

LUTÉCIA BEATRIZ DOS SANTOS CANALLI

**DECOMPOSIÇÃO DE RESÍDUOS CULTURAIS E SUA
CONTRIBUIÇÃO NOS MACROAGREGADOS E NA FRAÇÃO
LÁBIL DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO
NO SISTEMA PLANTIO DIRETO**

Tese apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Agronomia, área de concentração Produção Vegetal, Departamento de Fitotecnia e Fitossanitarismo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito para a obtenção do título de Doutora.

Orientador: Prof. Dr. Anibal de Moraes

Co-orientador: Prof. Dr. João Carlos de Moraes Sá

CURITIBA
2009



UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
DEPARTAMENTO DE FITOTECNIA E FITOSSANITARISMO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA
PRODUÇÃO VEGETAL

PARECER

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Produção Vegetal, reuniram-se para realizar a arguição da Tese de DOUTORADO, apresentada pela candidata **LUTÉCIA BEATRIZ DOS SANTOS CANALLI**, sob o título “**DECOMPOSIÇÃO DE RESÍDUOS CULTURAIS E SUA CONTRIBUIÇÃO NOS MACROAGREGADOS E NA FRAÇÃO LÁBIL DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO SOB PLANTIO DIRETO**”, para obtenção do grau de Doutor em Ciências do Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Produção Vegetal do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná.

Após haver analisado o referido trabalho e argüido a candidata são de parecer pela “**APROVAÇÃO**” da Tese.

Curitiba, 03 de Novembro de 2009.

Professora Dra. Francine Lorena Cuquel
Coordenadora do Programa

Professor Dr. Telmo Jorge Carneiro Amado
Primeiro Examinador

Professor Dr. Luiz Antonio Corrêa Lucchesi
Segundo Examinador

Professor Dr. Adelino Pelissari
Terceiro Examinador

Professor Dr. João Carlos de Moraes Sá
Quarto Examinador

Professor Dr. Aníbal de Moraes
Presidente da Banca e Orientador

Aos meus pais, Acir e Manolita Canalli,
exemplos de determinação e fonte de muito
amor.

Ofereço

Ao meu marido Alexandre Nunes Leite
Rosas e ao meu filho Gabriel Canalli Leite
Rosas, meus companheiros de jornada, que
com muito amor e carinho me ajudaram a
atingir este objetivo.

Dedico

AGRADECIMENTOS

À Deus, pelo dom da vida e por me amparar nos momentos mais difíceis.

Aos meus pais, Acir e Manolita Canalli, pelo carinho, estímulo e amor imenso.

Ao meu marido, Alexandre Nunes Leite Rosas, que com muito amor e paciência me apoiou e me ajudou em todos os momentos.

Ao meu filho, Gabriel Canalli Leite Rosas, que com maturidade soube compreender minha ausência em momentos importantes e me incentivou e apoiou.

Às minhas irmãs, Luciane, Lucimara e Lucilea Canalli, sempre atentas e amorosas, me apoiaram e incentivaram nos momentos de cansaço e desestímulo.

Ao professor Anibal de Moraes por me acolher como sua orientada no Curso de Pós-Graduação e por seus ensinamentos, conselhos e amizade.

Ao professor João Carlos de Moraes Sá por sua valiosa orientação, estímulo e amizade, e pelo apoio no Laboratório de Matéria Orgânica do solo (LABMOS) da UEPG, onde foram processadas as amostras.

A todos os professores do curso de Pós-Graduação em Agronomia, Produção Vegetal da UFPR, que me mostraram o caminho e contribuíram para o meu crescimento profissional.

Ao pesquisador Edilson Batista de Oliveira da Embrapa Florestas, pelo apoio no processamento estatístico dos dados.

À professora Márcia Freire Machado Sá da UEPG, pela valiosa contribuição na correção da redação.

Aos colegas que ingressaram comigo no curso, Josiane Burkner dos Santos, Alvadi Balbinot Jr, Verushca Andreolla, Itacir Sandini, Renata Dantas Medrado, Ester Moura Rios, Anneleen Dewulf, pelo companheirismo e amizade.

À Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha (FEBRAPDP), em especial aos amigos e colegas Bady Cury e Maury Sade e ao amigo e Presidente da FEBRAPDP Manoel Henrique Pereira (Nonô), sem o apoio dos quais não teria sequer iniciado o curso.

Aos colegas Ademar Colturato, Marco Antônio Brandão Borges e Terezinha Sandri da Emater, que souberam compreender a oportunidade que tive de realizar o curso e me auxiliaram para concretizar este sonho.

Aos colegas do LABMOS/UEPG, em especial ao Ademir O. Ferreira, Clever Briedis, Roberto Simão de Carli, Lúcio Scherekenberg Elias, Erielton Pupo Antunes e Marielle

Romko, pela amizade e valiosa colaboração em todas as fases do projeto de pesquisa. Sem vocês eu não teria conseguido.

Aos laboratoristas do LABMOS/UEPG, Jaqueline Gonçalves e Romeu Martins Filho, pelo apoio na execução das fases de laboratório e pela amizade.

À Fundação AGRISUS pela confiança depositada em nossa capacidade, concedendo os recursos financeiros para que a pesquisa fosse realizada.

À Fundação ABC por ceder a área para a realização do experimento.

À Syngenta, na pessoa do amigo Antonio Marques de Sousa Neto (Brasa) por permitir que os dados fossem coletados em área experimental por ele conduzida na Fundação ABC.

Enfim, a todos que de uma maneira ou de outra contribuíram para que esta pesquisa fosse realizada.

Quando recebemos um ensinamento devemos receber como um valioso presente e não como uma árdua tarefa. Eis aqui a diferença que transcende.

Albert Einstein

BIOGRAFIA DA AUTORA

LUTÉCIA BEATRIZ DOS SANTOS CANALLI, nascida no dia 07 de maio de 1962, em União da Vitória, PR, filha de Acir Alceu Canalli e Manolita Beatriz dos Santos Canalli.

Engenheira Agrônoma, formada na Universidade Federal do Paraná (UFPR) em 1985, Curitiba, PR.

De janeiro a maio de 1986 trabalhou na Secretaria de Agricultura e Abastecimento do Estado do Paraná (SEAB) e desde maio de 1986 até a presente data desenvolve suas atividades profissionais como engenheira agrônoma no Instituto Paranaense de Assistência Técnica e Extensão Rural (EMATER), onde atualmente desempenha a função de Coordenadora Regional de Meio Ambiente na região de Ponta Grossa.

Desde março de 2000 é também assessora técnica da Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha (FEBRAPDP), através de um convênio firmado entre a EMATER e a FEBRAPDP.

Foi Secretária Municipal de Agricultura em Pato Branco de agosto de 1998 a fevereiro de 2000.

Em dezembro de 1993 defendeu sua dissertação de mestrado em Agronomia, área de concentração Ciência do Solo, na Universidade Federal do Paraná (UFPR), com trabalho intitulado “Influência de métodos de preparo e da correção do solo, pré-implantação, na condição hídrica de um Latossolo Vermelho escuro sob plantio direto”.

Em março de 2006 iniciou o curso de Doutorado em Agronomia, área de concentração Produção Vegetal, na Universidade Federal do Paraná (UFPR), concluindo em novembro de 2009, com a apresentação da tese: “Decomposição de resíduos culturais e sua contribuição nos macroagregados e na fração lábil da matéria orgânica do solo no sistema plantio direto”.

SUMÁRIO

1. RESUMO.....	1
2. ABSTRACT.....	3
3. INTRODUÇÃO.....	5
4. HIPÓTESE.....	11
5. OBJETIVO GERAL.....	11
5.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	12
6.TAXAS DE DECOMPOSIÇÃO E MEIA-VIDA DE RESÍDUOS CULTURAIS DE INVERNO E VERÃO EM UM LATOSSOLO VERMELHO SOB PLANTIO DIRETO DE LONGA DURAÇÃO.....	13
Resumo.....	13
Abstract.....	15
Introdução.....	16
Material e métodos.....	17
Resultados e discussão.....	22
Conclusões.....	33
Agradecimentos.....	34
Referências bibliográficas.....	34
7.ALTERAÇÕES NO CARBONO LÁBIL EM FUNÇÃO DA DECOMPOSIÇÃO DE RESÍDUOS CULTURAIS EM UM LATOSSOLO VERMELHO SOB PLANTIO DIRETO DE LONGA DURAÇÃO.....	37
Resumo.....	37
Abstract.....	38
Introdução.....	39
Material e métodos.....	42
Resultados e discussão.....	48
Conclusões.....	62
Agradecimentos.....	62
Referências bibliográficas.....	63
8.ESTOQUE DE CARBONO E NITROGENIO NOS MACROAGREGADOS E A RELAÇÃO DE ESTRATIFICAÇÃO AFETADOS POR SUCESSÕES DE CULTURAS EM UM LATOSSOLO VERMELHO SOB PLANTIO DIRETO DE LONGA DURAÇÃO.....	67
Resumo.....	67
Abstract.....	69
Introdução.....	70
Material e métodos.....	73
Resultados e discussão.....	78
Conclusões.....	89
Agradecimentos.....	90
Referência Bibliográfica.....	90
9. CONCLUSÕES GERAIS.....	94
10. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	100

