outro fato em destaque em relação aos resultados encontrados nesta área experimental foi que o estoque de C e N de 0-30 cm representou 46,4 e 50,5 %, respectivamente do estoque total. Em Passo Fundo o estoque de C na profundidade de 0-30 cm representou apenas 37% do estoque total.

Os resultados obtidos por Conceição et al. (2005) mostraram que houve efeito da leguminosa no aumento no estoque de C e N no solo sob sistema de PD, onde a variação foi de 3,8 Mg ha⁻¹ de C e 0,53 Mg ha⁻¹ de N na camada de 0-20 cm entre os tratamentos Aveia/milho e Aveia+aveia/milho+caupi, o tratamento que utilizou leguminosa apresentou um resultado superior. Esse trabalho foi conduzido na Estação Experimental Agronômica da Universidade Federal do Rio Grande do Sul (UFRGS), sob uma área degradada pelo cultivo inadequado em um ARGISSOLO VERMELHO distrófico, textura franco-argilosa.

Assim, pode-se dizer que neste experimento todas as rotações conseguiram aportar ao longo dos anos uma quantidade de N, seja via FBN ou adubação nitrogenada, suficiente para manter a produtividade agrícola sem reduzir o estoque de C e N no solo. Dessa forma, não se poderia esperar uma resposta entre os tratamentos, pois a quantidade e qualidade de N e C depositados pelos resíduos vegetais ao longo desses anos foram semelhantes entre as rotações. No entanto, observa-se uma tendência no aumento de estoque de C nos sistemas, S1P1 e S1P2, em que há a presença de leguminosas, sendo necessário um período de tempo maior para que ocorra a estabilização da MOS. Segundo Harmon et al. (2009), os resíduos podem levar 10 anos ou mais para serem humificados, dependendo das condições ambientais e bioquímicas do resíduo, que foi determinado após análise de 234 casos em diferentes locais de clima temperado amostrados. No entanto, a maioria dos dados foi obtida sob floresta e pastagem.

As interações e mecanismos pelos quais as leguminosas promovem o aumento e a estabilização do conteúdo de MOS não estão totalmente esclarecidos. No entanto, ficam demonstradas algumas características pelas quais as leguminosas podem viabilizar esse aumento, através do fornecimento de grandes ingressos de N para o solo pela FBN, somada à menor taxa de mineralização do N orgânico. Devido ao fato de adicionar uma maior quantidade de N no solo, é possível que ocorra o incremento de C no solo com um período maior de tempo.

4.6 CONCLUSÕES

Os três tratamentos de rotação de cultura conseguiram aportar, ao longo dos anos, quantidade suficiente de N, seja via FBN ou adubação nitrogenada, para manter a produtividade agrícola e manter positivo o balanço entre entradas de saída de N.

Após 13 anos da implantação das rotações de cultura em sistema plantio direto, não foi observada diferença significativa nos estoques de carbono e nitrogênio totais do solo até um metro de profundidade.

5. CONCLUSÕES GERAIS

Como em qualquer outra prática, o uso do PD requer pré-requisitos especiais, tais como a possibilidade de implementar uma rotação de culturas diversificadas que promova a cobertura permanente do solo.

Os resultados obtidos neste estudo mostram as vantagens da introdução de leguminosas para adubação verde como um meio de reposição do N perdido por diferentes processos no solo ou removido em cereais colhidos. A principal vantagem foi o saldo positivo de N no sistema, uma vez que na ausência do mesmo, haveria um predomínio de balanços negativos.

Apesar não ter ocorrido incremento no estoque de C e N nas rotações avaliadas, podemos dizer que o saldo positivo de N proporcionou uma manutenção desses C e N em sistema plantio direto.

Os resultados sugerem que a entrada e a saída de N no sistema devem ser avaliadas com a maior frequência possível, de preferência para cada cultivo, para maior precisão da estimativa do balanço de N.