DECOMPOSIÇÃO DE RESÍDUOS CULTURAIS E SUA CONTRIBUIÇÃO NOS MACROAGREGADOS E NA FRAÇÃO LÁBIL DA MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO NO SISTEMA PLANTIO DIRETO

1. RESUMO

No sistema plantio direto (SPD), a ausência de revolvimento do solo associada à manutenção dos resíduos culturais na superfície estimula a atividade da biomassa microbiana, ativando a decomposição dos resíduos culturais e gerando um fluxo contínuo de C e N, o que afeta a reorganização dos agregados e altera os compartimentos da matéria orgânica do solo (MOS). O objetivo deste estudo foi avaliar a dinâmica da decomposição de culturas de inverno (aveia preta, ervilhaca e nabo forrageiro) e verão (milho, feijão e soja) e sua contribuição para o aporte de carbono orgânico na fração lábil da matéria orgânica do solo e nos macroagregados e a relação de estratificação. Este estudo foi realizado num experimento de longa duração que se encontra sob plantio direto há 18 anos, na Estação Experimental da Fundação ABC, localizada em Ponta Grossa, PR. A dinâmica da decomposição dos resíduos culturais foi avaliada de forma quantitativa, através da taxa da decomposição e a meia-vida dos resíduos culturais (RC) e de forma qualitativa, através da determinação dos constituintes orgânicos, suas relações e índices de qualidades. No solo foram determinadas as quantidades totais e a evolução do estoque de C e N na fração lábil da matéria orgânica ($> 53 \mu\text{m}$) e o conteúdo e estoque de C e N nos macroagregados e a relação de estratificação. A taxa de decomposição dos resíduos culturais foi avaliada em oito tempos de amostragem: 0, 10, 25, 45, 70, 100, 135 e 175 dias após o manejo ou colheita das culturas. A taxa de conversão de C dos RC para a fração lábil da matéria orgânica do solo foi determinada na profundidade de 0-10 cm, considerando dois tempos de

amostragem do solo: no início do experimento, em outubro de 2006 (t_1) e ao final de doze meses, em outubro de 2007(t_2). Nos macroagregados do solo (19-8; 8-4 e 4-2 mm) foi determinado carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) em três profundidades (0-2,5; 2,5-5 e 5-10 cm) em outubro de 2007. A perda média de fitomassa durante a decomposição dos resíduos culturais de inverno foi significativamente diferente conforme a sequência: ervilhaca > aveia preta = nabo forrageiro. A comparação das médias dos resíduos culturais de verão revelou que o feijão apresentou a maior taxa de decomposição, seguido pela soja, enquanto o milho apresentou a menor taxa de decomposição. A meia-vida dos resíduos culturais apresentou a seguinte sequência: milho (173 dias) > soja (116 dias) > feijão (87 dias) > aveia preta (69 dias) = nabo forrageiro (69 dias) > ervilhaca (46 dias). O conteúdo de lignina associado ao conteúdo de nitrogênio é o fator preponderante no controle da taxa de decomposição dos resíduos. O conteúdo de nitrogênio e carboidratos solúveis é determinante para a velocidade do processo de decomposição e conversão de C dos resíduos culturais para o estoque de C no solo. A taxa média de conversão de C dos RC para o estoque de C-lábil no solo, independente das sucessões foi de 31,3%. O estoque de C-lábil variou de 0,27 a 0,91 Mg ha⁻¹ e a média das sucessões foi de 0,70 Mg ha⁻¹. A porcentagem da classe de macroagregados de 19-8 mm foi significativamente superior às demais, e representou 71,9% na média das sucessões e profundidades. O conteúdo de COT e NT na camada de 0-2,5 cm foi significativamente superior em todas as classes de agregados, independente das sucessões de culturas, e reduziu em profundidade, indicando a formação de estratificação no perfil do solo, devido ao aporte contínuo de matéria orgânica através dos resíduos culturais. O conteúdo e o estoque de COT aumentaram quando a sucessão incluiu espécies de relação C:N mais alta (aveia preta, milho e soja). A sucessão de cultura que apresentou o maior conteúdo e estoque de C no

solo foi a aveia preta-soja e a relação C:N desta sucessão foi significativamente superior às demais, independente da classe de agregado e profundidade. Independente das sucessões, o conteúdo de COT e NT (g kg^{-1}) e o estoque de COT e NT (kg ha^{-1}) na classe de macroagregados 19-8 mm foi significativamente superior as demais classes em todas as profundidades. Observou-se relação linear significativa entre o conteúdo e o estoque de COT com a relação de estratificação na classe de macroagregados de 19-8 mm. Estes resultados confirmam a importância do sistema plantio direto que, pelo não revolvimento do solo e pelo aporte contínuo de resíduos culturais, propicia a formação de macroagregados grandes (19-8 mm) e mais estáveis, que favorecem a proteção física da matéria orgânica no seu interior, com conseqüente aumento no conteúdo e estoque de C e N no solo.

Palavras-chave: decomposição dos resíduos culturais, taxa de conversão de C, relação de estratificação de C, estoque de C e N no solo.

DECOMPOSITION OF CROP RESIDUES AND THEIR CONTRIBUTION IN THE MACROAGGREGATES AND IN THE LABILE ORGANIC MATTER OF THE SOIL UNDER NO-TILLAGE SYSTEM

2. ABSTRACT

No-tillage (NT) associated with crop residues maintenance on the soil surface stimulates the microbial biomass activity, promoting a continuous C and N flow, which affects the aggregates reorganization and organic matter (SOM) pools and carbon stock. The objective of this study was to evaluate the dynamics of decomposition of winter crops (black oat, vetch and radish) and summer (maize, bean and soybean) and their contribution to C stock in the labile organic matter and macroaggregates and the

relationships with stratification ratio in an Oxisol under no-tillage. This study was conducted in a long-term no-tillage experiment for 18 years at the Experiment Station of ABC Foundation, located in Ponta Grossa, PR, Brazil. The dynamics of crop residues decomposition was evaluated in a quantitative way, through decomposition ratio and half-life of the crop residues and, in a qualitative way, through organic components determination and their relationships and quality index. In the soil were determined the total amount and the evolution of C and N stock in the labile organic matter ($> 53 \mu\text{m}$) and the C and N content and stock in the macroaggregates and the relationships with the stratification ratio. The decay rate of crop residues was evaluated in eight sampling times: 0, 10, 25, 45, 70, 100, 135 and 175 days after the management or harvest crops. The conversion ratio of C from the crop residues to the labile organic matter in the soil was determined at 0-10 cm depth, considering two times of sampling: in the experiment start, on October/2006 (t_1) and at end of the experiment, on October/2007 (t_2). The samples to macroaggregates were taken on October/2007 in three depths (0-2.5, 2.5-5 and 5-10 cm) and were measured total organic carbon (TOC) and total nitrogen (TN) in three macroaggregates classes (19-8, 8-4 and 4-2 mm). The average of biomass losses during decomposition of winter crop residues was significantly different according to the following: vetch $>$ black oat = radish. A comparison of the summer crop residues showed that the bean had the highest decay rate, followed by soybean, while maize had the lowest decay rate. The half-life of crop residues showed the following sequence: maize (173 days) $>$ soybean (116 days) $>$ bean (87 days) $>$ black oat (69 days) = radish (69 days) $>$ vetch (46 days). The lignin content associated with the content of nitrogen was the most important factor in controlling the crop residues decay rate. The nitrogen and soluble carbohydrates content was crucial to increase the decomposition process and conversion of C residues into soil C stock. The average of C conversion from RC

for the labile C in soil was 31.3%. The labile C stock ranged from 0.27 to 0.91 Mg ha⁻¹ and the average was 0.70 Mg ha⁻¹. The percentage of 19-8 mm macroaggregates was significantly higher to the others, and represented 71.9% of the average for succession and depths. The TOC and TN contents in the 0-2.5 cm layer was significantly higher in all aggregates classes, and reduced with increase depth, indicating the formation of stratification in the soil profile, due to continuous input of organic matter through crop residues. The content and stock of TOC increased when included species with high C:N ratio (black oat, maize and soybean). The crop sequence, which had the highest carbon content and storage in soil was the black oat-soybean (Bo-S) and C:N ratio of this sequence was significantly superior than the others, regardless of the aggregate classes and depth. Regardless of crop sequences, the content (g kg⁻¹) and stock (kg ha⁻¹) of TOC and TN in the macroaggregates 19-8 mm was significantly superior than others classes in all depths. There was linear significantly relation between the TOC content and stock with the stratification ratio in macroaggregates of 19-8 mm. These results confirm the importance of no-tillage, that by the lack of soil disturbance and the continued contribution of crop residues, promotes the formation of more stable large macroaggregates (19-8 mm) and the physical protection of organic matter to your interior, resulting in an increase of C and N content and stock in the soil.

Key words: crop residues decomposition, C conversion ratio, C stratification ratio, C and N stock in soil.

3. INTRODUÇÃO

A rotação de culturas é considerada a base de sustentação para o sucesso da adoção e manutenção do sistema plantio direto (SPD) por longo prazo (Derpsch et al 1995). O SPD, associado à rotação de culturas, além de diminuir riscos de erosão,

aumenta a atividade biológica (Balota et al., 2003), a agregação das partículas do solo (Castro Filho et al, 1998; Madari, 2004) melhora a fertilidade e aumenta o estoque de carbono orgânico total (COT no solo (Bayer et al., 2000; Sá et al., 2001; Dieckow et al., 2005; Kong et al., 2005; Amado et al., 2006, Bayer et al., 2006; Calegari et al., 2008; Sá e Lal, 2009). Atualmente a discussão sobre as mudanças climáticas globais vem despertando enorme interesse da sociedade em reduzir a emissão dos gases causadores do efeito estufa e, do ponto de vista da exploração agropecuária, os sistemas de manejo do solo com baixa mobilização ou com ausência de preparo do solo como o SPD, tem destaque por ser o sistema de cultivo que além de conservar o solo, reduz a emissão de gases para a atmosfera por reter carbono no solo, contribuindo para a mitigação dos impactos das mudanças climáticas globais.

O solo funciona como um grande reservatório de carbono. Todos os processos químicos de transformação dos resíduos de culturas demandam carbono, que é utilizado como fonte de energia pelos microorganismos heterotróficos do solo, principalmente fungos e bactérias, que processam os compostos menos estáveis, principalmente restos vegetais, até atingirem maiores graus de estabilidade ou a humificação. Com isso ocorre aumento da matéria orgânica do solo, com conseqüente melhoria na estrutura do mesmo. Assim, o SPD associado à rotação de culturas, com o retorno de elevada quantidade de resíduos culturais, conduz o solo a atuar mais como dreno do que como fonte de CO₂. A proteção da matéria orgânica do solo dentro de agregados constitui o componente-chave do plantio direto.

Sá (2004) propôs uma escala de evolução do plantio direto para a região dos Campos Gerais do Paraná com o objetivo de entender as mudanças que ocorrem com a adoção do SPD, onde destacou que as alterações são aditivas e ocorrem com o tempo de acordo com as seguintes fases: a) fase inicial (0 – 5 anos), onde ocorre o rearranjo da

estrutura devido à ausência de preparo, a decomposição é elevada e o acúmulo de palha e matéria orgânica do solo (MOS) ainda são baixos, a imobilização do nitrogênio (N) é maior que a mineralização; b) fase de transição (6 -10 anos), inicia o acúmulo de palha, MOS e de fósforo (P), e a mineralização do N tende a ser maior que a imobilização; c) fase de consolidação (11 – 20 anos), ocorre o acúmulo de palha e o aumento crescente de carbono (C) e da CTC, e a mineralização do N é maior que a imobilização; d) fase de manutenção (> 20 anos), com elevado acúmulo de palha na superfície, fluxo contínuo de C e N, elevado acúmulo de P na camada superficial do solo, mineralização contínua de N, maior armazenamento de água e ciclagem contínua de nutrientes.

Essa escala preconiza que o plantio direto é um sistema dinâmico e as alterações com o passar do tempo caracterizam estágios de evolução da qualidade do solo e do potencial produtivo. Com o passar dos anos, as alterações tornam-se menos abruptas e o fluxo de C e dos macro e micronutrientes é mais constante. O fluxo contínuo de C resultante da mineralização e da humificação dos compostos orgânicos em áreas por longo período sob plantio direto parecem ser os fatores-chave que influenciam as associações do C com os agregados e as frações granulométricas da matéria orgânica do solo.

A fração lábil da matéria orgânica do solo é de particular interesse, por causa da sua contribuição no suprimento de nutrientes e por apresentar resposta mais rápida às mudanças nas práticas de manejo do solo (Dieckow et al., 2005; Bayer et al., 2006; Dieckow et al., 2009; Sá e Lal, 2009). A adição contínua de resíduos culturais com relações C:N contrastantes proporciona fluxos diferenciados de C e N. É essa variação que proporciona o acúmulo de matéria orgânica no solo, porque ocorrerá sobreposição de resíduos em camadas em razão da resistência à decomposição dos resíduos com maior relação C:N. Em geral, as leguminosas normalmente usadas para formação de

coberturas verdes (ervilhacas, tremoços, mucunas, crotalárias, estilozantes, guandu e outras) liberam elevada quantidade de polissacarídeos e amino-compostos, enquanto as gramíneas (milho, sorgo, trigo, centeio, braquiária, pé-de-galinha e outras) são ricas em polifenóis e ligninas (Sá et al., 2001; Séguy et al., 2006). A combinação das culturas de gramíneas com leguminosas em rotação forma a base do sistema plantio direto e parece proporcionar efeito intermitente na formação de macroagregados na camada superficial e direciona o solo a funcionar como um dreno de C (Amado et al., 2006; Bayer et al., 2006; Sá e Lal, 2009). Portanto, o desempenho do SPD está associado, dentre outros fatores, à quantidade e à qualidade dos resíduos aportados ao solo (Alvarenga et al., 2001; Santi et al., 2003; Kliemann et al., 2006).

Do ponto de vista do manejo do solo, Duxbury et al. (1989) sugerem que pode-se alocar os diferentes estágios da dinâmica do C em quatro compartimentos ou “pools”, representando as possíveis alterações causadas pelo manejo:

- *Compartimento ativo ou lábil* – é constituído por compostos orgânicos facilmente oxidáveis, derivados de fragmentos de vegetais recentes. É controlado principalmente pela adição de resíduos culturais, pelo clima e é fortemente influenciado pelo tipo de manejo do solo empregado. As modificações ocorrem com rapidez e elevadas quantidades de C e N estão em função das transformações pela biomassa microbiana;
- *Compartimento lentamente oxidável* – está diretamente relacionado com os macroagregados e é controlado pela mineralogia e pelos fatores agronômicos que interferem na agregação. Dentre os quais, os sistemas de manejo do solo afetam o tamanho deste reservatório;

- *Compartimento muito lentamente oxidável* – está diretamente relacionado com os microagregados e o principal aspecto controlador é a sua estabilidade em água. O sistema de manejo do solo interfere muito pouco nesse compartimento;
- *Compartimento passivo ou recalcitrante* – está relacionado com o C associado às partículas primárias do solo. É controlado pela mineralogia da fração argila, formando complexos organo-minerais. Este compartimento não é influenciado pelo manejo do solo.

A decomposição lenta e gradual dos resíduos culturais libera compostos orgânicos que estimulam a formação e a estabilidade de agregados (Tisdall e Oades, 1982; Six et.al., 2002). Em consequência, a matéria orgânica do solo (MOS) fica menos exposta aos processos microbianos, reduzindo a taxa de mineralização e resultando em menor fluxo de CO₂ para a atmosfera (Reicosky, 1995). Esse mecanismo proporciona a proteção física da matéria orgânica do solo que atua como agente de ligação entre os microagregados na formação dos macroagregados (Six et al., 2002). A formação de agregados no SPD está associada com a taxa de macroagregação como o caminho para a proteção do C oriundo do fluxo contínuo da decomposição dos resíduos culturais (Bayer et al., 2000; Sá et al., 2001). Dessa forma o solo torna-se um dreno de CO₂ atmosférico quando as adições de C são maiores que as perdas por oxidação. Os sistemas de manejo que usam o preparo do solo para a produção vegetal constituem-se no principal fator dessas perdas.

Tisdall e Oades (1982), observaram que os polissacarídeos extracelulares das bactérias ou fungos e as mucilagens das raízes funcionam como agentes agregantes das partículas de solo. O crescimento e a proliferação das hifas dos fungos no sistema PD contribuem para a formação dos macroagregados (Beare et al., 1993). Os agentes

temporários e transientes de ligação são importantes para a macroagregação (> 250 µm) (Tisdall e Oades, 1982; Dormaar, 1991). Resultados obtidos por Sisti et al. (2004) e Amado et al. (2006) mostram que o aporte de N é fundamental na construção/acúmulo do COT em SPD no Brasil e, onde foram incluídas rotações com leguminosas (fixadoras de N), maiores acúmulos de COT foram observados.