Para dar continuidade ao estudo desenvolvido, sugere-se que em estudos futuros seja realizado com maior detalhamento das principais influências das rotações de culturas, com maiores diferenças no balanço de N. Além disso, que sejam incluídos nos ensaios visando quantificar estoques de C e N outros elementos, como fósforo e enxofre, essenciais para o desenvolvimento das plantas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- AITA, C.; BASSO, C. J.; CERETTA, C. A.; GONÇALVES, C. N.; DAROS, C. Plantas de cobertura de solo como fonte de nitrogênio ao milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, n. 1, p. 157-165, 2001.
- AITA, C.; GIACOMINI, S.; Plantas de cobertura de solo em sistemas agrícolas. In: Bruno José Rodrigues Alves; Segundo Urquiaga; Celso Aita; Roberto Michael Boddey; Claudia Pozzi Jantalia; Flavio Anastácio Oliveira Camargo. (Org.). *Manejo de sistemas agrícolas: impacto no sequestro de C e nas emissões de gases de efeito estufa*. 1ed. Porto Alegre: Genesis, 2006, v. , p. 59-80.
- AITA, C.; CERETTA, C.A.; THOMAS, A.L.; PAVINATO, A.; BAYER, C. Espécies de inverno como fonte de nitrogênio para o milho no sistema de cultivo mínimo e feijão em plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 18, p. 101-108, 1994.
- AITA, C.; Dinâmica do nitrogênio no solo durante a decomposição de plantas de cobertura: efeito sobre a disponibilidade de nitrogênio para a cultura em sucessão. In: FRIES, M. R.; DALMOLIN, RSD. **Atualização em recomendação de adubação e calagem: ênfase em plantio direto**. Santa Maria: Pallotti, p. 76-111, 1997.
- AITA, C.; GIACOMINI, S. J. Decomposição e liberação de nitrogênio de resíduos culturais de plantas de cobertura de solo solteiras e consorciadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 4, p. 601-612, 2003.
- ALVAREZ, R. A review of nitrogen fertilizer and conservation tillage effects on soil organic carbon storage. **Soil Use and Management**. v. 21, p. 38–52. 2005.
- ALVES, B.; URQUIAGA, S.; JANTALIA, C.; BODDEY, R. Dinâmica do carbono em solos sob pastagens. **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais & subtropicais**. Porto Alegre, p. 561-569, 2008.
- ANDERSON, J. M.; FLANAGAN, P. W.; FLANAGAN, P. Biological processes regulating organic matter dynamics in tropical soils. In **Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems**. Coleman DC, Oades JM, Uehara G. (Eds.), University of Hawaii, p. 97-124, 1989.
- ARNOLD, S. L., SCHEPERS, J. S. A simple roller-mill grinding procedure for plant and soil samples. **Commun. Soil Science Plant**, v. 35, p. 537-545. 2004.
- BABUJIA, L. C.; HUNGRIA, M.; FRANCHINI, J. C.; BROOKES, P. C. Microbial biomass and activity at various soil depths in a Brazilian Oxisol after two decades of no-tillage and conventional tillage. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 42, n. 12, p. 2174-2181, 2010.
- BAKER, J. M.; OCHSNER, T. E.; VENTEREA, R. T.; GRIFFIS, T. J. Tillage and soil carbon sequestration – What do we really know? **Agriculture, Ecosystems and Environment**, Amsterdam, v. 118, p. 1-5, 2007.
- 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.; BALABANE, M. Major contribution of roots to soil carbon storage inferred from maize cultivated soils. **Soil Biology and Biochemistry**, Amsterdam, v.28, p.1261-1263, 1996.

BALESDENT, J.; CHENU, C.; BALABANE, M. Relationship of soil organic matter dynamics to physical protection and tillage. **Soil Tillage Research** 53: 215-230. 2000.

BARTHÈS, B. G.; KOUAKOUA, E.; LARRÉ-LARROUY, M. C.; RAZAFIMBELO, T.M.; LUCA, E. F.; AZONTONDE, A.; NEVES, C. S. V. J.; FREITAS, P. L.; FELLER, C. L. Texture and sesquioxide effects on water-stable aggregates and organic matter in some tropical soils. **Geoderma**, v. 143, p. 14–25, 2008.

BAYER, C. **Dinâmica da matéria orgânica em sistemas de manejo de solos**. Porto Alegre, 1996. 241 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós Graduação em Agronomia, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

BAYER, C.; DICK, D. P.; RIBEIRO, G. F.; SCHEUERMANN, K. K. Carbon stocks in organic matter fractions as affected by land use and soil management, with emphasis on no-tillage effect. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.32, n.3, p.401-406, 2002.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PILLON, C. N.; SANGOI, L. Changes in soil organic matter fractions under subtropical no-till cropping systems. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, n. 5, p. 1473-1478, 2001.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Acúmulo de resíduos culturais na superfície do solo, nutrição e rendimento do milho afetados por métodos de preparo e sistemas de cultura. **Revista Pesquisa Agropecuária Gaúcha**, v. 5, p. 331-339, 1999.

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, n. 1, p. 105-112, 1997.

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, n. 2, p. 235-239, 1997.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; AMADO, T. J.; MARTIN-NETO, L.; FERNANDES, S. V. Organic matter storage in a sandy clay loam Acrisol affected by tillage and cropping systems in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 54, n. 1, p. 101-109, 2000.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A. Sistemas de manejo do solo e seus efeitos sobre o rendimento do milho. **Ciência Rural**, v. 28, n. 1, 1998.

BEARE, M. H.; CABRERA, M. L.; HENDRIX, P. F.; COLEMAN, D. C. Aggregate protected and unprotected organic matter pools in conventional- and no-tillage soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, p. 787-795, 1994.

BODDEY, R.M.; JANTALIA, C.P.; MACEDO, M.O.; OLIVEIRA, O.C.; RESENDE, A.S.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S. Potential of Carbon sequestration in soils of the Atlantic Forest region of Brazil. In: Carbon sequestration in soils of Latin America. Lal, R; Cerri, C.C.; Bernoux, M.; Etchevers, J.; Cerri, E (eds). p. 305-348, 2006.

BODDEY, R. M.; DE MORAES SÁ, J. C.; ALVES, B. J.; URQUIAGA, S. The contribution of biological nitrogen fixation for sustainable agricultural systems in the tropics. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 29, n. 5, p. 787-799, 1997.