Wieder e Lang (1982), explicaram o processo de decomposição de resíduos de plantas, afirmando que, de modo geral na fase inicial grande parte desses resíduos é constituída de materiais de fácil decomposição, como açúcares e proteínas, ficando para o final, o material recalcitrante e de difícil a decomposição, como celulose, gorduras, tanino e lignina. Durante a decomposição, a proporção relativa de material recalcitrante aumenta progressivamente enquanto a decomposição absoluta decresce, ficando a decomposição relativa permanentemente constante.

Torna-se evidente, portanto, que o sistema de manejo do solo interfere diretamente na velocidade do processo de decomposição da matéria orgânica e que sistemas de manejo conservacionistas como o sistema plantio direto (SPD) proporcionam liberação contínua e gradual de nutrientes através do processo de decomposição da MOS, porém com menores taxas de liberação de CO₂, sendo desejáveis quando o objetivo é aumento da produtividade em compasso com a preservação ambiental.

Esta pesquisa será apresentada na forma de três artigos que serão submetidos a periódicos científicos conforme descrito a seguir:

- 1) Taxas de decomposição e meia-vida de resíduos culturais de inverno e verão em um Latossolo Vermelho sob plantio direto de longa duração. *Decomposition rates and half-life of winter and summer crop residues in a Brazilian Oxisol under long-term no-tillage* - Soil and Tillage Research

- 2) Alterações no carbono lábil em função da decomposição de resíduos culturais em um Latossolo Vermelho sob plantio direto de longa duração. *Labile carbon changes due to decomposition of crop residues in a Brazilian Oxisol under long-term no-tillage* - Soil Biology and Biochemistry
- 3) Estoque de Carbono e Nitrogenio em macroagregados e a relação de estratificação afetados por sucessões de culturas em um Latossolo Vermelho sob plantio direto de longa duração. *Carbon and Nitrogen pools in macroaggregates and stratification ratio affected by winter and summer crop sequences in a Brazilian Oxisol under long-term no-tillage* - Geoderma

4. HIPÓTESE

Esta pesquisa foi concebida com base na premissa de que espécies com a finalidade de cobertura vegetal de inverno em sucessão com culturas de verão apresentam diferentes taxas de decomposição, refletindo em diferentes contribuições para o estoque de carbono e nitrogênio total nos macroagregados e na fração lábil da matéria orgânica do solo em sistema plantio direto na palha de longa duração.

5. OBJETIVO GERAL

Determinar a taxa de decomposição de diferentes espécies de inverno (aveia preta, ervilhaca, nabo forrageiro) e verão (milho, feijão e soja) e sua contribuição para o aporte anual de carbono e nitrogênio na matéria orgânica lábil – MOL (fração granulométrica > 53 µm) e nas classes de macroagregados do solo.

5.1. OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- a)** Determinar a taxa de decomposição e meia vida dos resíduos culturais das espécies estudadas;
- b)** Determinar a relação C:N e a relação Lignina:N dos resíduos culturais das espécies estudadas;
- c)** Determinar o índice de suscetibilidade à decomposição, índice ligno-celulósico e índice de decomponibilidade dos resíduos culturais das espécies estudadas;
- d)** Determinar o aporte anual de carbono e nitrogênio dos resíduos culturais das espécies estudadas;
- e)** Determinar a taxa de conversão de C dos resíduos culturais para os estoques de C da fração lábil da matéria orgânica do solo;
- f)** Determinar os estoques de C e N no solo na fração lábil ($> 53 \mu\text{m}$) e nas classes de macroagregados do solo;
- g)** Determinar a relação de estratificação (RE) do carbono orgânico total (COT) no solo.

6. TAXAS DE DECOMPOSIÇÃO E MEIA-VIDA DE RESÍDUOS CULTURAIS DE INVERNO E VERÃO EM UM LATOSSOLO VERMELHO SOB PLANTIO DIRETO DE LONGA DURAÇÃO¹

Lutécia Beatriz dos Santos Canalli², João Carlos de Moraes Sá³, Aníbal de Moraes⁴, Roberto Simão de Carli⁵, Lucio Scherekemberg Elias⁵, Erielton Aparecido Pupo Antunes⁵, Marielle Letícia Romko⁵, Josiane Bürkner dos Santos⁶, Clever Briedis⁷, Ademir de Oliveira Ferreira⁸

Resumo - A decomposição dos resíduos culturais está relacionada à quantidade e composição química dos materiais adicionados e às condições climáticas da região (temperatura e precipitação), que afetam a atividade microbiana responsável por este processo. O objetivo deste estudo foi avaliar a taxa da decomposição e a meia-vida das culturas de inverno (aveia preta, ervilhaca e nabo forrageiro), durante o ciclo das culturas de verão (milho, soja e feijão) e destas durante o ciclo das culturas de inverno em um Latossolo Vermelho sob plantio direto. O modelo experimental consistiu de três macroparcelas com dimensões de 10 x 50 m, nos quais foram plantadas as culturas de cobertura de inverno: aveia preta (*Avena strigosa Schieb*), ervilhaca (*Vicia sativa L.*) e

¹ Parte da tese de doutorado apresentada ao Curso de Pós-graduação em Agronomia, área de concentração em Produção Vegetal, Universidade Federal do Paraná (UFPR).

² Engenheira Agrônoma, Dra. pelo curso de pós-graduação em Agronomia, área de concentração em Produção Vegetal da UFPR, Extensionista do Instituto Paranaense de Assistência Técnica e Extensão Rural (Emater) e Assessora Técnica da Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha (FEBRAPDP). End.: Rua 7 de Setembro, 800/ sala 201, centro, Ponta Grossa, Paraná. Email: lutecia@emater.pr.gov.br

³ Engenheiro Agrônomo, Prof. Dr. da Universidade Estadual de Ponta Grossa (UEPG), Departamento de Solos e Engenharia Agrícola. Email: jcmsa@uepg.br

⁴ Engenheiro Agrônomo, Prof. Dr. da Universidade Federal do Paraná (UFPR), Departamento de Fitotecnia e Fitossanitarismo. Email: anibalm@ufpr.br

⁵ Engenheiros Agrônomos pela Universidade Estadual de Ponta Grossa

⁶ Engenheira Agrônoma, Dra pela Universidade Federal do Paraná

⁷ Engenheiro Agrônomo, Mestrando na Universidade Estadual de Ponta Grossa

⁸ Engenheiro Agrônomo, Mestre pela Universidade Estadual de Ponta Grossa

nabo forrageiro (*Raphanus sativus L.*). Cada uma destas áreas foi dividida em três parcelas de 10 x 16,67 m, e sobre os resíduos culturais de inverno foram plantadas as culturas de verão: feijão (*Phaseolus vulgaris L.*), soja (*Glycine max L. Merrill*) e milho (*Zea mays L.*). Nas parcelas foram comparadas as diferentes sucessões de culturas: aveia preta-feijão (Ap-F); aveia preta-milho (Ap-M); aveia preta-soja (Ap-S); ervilhaca-feijão (Er-F); ervilhaca-milho (Er-M); ervilhaca-soja (Er-S); nabo forrageiro-feijão (Nb-F); nabo forrageiro-milho (Nb-M) e nabo forrageiro-soja (Nb-S), e as subparcelas foram constituídas pelas oito épocas de coleta para a avaliação da decomposição dos resíduos culturais: 0, 10, 25, 45, 70, 100, 135 e 175 dias após o manejo ou colheita das culturas, com 4 repetições em cada época. Foram determinadas a taxa de decomposição e a meia vida dos resíduos culturais. A perda média de fitomassa durante a decomposição dos resíduos culturais de inverno foi significativamente diferente conforme a sequência: ervilhaca > aveia preta = nabo forrageiro. A comparação das médias dos resíduos culturais de verão revelou que o feijão apresentou a maior taxa de decomposição, seguido pela soja, enquanto o milho apresentou a menor taxa de decomposição. A meia-vida dos resíduos culturais apresentou a seguinte sequência: milho (173 dias) > soja (116 dias) > feijão (87 dias) > aveia preta (69 dias) = nabo forrageiro (69 dias) > ervilhaca (46 dias).