BODDEY, R.M.; JANTALIA, C.P.; MACEDO, M.O.; OLIVEIRA, O.C.; RESENDE, A.S.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S.; 2006. Potential of carbon sequestration in soils of the Atlantic Forest region of Brazil, in: Lal, R., Cerri, C.C., Bernoux, M., Etchevers, J., Cerri, E. (Eds), Carbon Sequestration in Soil of Latin America. The Howarth Press, New York, p. 305-348.

BODDEY, R.M.; JANTALIA, C. P.; CONCEIÇÃO, P.C.; ZANATTA, J.A.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; DIECKOW, J.; DOS SANTOS, H.P.; DENARDIN, J.E.; AITA, C.; GIACOMINI, S.J.; ALVES, B.J.R.; URQUIAGA, S. Carbon accumulation at depth in Ferralsols under zero-till subtropical agriculture. **Global Change Biology**, v. 16, n. 2, p. 784-795, 2010.

BOLINDER, M. A.; ANGERS, D. A.; DUBUC, J. P. Estimating shoot to root ratios and annual carbon inputs in soils for cereal crops. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 63, n. 1, p. 61-66, 1997.

BORDIN, I.; NEVES, C. S. V. J.; MEDINA, C. D. C.; SANTOS, J. D.; TORRES, E.; URQUIAGA, S. Matéria seca, carbono e nitrogênio de raízes de soja e milho em plantio direto e convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 12, p. 1785-1792, 2008.

BUYANOVSKY, G. A.; ASLAM, M.; WAGNER, G. W. Carbon turnover in soil physical fractions. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, p. 1167-1173, 1994.

BUYANOVSKY, G.A; WAGNER, G.H. Post-harvest residue input to cropland. **Plant and Soil**, v.93, p.57-65. 1986.

CALEGARI, A. **Sequestro de carbono, atributos físicos e químicos em diferentes sistemas de manejo em um Latossolo argiloso do Sul do Brasil**. 2006. 191p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Londrina, Londrina. 2006

CAMBARDELLA, C. A.; ELLIOTT, E. T. Carbon and nitrogen distribution in aggregates from cultivated and native grassland soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 57, p. 1071-1076, 1992.

CANELLAS, L. P.; SANTOS, G. de A. **Humosfera: Tratado preliminar sobre a química das substâncias húmicas**. Ed. do Autor, 2005. 309 p.

CARPENTER-BOGGS, L.; KENNEDY, A.C.; REGANOLD, J.P.. Organic and biodynamic management effects on soil biology. **Soil Science Society of America Journal**, v. 64, n. 5, p. 1651-1659, 2000.

CASTRO FILHO, C.; MUZILLI, O.; PODANOSCHI, A. L. Estabilidade dos agregados e sua relação com o teor de carbono orgânico num Latossolo Roxo distrófico, em função de sistemas de plantio, rotações de culturas e métodos de preparo de amostras. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.22, p.527-538. 1998.

CATTELAN, A.J.; VIDOR, C. Flutuações na biomassa, atividade e população microbiana do solo, em função de variações ambientais. **Revista Brasileira Ciência do Solo**, v.14, p.133-142, 1990.

- CHAPIN III, F. S.; MCFARLAND, J.; MCGUIRE, A. D.; EUSKIRCHEN, E. S.; RUESS, R. W.; KIELLAND, K. The changing global carbon cycle: linking plant–soil carbon dynamics to global consequences. **Journal of Ecology**, v. 97, p.840–850, 2009.
- 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.
- CHRISTOPHER, S.F.; LAL, R. Nitrogen management affects carbon sequestration in North American cropland soils. **Critical Reviews in Plant Science** 26: 45-64. 2007.
- CONCEIÇÃO, P. C.; AMADO, T. J. C.; MIELNICZUK, J.; SPAGNOLLO, E. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, 29:777-788, 2005.
- COSTA, F. S.; BAYER, C.; ZANATTA, J. A.; MIELNICZUK, J. Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 1, p. 323-332, 2008.
- CUNHA, T. J. F.; CANELAS, L. P.; SANTOS, G. A.; RIBEIRO, L. P. Fracionamento da matéria orgânica humificada em solos brasileiros In: CANELLAS, L. P.; SANTOS, G. A., (org.) *Humosfera*. Campos dos Goitacazes, UENF, 2005. p.54-80.
- DE MORAES, J. F.L.; VOLKOFF, B.; CERRIA, CARLOS C.; Bemoux, M. Soil properties under Amazon forest and changes due to pasture installation in Rondônia, Brazil. **Geoderma**, v. 70, n. 1, p. 63-81, 1996.
- DICK, D. P.; NOVOTNY, E.; DIEKOW, J.; BAYER, C. Química da Matéria Orgânica do Solo. In: MELO, V. F.; ALLEONI, L. R. F. (Eds.) *Química e Mineralogia do Solo: Parte II - Aplicações*. 1ed. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2009, v. 2, p. 1-68.
- DIEKOW, J. **Estoque e qualidade da matéria orgânica do solo em função de sistemas de culturas e adubação nitrogenada no sistema plantio direto**. 2003. 182 f. Tese (Doutorado) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2003.
- DIEKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H.; BAYER, C.; DICK, D. P.; KÖGEL-KNABNER, I. Soil C and N stocks as affected by cropping systems and nitrogen fertilization in a southern Brazil Acrisol managed under no-tillage for 17 years. **Soil and Tillage Research**, v. 81, n. 1, p. 87-95, 2005.
- DRIGO, B.; PIJL, A. S.; DUYTS, H.; KIELAK, A. M.; GAMPER, H. A.; HOUTEKAMER, M. J.; BOSCHKER, H. T. S.; BODELIER, P. L. E.; WHITELEY, A. S.; VAN VEENA, J. A.; KOWALCHUK, G. A. Shifting carbon flow from roots into associated microbial communities in response to elevated atmospheric CO₂. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 107, n. 24, p. 10938-10942, 2010.
- EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Manual de métodos de análises de solo. Rio de Janeiro, 1997. p. 212.
- FELLER, C.; BEARE, M. H. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. **Geoderma**, v.79, p.69-116. 1997.