Palavras-chave: taxa de decomposição dos resíduos culturais, meia vida dos resíduos culturais, plantio direto

DECOMPOSITION RATES AND HALF-LIFE OF WINTER AND SUMMER CROP RESIDUES IN A BRAZILIAN OXISOL UNDER LONG-TERM NO-TILLAGE

Abstract - Crop residues decomposition is related to the amount and chemical composition of the organic material added and the local climate that affect the microbial activity responsible for this process. The objective of this study was to assess the decay rate and half-life of winter crops (black oat, vetch and radish), during the summer crops growth (maize, soybean and bean) and these during the winter cycle crops in an Oxisol under long-term no-tillage. The experiment comprised of three areas with dimensions of 10 x 50 m, in which were cultivated winter cover crops such as black oat (*Avena strigosa Schieb*), vetch (*Vicia sativa L.*) and radish (*Raphanus sativus L.*). Each of these areas was divided into three plots of 10 x 16.67 m, and on the winter crop residues were planted the summer crops: bean (*Phaseolus vulgaris L.*), soybean (*Glycine max L. Merrill*) and maize (*Zea mays L.*). The plots were compared with different crop sequences: black oat-bean (Bo-B), black oat-maize (Bo-M), black oat-soybean (Bo-S); vetch-bean (V-B), vetch-maize (V-M), vetch-soybean (V-S), radish-bean (Rd -B), radish-maize (Rb-M) and radish-soybean (Rd-S), and the sub-plots were composed of the eight sampling times to evaluate the decay rate of crop residues such as: 0, 10, 25, 45, 70, 100, 135 and 175 days after the management or harvest crops, with 4 replications in each season. The average of biomass losses during decomposition of winter crop residues was significantly different according to the following: vetch > black oat = radish. A comparison of the summer crop residues showed that the bean had the highest decay rate, followed by soybean, while maize had the lowest decay rate. The half-life of crop residues showed the following sequence: maize (173 days) > soybean (116 days) > bean (87 days) > oat (69 days) = radish (69 days) > vetch (46 days).

Key words: decomposition ratio of crop residues, crop residues half-life, no-tillage.

Introdução

A taxa de decomposição dos resíduos culturais depende da natureza e da quantidade adicionada do material vegetal, da fertilidade do solo, do manejo do solo e dos resíduos, e das condições climáticas locais, representadas principalmente pela pluviosidade e temperatura do ar (Cortez et al., 1996; Kliemann et al., 2006). Esses fatores, por sua vez, afetam a atividade microbológica do solo e a atividade da mesofauna, que na etapa inicial de fragmentação do material expõe maior superfície de contato ao ataque da biomassa microbiana (Cortez, 1998; Alvarenga et al. 2001).

Entre as espécies cultivadas é bem conhecido o uso de leguminosas (ervilhacas, tremoços, mucunas e crotalárias), isoladas ou em consórcio com outras espécies, como estratégia para a adubação verde (Monegat, 1991; Calegari et al., 1993; Péla et al., 1999, Amado et al., 2001; Aita e Giacomini, 2003, Balbinot Jr et al, 2004). Estas espécies liberam elevadas quantidades de polissacarídeos e amino compostos, o que determina uma velocidade maior na decomposição destes materiais quando comparados com as gramíneas (milho, sorgo, trigo, centeio, braquiária e outras), que são ricas em polifenóis e ligninas e por isso possuem maior resistência à decomposição (Sá et al., 2001; Kliemann et al., 2006; Lorenz et al, 2007).

A rotação de culturas afeta a biomassa microbiana, sua atividade e a relação fungos/bactérias (Six et al., 2006). Solos sob rotação de culturas apresentaram aumento da atividade enzimática quando comparados com solos sob monocultivos contínuos (Acosta-Martínez et al, 2003). Há um aumento da população da biomassa microbiana quando leguminosas são incluídas na rotação comparadas com áreas em pousio (Lupwayi et al., 1999). A qualidade do substrato também altera a relação fungos/bactérias, ou seja, substratos com elevada relação C:N favorecem a ocorrência de fungos e substratos com baixa relação C:N favorecem bactérias (Bossuyt, 2001).

A biomassa de fungos compreende a maior parte da biomassa microbiana em ecossistemas naturais e também em sistemas conservacionistas como o plantio direto (Holland e Coleman, 1987; Beare et al., 1992; Frey et al., 1999). A eficiência dos microorganismos decompositores tende a diminuir quando aumenta a complexidade dos substratos e quando nutrientes, particularmente o N, tornam-se limitantes. Roberson et al. (1995) sugeriram que o suprimento de N, mais que o suprimento de C, controla o efeito da decomposição dos resíduos sobre o conteúdo de carboidratos do solo.

O conhecimento das espécies utilizadas no sistema de rotação, sua taxa de decomposição e a meia vida destes resíduos é essencial para que possamos entender a dinâmica do processo de transformação dos resíduos culturais. Esta pesquisa foi concebida com o objetivo de avaliar a dinâmica do processo de decomposição das culturas de aveia preta, ervilhaca, nabo forrageiro, feijão, soja e milho, através da taxa de decomposição e da meia vida destes materiais.

Material e métodos

Localização do experimento e descrição do meio físico

O presente estudo foi realizado na Estação Experimental da Fundação ABC, localizada no município de Ponta Grossa, estado do Paraná, situada geograficamente a 25°00' de Latitude Sul e 50°09' de Longitude Oeste, com altitude aproximada de 975 m. O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen, é do tipo Cfb, subtropical úmido, com temperatura média anual de 18°C e precipitação média anual de aproximadamente 1550 mm. A tabela 1 apresenta a distribuição anual da temperatura e pluviosidade históricas da região (Iapar, 1998) e as ocorridas durante o período do experimento (out/2006 a nov/2007).

Tabela 1. Média mensal da precipitação pluviométrica, temperatura máxima (T máxima) e temperatura mínima (T mínima) para o período de 44 anos (média histórica) e durante o período do experimento (out/06 à set/07).

Descrição	Meses												Média
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
Média histórica†													
Pluviosidade	188	155	136	105	118	115	95	80	134	149	120	150	128.8
T máxima	28	27	26	24	22	20	20	22	23	24	26	27	24.1
T mínima	17	17	16	14	11	9	9	10	12	14	15	16	13.3
Período do Experimento††	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	
Pluviosidade	75	195	155	262	163	126	75	170	4	138	21	34	118.2
T máxima	27	28	30	29	30	32	28	23	25	21	24	28	27.1
T mínima	16	16	19	19	19	18	16	10	10	8	11	14	14.7

† Média histórica para o período de 44 anos, de janeiro à dezembro

†† Dados para o período do experimento (out/06 à set/07)

Fonte: IAPAR, estação meteorológica de Ponta Grossa.

O solo foi classificado como Latossolo Vermelho Distrófico típico, textura argilosa, profundo, muito bem estruturado e drenado, derivado de material retrabalhado de arenitos da formação Furnas e folhelhos da formação Ponta Grossa, ambos sedimentos do período Devoniano. A composição florística natural da região, denominada Campos Gerais, caracteriza-se pela presença de gramíneas baixas, desprovidas de arbustos, ocorrendo apenas matos ou capões situados nas depressões em torno das nascentes (Maack, 1981). O relevo é suavemente ondulado com pendentes entre 2 a 7% de declividade.

Histórico e caracterização da área experimental

As avaliações foram feitas em um experimento sob plantio direto no longo período (18 anos), onde é avaliada anualmente a produção de palha de dez espécies de culturas de

cobertura de inverno (aveia preta, aveia branca, azevém, ervilhaca, nabo forrageiro, centeio, triticale, canola, tremoço branco, tremoço azul) e as produtividades das culturas de verão (feijão, soja e milho). Em 1989 foi realizada a análise do solo na profundidade de 0 a 20 cm, antes da implantação do experimento original e em outubro de 2006, para a caracterização da fertilidade e textura do solo antes do início das avaliações do presente estudo, foram coletadas em cada parcela três amostras de solo na profundidade de 0-20 cm. As análises químicas foram realizadas conforme Pavan et al. (1992) e a composição granulométrica para a definição da classe textural foi determinada pelo método do densímetro (Embrapa, 1997) (Tabela 2).

Tabela 2. Resultados da análise química do solo antes da implantação do experimento original, em 1989, e resultados da análise química do solo e de textura no início das avaliações do presente estudo, em outubro de 2006, na profundidade de 0-20 cm.

Análise química do solo antes da implantação do experimento, em 1989										
pH	H + Al	Al	Ca	Mg	K	CTC	V	MO	P	
CaCl ₂	cmol _c dm ⁻³			-----			%	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	
5,1	5,83	0,13	2,91	2,14	0,33	11,2	46,7	38,5	6,5	
Análise química e de textura no início das avaliações do presente estudo, em outubro de 2006										
pH	H + Al ⁺³	Al ⁺³	Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	CTC	P	Areia	Silte	Argila
CaCl ₂	cmol _c dm ⁻³			-----			mg dm ⁻³	g kg ⁻¹		
5,7	4,6	0,1	6,1	3,1	0,6	14,3	10,3	328	223	449

Em abril de 1989 foi efetuada a correção da acidez do solo com 5,6 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico incorporado, além da adubação corretiva com 213 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 60,5 kg ha⁻¹ de K₂O à lanço. Como correção de manutenção foi adotado o critério de aplicar 2 toneladas de calcário superficialmente a cada 2 anos, antes do plantio das culturas de cobertura de inverno. O manejo das culturas de cobertura foi realizado com a aplicação de um herbicida de ação sistêmica (glifosate) no estágio de florescimento pleno. Posteriormente foi passado o rolo faca e quando os resíduos culturais estavam completamente secos, foi realizado o plantio das culturas de verão, de acordo com o calendário para cada cultura.