FOG, K. The effect of added nitrogen on the rate of decomposition of organic matter. **Biological Reviews**, v. 63, n. 3, p. 433-462, 1988.

FRANZLUEBBERS, A. J.; STUEDEMANN, J. A. Soil-profile organic carbon and total nitrogen during 12 years of pasture management in the Southern Piedmont USA. **Agriculture Ecosystems and the Environment**, v. 129, p. 28-36, 2009.

FRANZLUEBBERS, A. J. Potencial C e N mineralization and microbial biomass from intact and increasingly disturbed soils of varying texture. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 31, p.1083-1090. 1999.

FRIEDLINGSTEIN, P.; JOEL, G.; FIELD, C.B.; FUNG, I. Y., Toward an allocation scheme for global terrestrial carbon models, in **Global Change Biology**, v. 5, p. 755 - 770, 1999.

GENTIL, L.V.; GONÇALVES, A.L.D.; SILVA, K.B. da. Comparação econômica operacional e agrônômica entre o plantio direto e o convencional, no cerrado brasileiro. Brasília: UNB, 1993. 21p.

GONCALVES, C. N.; CERETTA, C. A.. Plantas de cobertura de solo antecedendo o milho e seu efeito sobre o carbono orgânico do solo, sob plantio direto. **Revista Brasileira De Ciência Do Solo**, Viçosa, MG, v. 23, n. 2, p. 307-313, 1999.

GUGGENBERGER, G.; ZECH, W. Composition and dynamics of dissolved carbohydrates and lignin-degradation products in two coniferous forests, N.E. Bavaria, Germany. **Soil Biology & Biochemistry**. v. 26, p.19-27. 1994.

HARMON, M.E.; SILVER, W.L.; FASTH, B.; CHEN, H.; BURKE, I.C.; PARTON, W.J.; HART, S.C.; CURRIE, W.S. Long-term patterns of mass loss during the decomposition of leaf and fine root litter: an intersite comparison. **Global Change Biology**. v.15, p. 1338. 2009.

HEINZMANN, F. X. Resíduos culturais de inverno e assimilação de nitrogênio por culturas de verão. **Pesquisa Agropecuária Brasileira** v.20, n.9, p.1021-1030, 1985.

HENG, B. K. G.; TATE, K. R.; SOLLINS, P. Constituents of organic matter in temperate and tropical soils. **Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems**. Hawaii: Niftal Project, p. 5-32, 1989.

HERRIDGE, D. F; PEOPLES, M. B.; BODDEY, R. M. Global inputs of biological nitrogen fixation in agricultural systems. **Plant and Soil**, v. 311, n. 1, p. 1-18, 2008.

JACKSON, L. E.; BURGER, M.; CAVAGNARO, T. R. Roots, Nitrogen Transformations, and Ecosystem Services. **Annual Review of Plant Biology**. v. 59, p. 341-63. 2008.

JANSSENS, I. A.; KOWALSKI, A. S.; CEULEMANS, R. Forest floor CO₂ fluxes estimated by eddy covariance and chamber-based model. **Agricultural and Forest Meteorology**, v. 106, p. 61-69, 2001.

JANTALIA, C. P. ; RESCK, D.V.S ; ALVES, B. J. R. ; ZOTARELLI, L.; URQUIAGA, S. & BODDEY, R. M. Effect of tillage intensity on carbon stocks under a soybean based crop rotation in the Brazilian Cerrado. **Soil and Tillage Research**, v. 95, p. 97-109, 2007.

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. Tese (Doutorado em Agronomia – Ciência em Fitotecnia), 151 f. Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, 2005.

JANTALIA, C. P.; ALVES, B. J. R.; ZOTARELLI, L.; BODDEY, R. M.; URQUIAGA, S. Mudanças no estoque de C do solo em áreas de produção de grãos: Avaliação do impacto do manejo do solo. In: Alves, B. J. R.; Urquiaga, S.; Aita, C.; Boddey, R. M.; Jantalia, C. P. & Camargo, F. A. (Eds.). Manejo de sistemas agrícolas: Impacto no sequestro de C e nas emissões de gases de efeito estufa. Porto Alegre: Gênese, 2006, p. 35-57.

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

JOBBÁGY, E.; JACKSON, R. The vertical distribution of soil organic carbon and its relation to climate and vegetation. **Ecologic Applications**. v.10, p. 423–436. 2000.

JOHNSON, J. M. F.; BARBOUN, N. W.; WEYERS, S. L. Chemical composition of crop biomass impacts its decomposition. **Soil Science Society of American Journal**, 71:155-162. 2007.

KESSELMEIER, J.; STAUDT, M. Biogenic volatile organic compounds (VOC): An overview on emission, physiology and ecology. **Journal of Atmospheric Chemistry** v. 33, p. 23-88. 1999.

KISSELE, K.W.; GARRETT, C. J.; FU, S.; HEDRIX, P. F.; CROSSLEY, D. A.; COLEMAN, D. C.; POTTER, R. L. Budgets for roots-derived C and litter-derived C: Comparison between conventional tillage and no tillage soils. **Soil Biology and Biochemistry**. v. 33, p. 1067-1075, 2001.

KOCHSIEK, A.E., J.M.H. KNOPS, D.T. WALTERS, AND T.J. ARKEBAUER. Impacts of management on decomposition and the litter-carbon balance in irrigated and rainfed no-till agricultural systems. **Agricultural and Forest Meteorology**. v.149, p.1983-1993. 2009.

KOGEL-KNABNER, I.; EKSCHMITT, K.; FLESSA, H.; GUGGENBERGER, G.; MATZNER, E.; MARSCHNER, B.; VON LUETZOW, M. Na integrative approach of organic matter stabilization in temperate soils: Linking chemistry, physics, and biology. **Journal of Plant Nutrition and Soil Science/ Zeitschrift Fur Pflanzenernahrung Und Bodenkunde** v.171, p. 5-13. 2008.

KUMAR, K.; GOH, K. M. Crop residues and management practices: effects on soil quality, soil nitrogen dynamics, crop yield and nitrogen recovery. **Advances in Agronomy**, New York, v. 68, p. 197-319, 2000.

LAL, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Geoderma** 123, 1-22. 2004b.

LAL, R. Residue management, conservation tillage and soil restoration for mitigating greenhouse effect by CO₂-enrichment. **Soil & Tillage Research**. v.43, p.81-107. 1997.

LAL, R. Cropping systems and soil quality. In: Croppins systems: trends and advances. Shrestha, A. (Ed.). Haworth Press, NY. pp. 33 – 52. 2003.

LAL, R. Agricultural activities and the global carbon cycle. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, v. 70, p. 103-116, 2004a.

LAL, R. Carbon sequestration. **Philosophical Transactions of the Royal Society B** v.363, p.815–830. 2008.

LAL, R.; FOLLETT, R. F.; AND KIMBLE, J. M. Achieving soil carbon sequestration in the United States: A challenge to the policy makers. **Soil Science**, 168: 827–845. 2003.

LAL, R.; KIMBLE, J. M. Conservation tillage for carbon sequestration. **Nutrient cycling in agroecosystems**, v. 49, n. 1, p. 243-253, 1997.

LAMBERS, H.; ROBINSON, S. A.; RIBAS-CARBO M. Regulation of respiration in vivo. In 'Plant Respiration: From Cell to Ecosystem'. (Eds H Lambers, M Ribas-Carbo) p. 43-61. (Springer: Dordrecht). 2005.

LORENZ, K.; LAL, R. The depth distribution of soil organic carbon in relation to land use and management and the potential of carbon sequestration in subsoil horizons. **Advances in Agronomy**, v. 88, p. 35-66, 2005.

LOVATO, T.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; VEZZANI, F. Adição de carbono e nitrogênio e sua relação com os estoques no solo e com o rendimento do milho em sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p.175-187. 2004.

MANFOGOYA, P. L.; DZOWELA, B. H.; NAIR, P. K. Effect of multipurpose trees, age of cutting and drying method on pruning quality. In: CADISCH, G. & GILLER, K.E., eds. Driven by nature: plant litter quality and decomposition. Wallingford CAB, International, 1997. p.167-174.

MARTENS, D. A. Plant residue biochemistry regulates soil carbon cycling and carbon sequestration. **Soil biology and Biochemistry**, v. 32, n. 3, p. 361-369, 2000.

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

MCNEILL, A. M.; FILLERY, I. R. P. Field measurement of lupin belowground nitrogen accumulation and recovery in the subsequent cereal-soil system in a semi-arid Mediterranean-type climate. **Plant and Soil**, v. 302, n. 1, p. 297-316, 2008.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e bioquímica do solo**. Lavras: Editora UFLA, 2006, 729p.

MURTY, D.; KIRSCHBAUM, M. U. F.; MCMURTRIE, R. E.; MCGILVRAY, H. Does conversion of forest to agricultural land change soil carbon and nitrogen? A review of the literature. **Global Change Biology**, Oxford, v. 8, p. 105-123, 2002.