Modelo experimental

O experimento original foi constituído por 10 macroparcelas com as culturas de inverno (aveia preta, aveia branca, azevém, ervilhaca, nabo forrageiro, centeio, triticale, canola, tremço branco, tremço azul), de dimensão 10 x 50 m, e em sentido perpendicular a estas foram plantadas as culturas de verão (feijão, soja e milho), em macroparcelas de 16,67 x 100 m. O plantio das culturas de inverno é realizado em linhas, entre abril e maio, em função do ciclo das espécies. O plantio das culturas de verão é realizado entre outubro (milho) e novembro (soja e feijão). O sistema de rotação adotado é o de alternância entre gramíneas e leguminosas no inverno e a cada três anos a cultura do milho retorna na mesma área no verão. Portanto, são ciclos de 10 anos para as culturas de inverno e de 3 anos para as culturas de verão.

O modelo experimental do presente estudo consistiu de três macroparcelas com arranjo em parcelas subdivididas. Nas macroparcelas, de dimensão 10 x 50 m, foram plantadas as culturas de cobertura de inverno: aveia preta (*Avena strigosa Schieb*), ervilhaca (*Vicia sativa L.*) e nabo forrageiro (*Raphanus sativus L.*), sendo cada uma destas macroparcelas dividida em três parcelas de 10 x 16,67 m, e sobre os resíduos culturais de inverno foram plantadas as culturas de verão: feijão (*Phaseolus vulgaris L.*), soja (*Glycine max L. Merrill*) e milho (*Zea mays L.*). Nas parcelas foram comparadas as sucessões de culturas: aveia preta-feijão (Ap-F); aveia preta-milho (Ap-M); aveia preta-soja (Ap-S); ervilhaca-feijão (Er-F); ervilhaca-milho (Er-M); ervilhaca-soja (Er-S); nabo forrageiro-feijão (Nb-F); nabo forrageiro-milho (Nb-M) e nabo forrageiro-soja (Nb-S). As subparcelas foram constituídas pelas oito épocas de coleta para a avaliação da decomposição dos resíduos culturais: 0, 10, 25, 45, 70, 100, 135 e 175 dias após o manejo ou colheita das culturas, com 4 repetições em cada época.

Avaliações e métodos de análises

A fitomassa seca de cada espécie foi determinada através da coleta de três amostras em 0,5 m², ao acaso, em cada parcela. Para as culturas de cobertura de inverno a coleta foi feita no estágio de florescimento pleno, antes do manejo das mesmas e para as culturas de verão no estágio de maturação fisiológica. O material foi seco em estufa a 60°C por 72 horas e em seguida pesado para a obtenção da fitomassa seca.

A taxa de decomposição dos resíduos culturais foi avaliada pelo método das bolsas de decomposição (BD) conforme Thomas & Asakawa (1993). As BD foram confeccionadas com náilon de malha 1 mm de abertura e dimensões de 15 x 15 cm. Em cada parcela foram colocadas vinte e oito BD contendo os resíduos culturais (RC) correspondentes, com massa previamente conhecida. As BD foram colocadas abaixo da palhada e em contato com o solo, no dia 24/10/2006 para os RC de inverno e no dia 10/05/2007 para os RC de verão. A taxa de decomposição dos RC foi avaliada em oito épocas: 0 (E_0); 10 (E_1); 25 (E_2); 45 (E_3); 70 (E_4); 100 (E_5); 135 (E_6) e 175 (E_7) dias após a colocação das BD em cada parcela, com quatro repetições por época, definidas por sorteio. Após a coleta, o material foi seco em estufa a 60°C por 72 horas, e pesado para a obtenção da fitomassa seca em cada época.

A meia-vida dos resíduos culturais, que representa o tempo necessário para que 50% da fitomassa residual, após o manejo ou colheita das culturas, seja decomposta, foi calculada conforme descrito por Paul & Clark (1989) através da equação:

$$t_{1/2} = (\ln 2)/k \quad (\text{Eq. 1})$$

em que: $t_{1/2}$ = tempo de meia-vida

(ln 2) é equivalente a 0,693

k = constante de decomposição que determina o índice de perda de massa por dia.

A constante de decomposição (k) foi obtida com a equação exponencial simples ($Q = Q_0 \exp^{-kt}$) que gera a curva de decomposição conforme Wieder e Lang (1982). Nos resíduos culturais de verão as curvas de decomposição não atingiram o equilíbrio aos 175 dias de avaliação, por esta razão estimou-se a decomposição aos 350 dias, multiplicando-se por dois a constante gerada pela curva.

Análise estatística

Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), aplicando-se o teste F para identificar as diferenças entre os tratamentos, através do software Statistica. Para os efeitos significativos foi realizada a comparação de médias pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade ($p < 0,05$).

Resultados e Discussão

Dinâmica da decomposição dos resíduos culturais das espécies de inverno

A taxa de decomposição dos RC das espécies de inverno foi superior às espécies de verão porque ocorreu durante o desenvolvimento das culturas de verão, período em que a temperatura e a precipitação são mais favoráveis à atividade da biomassa microbiana.

A taxa de decomposição variou de 0,44% dia⁻¹ para a aveia preta na sucessão aveia preta-feijão (Ap-F) a 0,53% dia⁻¹ para a ervilhaca na sucessão ervilhaca-milho (Er-M) e ervilhaca-soja (Er-S) (Tabela 3), representando uma perda total de 77,5% a 92 e 93%, respectivamente (Tabela 4). A produção de fitomassa seca variou de 2022 kg ha⁻¹ para a ervilhaca na sucessão ervilhaca-soja (Er-S) a 5024 kg ha⁻¹ para o nabo forrageiro na sucessão nabo forrageiro-feijão (Nb-F) (Tabela 3). Observou-se as maiores taxas de decomposição dos resíduos das culturas de inverno nas sucessões com a soja e com o

milho e as menores taxas na sucessão com o feijão. A principal razão está possivelmente associada ao tipo de resíduo das culturas de verão que antecederam as culturas de inverno, as quais deixaram sobre o solo materiais diferentes em quantidade e qualidade. Nas parcelas com o feijão na safra 2006/07 (período do presente estudo) havia o milho na safra de verão anterior (2005/06); nas parcelas com o milho em 2006/07, havia soja na safra 2005/06 e por fim, nas parcelas com a soja em 2006/07, havia o feijão na safra anterior (Tabela 3). Além disso, constatou-se maior produção de fitomassa das culturas de inverno nas parcelas em sucessão com o feijão e com o milho (Tabela 3). Nestas parcelas o milho e a soja, respectivamente, antecederam as culturas de inverno do presente estudo e, pela maior adição de resíduos que proporcionam em relação ao resíduo de feijão, mantiveram a superfície do solo coberta por um período mais longo de tempo e conseqüentemente mantiveram maior umidade no solo. Isto foi importante porque durante o inverno de 2006 ocorreram períodos de estiagem, com precipitação abaixo da média e a manutenção da superfície do solo com cobertura proporcionou maior desenvolvimento às culturas de inverno devido ao aproveitamento da umidade residual.

Tabela 3. Produção total de fitomassa seca das culturas de inverno, fitomassa decomposta e resmanescente após 175 dias e taxa de decomposição.

Sucessão de culturas [†]	Resíduo cultural avaliado [‡]	Fitomassa			Taxa de decomposição	
		produzida	decomposta	remanescente	kg ha ⁻¹ dia ⁻¹	% dia ⁻¹ ^{‡‡}
		----- kg ha ⁻¹ -----				
M/Ap-F	Ap	4000 ^(±239)	3101	899	17,7	0,44 ^(±0,04)
S/Ap-M	Ap	4268 ^(±658)	3400	867	19,4	0,46 ^(±0,05)
F/Ap-S	Ap	3292 ^(±839)	2591	700	14,8	0,45 ^(±0,04)
M/Er-F	Er	2870 ^(±503)	2547	323	14,6	0,51 ^(±0,02)
S/Er-M	Er	2471 ^(±221)	2274	197	13,0	0,53 ^(±0,01)
F/Er-S	Er	2022 ^(±167)	1879	143	10,7	0,53 ^(±0,02)
M/Nb-F	Nb	5024 ^(±435)	4120	904	23,5	0,47 ^(±0,03)
S/Nb-M	Nb	3086 ^(±1088)	2615	471	14,9	0,48 ^(±0,02)
F/Nb-S	Nb	2283 ^(±349)	1950	333	11,1	0,49 ^(±0,02)

[†] Sucessão de culturas (em negrito período do presente estudo e antes da barra representa a cultura de verão que antecedeu o período do presente estudo): Milho/**Aveia preta-Feijão** (M/Ap-F); Soja/**Aveia preta-Milho** (S/Ap-M); Feijão/**Aveia preta-Soja** (F/Ap-S); Milho/**Ervilhaca-Feijão** (M/Er-F); Soja/**Ervilhaca-Milho** (S/Er-M); Feijão/**Ervilhaca-Soja** (F/Er-S); Milho/**Nabo forrageiro-Feijão** (M/Nb-F); Soja/**Nabo forrageiro-Milho** (S/Nb-M); Feijão/**Nabo forrageiro-Soja** (F/Nb-S)

[‡] Resíduo cultural avaliado: Aveia preta (Ap); Ervilhaca comum (Er) e Nabo forrageiro (Nb)

^{‡‡} Desvio Padrão da média (±)

Em contraste, as culturas de inverno em sucessão com a soja foram cultivadas sobre os resíduos da cultura de feijão da safra de verão 2005/06. Dessa forma, o aporte dos resíduos de feijão foi inferior ao do milho e da soja e sua decomposição foi mais rápida devido a baixa relação C:N, mantendo conseqüentemente menor reserva de água para a planta sucessora durante o período de estiagem. Isto também explica porque a aveia preta na sucessão AP-F apresentou a menor decomposição, pois além da aveia ter produzido elevada quantidade de fitomassa (Tabela 3), ainda restava na superfície do solo quantidade expressiva de resíduos de milho. Por outro lado, na sucessão com duas leguminosas intercaladas por uma gramínea, a precipitação pluviométrica é fator preponderante para garantir maior eficiência ao sistema. Esses argumentos podem ser suportados pela menor produção de fitomassa seca total e remanescente de aveia preta na parcela correspondente ao tratamento AP-S (Tabela 3), cuja cultura antecessora à aveia preta foi o feijão.

A taxa de decomposição da aveia preta durante o desenvolvimento do feijão foi de 17,7 kg ha⁻¹ dia⁻¹ (0,44% dia⁻¹) de fitomassa seca, e aos 175 dias restaram 22,5% (899 kg ha⁻¹) de fitomassa seca (Tabelas 3 e 4). Comportamento semelhante foi observado para a decomposição da aveia preta durante o ciclo do milho e da soja, sendo de 19,4 e 14,8 kg ha⁻¹ dia⁻¹ (0,46 e 0,45% dia⁻¹) de fitomassa seca, chegando aos 175 dias com 20,3% (867 kg ha⁻¹) e 21,3% (700 kg ha⁻¹) de fitomassa remanescente, respectivamente (Tabelas 3 e 4). Não foi constatada diferença significativa quando somente as sucessões com aveia preta foram comparadas para porcentagem de decomposição (Tabela 4).

Tabela 4. Porcentagem de fitomassa seca decomposta dos resíduos culturais de inverno após 175 dias do início da decomposição. Comparação entre os resíduos culturais de inverno para cada cultura sucessora e a média (na coluna) e, comparação de cada resíduo entre as culturas em sucessão (na linha), média de quatro repetições.

Resíduos culturais	Fitomassa decomposta (%)			
	Feijão	Milho	Soja	Média
Aveia preta	77,5 b	79,7 b	78,7 b	78,6 b
Ervilhaca	88,8 a	92,0 a	93,0 a	91,2 a
Nabo forrageiro	82,0 ab	84,7 ab	85,4 ab	84,1 b

Letras minúsculas na coluna e maiúsculas na linha não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Outros autores também reportaram elevada decomposição do resíduo cultural da aveia preta, 80% após 180 dias (Bertol *et al.*, 1998) e 71% após 179 dias (Wisniewski & Holtz, 1997) da massa inicial. Embora as taxas de decomposição tenham sido semelhantes ao do presente estudo, o aporte de massa seca reportado por esses autores, 8,6 t ha⁻¹ (Bertol *et al.*, 1998) e 6,8 t ha⁻¹ (Wisniewski & Holtz, 1997) foi muito superior ao deste estudo (4,0, 4,26 e 3,29 t ha⁻¹). Isto indica que mesmo quando o aporte de resíduos é elevado o que prevalece no processo de decomposição é a constituição química de cada espécie (Péla *et al.*, 1999; Cortez *et al.*, 1996; Lorenz *et al.*, 2007).

A taxa de decomposição diária da ervilhaca durante o desenvolvimento do feijão, do milho e da soja, foi de 14,5, 13,0 e 10,7 kg ha⁻¹ dia⁻¹ (0,51, 0,53 e 0,53% dia⁻¹)

da fitomassa seca inicial, respectivamente (Tabela 3). Após 175 dias, restaram 11,2% (323 kg ha⁻¹), 7,9% (197 kg ha⁻¹) e 7,1% (143 kg ha⁻¹) de fitomassa remanescente (Tabelas 3 e 4) e não ocorreram diferenças significativas para a porcentagem de fitomassa decomposta entre as médias das sucessões com ervilhaca (Tabela 4).

Aita & Giacomini (2003) relataram que aos 30 dias após implantação das bolsas de decomposição restavam ainda 57% da massa inicial e aos 180 dias restavam apenas 32%, enquanto no presente trabalho esta porcentagem ficou próxima a 60% aos 30 dias e foi de 11,2, 7,9 e 7,1% aos 175 dias para as sucessões Er-F, Er-M e Er-S, respectivamente. Esta diferença pode estar relacionada com diferenças de precipitação e temperatura entre os locais dos experimentos, uma vez que a produção de fitomassa foi semelhante, 2660 Kg ha⁻¹ (Aita e Giacomini, 2003) e 2454 Kg ha⁻¹ (presente estudo).

Apesar da decomposição mais rápida, as leguminosas, como a ervilhaca, adicionam elevado aporte de N pela fixação biológica, cerca de 220 kg ha⁻¹ ano⁻¹ (Monegat, 1991) e destes, 60% são liberados em até 30 dias após o manejo químico e mecânico com rolo faca (Aita & Giacomini, 2003). Em outra situação, Cruz et al. (2007) reportaram que as maiores taxas de liberação de N e da mineralização do carbono orgânico ocorrem até 60 dias após a disposição dos resíduos no campo. Isto evidencia a importância de leguminosas nos sistemas de rotação e reforça a necessidade do plantio da cultura sucessora ser o mais próximo possível do manejo destas quando o objetivo é aproveitar o N liberado pelo resíduo cultural.

A taxa de decomposição do nabo forrageiro durante o desenvolvimento do feijão, do milho e da soja foi de 23,5, 14,9 e 11,1 kg ha⁻¹ dia⁻¹ (0,47, 0,48 e 0,49% dia⁻¹) da fitomassa seca inicial, respectivamente (Tabela 3). Após 175 dias restaram 18,0% (904 kg ha⁻¹), 15,3% (471 kg ha⁻¹) e 14,6% (333 kg ha⁻¹), respectivamente (Tabelas 3 e 4). Quando somente as sucessões com nabo forrageiro foram comparadas, não houve

diferença significativa para porcentagem de fitomassa decomposta (Tabela 4). O nabo forrageiro apresentou precocidade e boa cobertura do solo, resultado que coincide com o de Balbinot JR (2004) que relatou que plantas de nabo forrageiro apresentaram rápido acúmulo de massa e elevada cobertura do solo desde o início do ciclo de desenvolvimento. O nabo apresentou um comportamento intermediário ao da aveia preta e ervilhaca com relação à decomposição, resultado semelhante ao encontrado por Aita e Giacomini (2003).

Quando os resíduos culturais de inverno foram comparados entre si, considerando cada uma das culturas sucessoras (feijão, milho e soja), nas parcelas com o feijão em sucessão aos resíduos de inverno, houve diferença significativa para decomposição, obedecendo a seguinte sequência: Er (88,8%) \geq Nb (82,0%) \geq Ap (77,5%) (Tabela 4). Nas parcelas com o milho em sucessão aos resíduos de inverno, as diferenças na decomposição foram: Er (92,0%) \geq Nb (84,7%) \geq Ap (79,7%). Nas parcelas com a soja em sucessão aos resíduos de inverno, a diferença para decomposição foi: Er (93,0%) \geq Nb (85,4%) \geq Ap (78,7%) (tabela 4).