NGUYEN, C. Rhizodeposition of organic C by plants: mechanisms and controls. **Agronomie**, v. 23, n. 5-6, p. 375-396, 2003.

PAUSTIAN, K.; COLLINS, H. P.; PAUL, E. A. **Management controls on soil carbon**. 1997a, CRC Press: Boca Raton, FL, USA. p, 1997.

PAZ-GONZÁLEZ, A.; VIEIRA, S.R.; TABOADA CASTRO, M.T. The effect of cultivation on the spatial variability of selected properties of an umbric horizon. **Geoderma**, Amsterdam, v. 97, p. 273-292, 2000.

PEOPLES, M. B.; BROCKWELL, J.; HERRIDGE, D. F.; ROCHESTER, I. J.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M.; DAKORA, F. D.; BHATTARAI, S.; MASKEY, S.

L.; SAMPET, C.; RERKASEM, B.; KHAN, D. F.; HAUGGAARD-NIELSEN, H.; JENSEN, E. S. The contributions of nitrogen-fixing crop legumes to the productivity of agricultural systems. **Symbiosis**, v. 48, n. 1, p. 1-17, 2009.

PILLON, N. C. **Alterações no conteúdo e qualidade da matéria orgânica do solo induzidas por sistemas de cultura em plantio direto**. Porto Alegre, RS, Brasil: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 2000. Doutorado.

PRAKASH, V.; KUNDU, S.; GHOSH, B. N.; SINGH R. D.; GUPTA, H.S. Annual carbon input to soil through rainfed soybean (*Glycine max*)-wheat (*Triticum aestivum*) cropping sequence in mid-hills of North-West Himalaya. **Indian Journal of Agricultural Science**, v. 72, n. 1, p. 14-17, 2002.

PRESTON, C. M. Applications of NMR to soil organic matter analysis: history and prospects. **Soil Science**, v. 161, n. 3, p. 144, 1996.

RECOUS, S.; ROBIN, D.; DARWIS, D.; MARY, B. Soil inorganic N availability: effect on maize residue decomposition. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 27, n. 12, p. 1529-1538, 1995.

REICOSKY, D. C.; REEVES, D. W.; PRIOR, S. A.; RUNION, G. B.; ROGERS, H. H.; REID, J.B.; GOSS, M.J. Effect of living roots of different plant species on the aggregate stability of 2 arable soils. **Journal of Soil Science** 32:521-542. 1981.

RESENDE, M.; CURI, N.; RESENDE, S. B.; CORRÊA, G. F. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. Viçosa: UFV. 1997. 367 p.

RILLIG, M. C. A connection between fungal hydrophobins and soil water repellency. **Pedobiologia** v. 49, p. 395-399, 2005.

RILLIG, M. C. Arbuscular mycorrhizae, glomalin, and soil aggregation. **Canadian Journal of Soil Science**, v. 28, n. 4, p. 355-363, 2004.

ROCHESTER, I. J., PEOPLES, M. B., CONSTABLE, G. A., & GAULT, R. R. Faba beans and other legumes add nitrogen to irrigated cotton cropping systems. **Animal Production Science**, v. 38, n. 3, p. 253-260, 1998.

ROSCOE, R.; BUURMAN, P.; VELTHORST, E. J.; PEREIRA, J. A. A. Effects of fire on organic matter in a "cerrado sensu-stricto" from Southeast Brazil as revealed by changes in $\delta^{13}\text{C}$. **Geoderma**, v.95, p.141-160. 2000.

ROSOLEM, C. A.; PACE, L.; CRUSCIOL, C. A. C. Nitrogen management in maize cover crop rotations. **Plant Soil** v. 264, p. 261-271. 2004.

RUSSELL, A .E.; LAIRD, D.A.; PARKIN, T.B.; MALLARINO, A.P. Impact of nitrogen fertilization and cropping system on carbon sequestration in Midwestern Mollisols. **Soil Science Society of American Journal**, v. 69, p. 413-422. 2005.

SÁ, J. C. D. M.; LAL, R. Stratification ratio of soil organic matter pools as an indicator of carbon sequestration in a tillage chronosequence on a Brazilian Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v. 103, n. 1, p. 46-56, 2009.

SÁ, J. C. M.; CERRI, C. C.; DICK, W. A.; LAL, R.; FILHO, S. P. V.; PICCOLO, M. C.; FEIGL, B. E. Organic matter dynamics and carbon sequestration rates for a tillage

chronosequence in a Brazilian Oxisol. **Soil Science Society of American Journal**, v.65, p.1486-1499. 2001.

SÁ, J.C.M. Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto. In: EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Trigo (Passo Fundo, RS). Plantio direto no Brasil. Passo Fundo, 1993. p.37-60.

SADOWSKI, M.; MEYERS, S.; MULLINS, F.; SATHAYE, J.; WISNIEWSKI, J. Methods for assessing greenhouse gas mitigation for countries with economies in transition: summary of workshop presentations and discussions. **Environmental Management**, v. 20, p. S3-S13, 1996.

SANDERMAN, J.; FARQUHARSON, R.; BALDOCK, J. Soil carbon sequestration potential: a review for Australian agriculture. **Soil carbon sequestration potential: a review for Australian agriculture**, 2009.

SANTOS, H. P.; FONTANELI, R. S.; SPERA, S. T.; TOMM, G. O.; AMBROSI, I. **Sistemas de produção de grãos com pastagens anuais de inverno e de verão, sob plantio direto**. Embrapa Trigo, 2004.

SANTOS, H.P. dos; FONTANELI, R.S.; TOMM, G.O. Efeito de sistemas de produção de grãos e de pastagens sob plantio direto sobre o nível de fertilidade do solo após cinco anos. **Revista Brasileira de Ciência de Solo**, Viçosa, v. 25, n. 3, p. 645-653, 2001.

SANTOS, H. P.; REIS, E. M. **Rotação de cultura em plantio direto**. Embrapa Trigo, **Passo Fundo**. 212p. 2001

SCHERER-LORENZEN, M.; PALMBORG, C.; PRINZ, A.; SCHULZE, E. D.; The role of plant diversity and composition for nitrate leaching in grasslands. **Ecology**, v. 84, p. 1539–1552, 2003.

SCHLESINGER, W. H. Soil respiration and the global carbon cycle. **Biogeochemistry**, v. 48, p. 7–20. 2000.

SIQUEIRA NETO, M.; PICCOLO, M. de C.; SCOPEL, E.; COSTA JUNIOR, C. da; CERRI, C.C; BERNOUX, M. Carbono total e atributos químicos com diferentes usos do solo no Cerrado. **Acta Scientiarum Agronomy**, v.31, p.709-717, 2009.

SISTI, C. P. J.; SANTOS, H. P.; KOHHANN, R.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R.M. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, v. 76, p. 39-58. 2004.

SIX, J.; BOSSUYT, H.; DEGRYZE, S.; DENEFF, K. A history of research on the link between (micro) aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamics. **Soil & Tillage Research**, v. 79, p. 7-31, 2004.

SIX, J.; CONANT, R. T.; PAUL, E. A.; PAUSTIAN, K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. **Plant and Soil**, v. 241, p. 155- 176, 2002.

SIX, J.; ELLIOTT, E. T.; COMBRINK, C. Soil structure and organic matter: I. Distribution of aggregate-size classes and aggregate-associated carbon. **Soil Science Society of America Journal** , v. 64, p. 681-689, 2000.

SIX, J.; ELLIOTT, E. T.; PAUSTIAN, K.; DORAN, J. W. Aggregation and soil organic matter accumulation in cultivated and native grassland soils. **Soil Science Society of America Journal**, v. 62, p. 1367-1377, 1998.

SIX, J.; ELLIOTT, E.T.; PAUSTIAN, K. Aggregate and soil organic matter dynamics under conventional and no-tillage systems. **Soil Science Society of America Journal**, Madison - USA, v.63, p.1350-1358, 1999.

SKJEMSTAD, J.O.; CLARKE, P.; TAYLOR, J. A.; OADES, J. M.; MCCLURE, S. G. The chemistry and nature of protected carbon in soil. **Soil and Tillage Research**, v. 34, n. 2, p. 251-271, 1996.

SMITH, J. L.; UM, M. H. Rapid procedures for preparing soil and KCl extracts for 15N analysis. **Communications in Soil Science & Plant Analysis**, v. 21, n. 17-18, p. 2173-2179, 1990.

SOCIEDADE BRASILEIRA DE CIÊNCIA DO SOLO. Núcleo Regional Sul. Comissão de Química e Fertilidade do Solo. **Manual de adubação e de calagem para os estados do Rio Grande do Sul e de Santa Catarina**. 10.ed. Porto Alegre,– Comissão de Química e Fertilidade do solo, 2004. 394p.

SPEHN, E. M.; JOSHI, J.; SCHMID, B.; ALPHEI, J.; KÖRNER, C. Plant diversity effects on soil heterotrophic activity in experimental grassland ecosystems. **Plant Soil**. v. 224:217-230. 2000.

SPOSITO, G. Chemistry of soil. 2.ed. New York, Oxford University Press, 2008. 330p.

STOUT, J. D.; GOH, K. M.; RAFTER, T. A. Chemistry and turnover of naturally occurring resistant organic compounds in soil. **Soil biochemistry**, v. 5, 1981.

STUDDERT, G. A.; ECHEVERRIA, H.E. Crop rotations and nitrogen fertilization to manage soil organic carbon dynamics. **Soil Science Society of America Journal**, 64, 1496–1503. 2000.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p.

TEIXEIRA, L.A.J.; TESTA, V.M.; MIELNICZUK, J. Nitrogênio do solo, nutrição e rendimento de milho afetados por sistemas de cultura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.18, p.207-214. 1994.

TISDALL, J. M.; OADES, J. M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 33, n. 1, p. 141-163, 1982.

TOMM, G. O. Efeito do manejo do solo e de sistemas de rotação de culturas no rendimento de grãos de trigo. **Relatório de projeto de pesquisa**. Embrapa. Trigo. 40 p.1996.

TRUMBORE, S. E.; DAVIDSON, E. A.; DE CAMARGO, P. B.; NEPSTAD, D. C.; MARTINELLI, L.A. Belowground cycling of carbon in forests and pastures of eastern Amazonia. **Global Biogeochemical Cycles**, v. 9, n. 4, p. 515-528, 1995.

URQUIAGA, S., ALVES, B. J. R., JANTALIA, C. P., & BODDEY, R. M. Variações nos estoques de carbono e emissões de gases de efeito estufa em solos das regiões tropicais e subtropicais do Brasil: uma análise crítica. **Informações Agronômicas** Nº 130. 2010.

URQUIAGA, S.; CRUZ, K. H. S.; BODDEY, R. M. Contribution of nitrogen fixation to sugar cane: nitrogen-15 and nitrogen balance estimates. **Soil Science Society of America Journal**, v.56, p.105-114, 1992.

URQUIAGA, S.; JANTALIA, C. P.; ZOTARELLI, L.; ALVES, B. J. R. & BODDEY, R. M. Manejo de sistemas agrícolas para sequestro de C no solo. In: Aquino, A. & Assis, R. L. **Processos biológicos no sistema solo-planta: ferramentas para uma agricultura sustentável**. Embrapa Informação Tecnológica; Seropédica: Embrapa Agrobiologia, 2005.

VENZKE FILHO, S. P.; FEIGL, B. J.; PICCOLO, M. C.; FANTE JÚNIOR, L.; SIQUEIRA NETO, M.; CERRI, C. C. Root systems and soil microbial biomass under no-tillage system. **Scientia Agricola**, v.61, p.529-537, 2004.

VERMA, S. B.; DOBERMANN, A.; CASSMAN, K. G.; WALTERS, D. T.; KNOPS, J. M.; ARKEBAUER, T. J.; SUYKER, A. E.; BURBA, G. G.; AMOS, B.; YANG, H.; GINTING, D.; HUBBARD, K. G.; GITELSON, A. A.; WALTER-SHEA, E. A. Annual carbon dioxide exchange in irrigated and rainfed maize-based agroecosystems. **Agricultural and Forest Meteorology**, v.131, p. 77–96, 2005.

WEST, T. O., POST, W. M. Soil organic carbon sequestration rates by tillage and crop rotation: a global data analysis. **Soil Science Society of America Journal**, v.66, p. 1930-1946, 2002.

WICKLAND, K. P.; NEFF, J. C. Decomposition of soil organic matter from black spruce forest: environmental and chemical controls. **Biogeochemistry** v. 87, p. 29–47. 2008.

WILSON, G. W.; RICE, C. W.; RILLIG, M. C.; SPRINGER, A.; HARTNETT, D. C. Soil aggregation and carbon sequestration are tightly correlated with the abundance of arbuscular mycorrhizal fungi: results from long-term field experiments. **Ecology Letters**, v. 12, n. 5, p. 452-461, 2009.

WRIGHT, S. F.; FRANKE-SNYDER, M.; MORTON, J. B.; UPADHYAYA, A. Timecourse study and partial characterization of a protein on hyphae of arbuscular mycorrhizal fungi during active colonization of roots. **Plant and Soil**, v. 181, p. 193-203, 1996.

ZECH, W.; SENESI, N.; GUGGENBERGER, G.; KAISER, K.; LEHMANN, J.; MIANO, T. M.; & SCHROTH, G. Factors controlling humification and mineralization of soil organic matter in the tropics. **Geoderma**, v. 79, n. 1, p. 117-161, 1997.

ZHANG, Y. L.; DAI, J. L.; WANG, R. Q.; ZHANG, J. Effects of long-term sewage irrigation on agricultural soil microbial structural and functional characterizations in Shandong, China. **European Journal of Soil Biology**, Amsterdam, v. 44, p. 84-91, 2008.

ZHU Y. G.; MILLER R. M. Carbon cycling by arbuscular mycorrhizal fungi in soil-plant systems. **Trends in Plant Science**, v. 8, p. 407-409, 2003.

ZOTARELLI, L. **Influência do sistema de plantio direto e convencional com rotação de culturas na agregação, acumulação de carbono e emissão de óxido nítrico, num Latossolo Vermelho distroférrico**. 2005. Tese, (Tese em Agronomia Ciência do Solo).

Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2005. 117f.

ZOTARELLI, L. **Balço de nitrogênio numa rotaço em sistema de plantio direto e convencional na Regio de Londrina-PR.** 2009. Dissertaço (Mestrado em Agronomia Ciênci do Solo). Instituto de Agronomia, Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, 2000. 99f.

ZOTARELLI, L., ALVES, BJR, URQUIAGA, S., BODDEY, RM, & SIX, J. Impact of tillage and crop rotation on light fraction and intra-aggregate soil organic matter in two Oxisols. **Soil and Tillage Research**, v. 95, n. 1, p. 196-206, 2007.

ZOTARELLI, L.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; TORRES, E.; DOS SANTOS, H. P., PAUSTIAN, K., BODDEY, R. M.; SIX, J., Impact of tillage and crop rotation on aggregate-associated carbon in two Oxisols. **Soil Science Society of America Journal**. v. 69, p.482–491. 2005.