A ordem decrescente nas taxas de decomposição das culturas de inverno independente da cultura sucessora no verão foi: ervilhaca (91,2%) > Nabo forrageiro (84,1%) = aveia preta (78,6%) (Tabela 4). Este resultado corrobora com os resultados reportados por Aita e Giacomini (2003), Balbinot Jr. (2004), Kliemann et al. (2006), Calegari et al.(2008) em condições semelhantes.

Esses resultados indicam dois efeitos importantes para o entendimento de sistemas de sucessão e rotação de culturas no plantio direto: a) em anos com períodos de estiagem durante o desenvolvimento das culturas de inverno para cobertura do solo, a quantidade de resíduos culturais da cultura antecessora de verão é essencial para garantir um maior armazenamento de água no solo; b) a taxa de decomposição das

culturas de inverno não foi afetada pela cultura sucessora, indicando que o que realmente influencia na decomposição é a composição química de cada resíduo. Dessa forma, rotação de culturas envolvendo culturas de baixa e elevada relação C:N terá um comportamento mais estável na manutenção da cobertura do solo, garantindo os melhores benefícios do sistema de plantio direto.

Dinâmica da decomposição dos resíduos culturais das espécies de verão

Os resíduos culturais de verão apresentaram decomposição mais lenta quando comparados aos resíduos culturais de inverno. Este fato está mais associado às condições de temperaturas mais amenas e precipitações menos intensas durante o período outono/inverno do que propriamente à composição dos materiais. A taxa de decomposição variou de 0,12% dia⁻¹ para o milho na sucessão aveia preta-milho (Ap-M) a 0,35% dia⁻¹ para o feijão nas sucessões ervilhaca-feijão (Er-F) e nabo forrageiro-feijão (Nb-F) da fitomassa inicial (Tabelas 5). O remanescente dos resíduos de milho foi o maior, seguido pelo remanescente dos resíduos de soja, e o menor remanescente foi para os resíduos de feijão (Tabela 5). Os remanescentes situaram-se entre 8661 kg ha⁻¹ para o resíduo de milho na sucessão aveia preta-milho e 1701 kg ha⁻¹ para o resíduo de feijão na sucessão ervilhaca-feijão.

Tabela 5. Produção total de fitomassa seca das culturas de verão, fitomassa decomposta e resmanescente após 175 dias e taxa de decomposição.

Sucessão de culturas [†]	Resíduo cultural avaliado [‡]	Fitomassa			Taxa de decomposição	
		produzida	decomposta	remanescente	kg ha ⁻¹ dia ⁻¹	% dia ⁻¹ ^{††}
M/ Ap-F	F	4960 ^(±287)	1576	3384	9,0	0,18 ^(±0,05)
M/ Er-F	F	4396 ^(±530)	2695	1701	15,4	0,35 ^(±0,03)
M/ Nb-F	F	4452 ^(±395)	2716	1736	15,5	0,35 ^(±0,03)
S/ Ap-M	M	10859 ^(±842)	2197	8661	12,6	0,12 ^(±0,04)
S/ Er-M	M	9678 ^(±990)	4022	5655	23,0	0,24 ^(±0,03)
S/ Nb-M	M	10761 ^(±614)	3870	6890	22,1	0,21 ^(±0,03)
F/ Ap-S	S	7402 ^(±821)	1812	5591	10,4	0,14 ^(±0,04)
F/ Er-S	S	8486 ^(±375)	3602	4885	20,6	0,24 ^(±0,01)
F/ Nb-S	S	8202 ^(±705)	3843	4359	22,0	0,27 ^(±0,02)

[†] Sucessão de culturas (em negrito período do presente estudo e antes da barra representa a cultura de verão que antecedeu o período do presente estudo): Milho/**Aveia preta-Feijão** (M/**Ap-F**); Milho/**Ervilhaca-Feijão** (M/**Er-F**); Milho/**Nabo forrageiro-feijão** (M/**Nb/F**); Soja/**Aveia preta-Milho** (S/**Ap-M**); Soja/**Ervilhaca-Milho** (S/**Er-M**); Soja/**Nabo forrageiro-Milho** (S/**Nb/M**); Feijão/**Aveia preta-Soja** (F/**Ap-S**); Feijão/**Ervilhaca-Soja** (F/**Er-S**); Feijão/**Nabo forrageiro-Soja** (F/**Nb-S**)

[‡] Resíduo cultural avaliado: Feijão (F); Milho (M) e Soja (S)

^{††} Desvio Padrão da média (±)

A decomposição diária do resíduo de feijão na sucessão aveia preta-feijão (Ap-F) foi de 9,0 kg ha⁻¹ dia⁻¹ (0,18% dia⁻¹) de fitomassa (Tabela 5), restando aos 175 dias 68,2% (3384 kg ha⁻¹) da fitomassa inicial (Tabelas 5 e 6).

A decomposição do resíduo de feijão na sucessão ervilhaca-feijão (Er-F) foi um pouco mais intensa, sendo 0,35% a taxa diária (15,4 kg ha⁻¹ dia⁻¹) (Tabela 5), restando ao final do 175º dia 38,7% (1701 kg ha⁻¹) (Tabelas 5 e 6). Isto indica que a sucessão de duas leguminosas fixadoras de nitrogênio pode ter intensificado a atividade da biomassa microbiana e acelerado o processo de decomposição, conforme já evidenciado por outros autores (Calegari, 1993; Torres et al., 2005, Kliemann et al., 2006). O resíduo de feijão na sucessão nabo forrageiro-feijão (Nb-F) apresentou resultado semelhante, sendo 0,35% a média diária de decomposição (15,5 kg ha⁻¹ dia⁻¹) (Tabela 5) e após 175 dias restavam 1736 kg ha⁻¹, correspondendo à 39,0% do resíduo inicial (Tabelas 5 e 6). Quando somente os tratamentos com resíduo de feijão foram comparados, o resíduo de feijão na sucessão Ap-F foi significativamente diferente dos demais tratamentos,

mostrando menor decomposição (31,8%) e maior remanescente (68,2%) (Tabela 6). Este resultado se justifica, pois na safra de verão 2005/06, anterior ao período do presente estudo, havia a cultura do milho nesta parcela, que deixou sobre o solo grande quantidade de resíduos de alta relação C:N e que foram sobrepostos pelos resíduos da aveia preta, que também apresentou boa produção de fitomassa e alta relação C:N; então, quando os resíduos do feijão foram depositados sobre os resíduos da aveia, mesmo sendo o feijão uma leguminosa de baixa relação C:N, a soma dos materiais depositados não permitiu que o resíduo do feijão fosse rapidamente decomposto.

Tabela 6. Porcentagem de fitomassa seca decomposta dos resíduos culturais de verão após 175 dias do início da decomposição. Comparação entre os resíduos culturais de verão para cada cultura antecessora e a média (na coluna) e, comparação de cada resíduo entre as culturas antecessoras (na linha), média de quatro repetições.

Resíduos culturais	Fitomassa decomposta (%)			
	Aveia preta	Ervilhaca	Nabo forrageiro	Média
Feijão	31,8 B	61,3 aA	61,0 aA	50,9 a
Milho	20,2 B	41,6 bA	36,0 cA	33,2 c
Soja	24,5 B	42,4 bA	47,0 bA	39,5 b

Letras minúsculas na coluna e maiúsculas na linha não diferem significativamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A decomposição do milho é mais lenta que a do feijão em função da composição química do material. A decomposição do milho foi de 12,6, 23,0 e 22,1 kg ha⁻¹ dia⁻¹ (0,12, 0,24 e 0,21% dia⁻¹) nas sucessões aveia preta-milho (Ap-M), ervilhaca-milho (Er-M) e nabo forrageiro-milho (Nb-M), respectivamente (Tabela 5). Restando nestas condições 79,8% (8661 kg ha⁻¹), 58,4% (5655 kg ha⁻¹) e 64,0% 6890 kg ha⁻¹) da fitomassa seca produzida, respectivamente (Tabelas 5 e 6). Resultados semelhantes foram encontrados para milho por Gonçalves et al. (2008). Quando somente os tratamentos com resíduos de milho foram comparados, o resíduo de milho na sucessão Ap-M foi significativamente diferente dos demais, apresentando a menor decomposição (20,2%) e a maior fitomassa seca remanescente (79,8%) (Tabela 6).

A taxa de decomposição da soja nas sucessões aveia preta-soja (Ap-S), ervilhaca-soja (Er-S) e nabo forrageiro-soja (Nb-S) foi de 10,4, 20,6 e 22,0 kg ha⁻¹ dia⁻¹ (0,14, 0,24, 0,27% dia⁻¹) da fitomassa seca produzida, respectivamente (Tabela 5). Após 175 dias restaram 75,5, 57,6 e 53,0%, correspondendo à 5591, 4885 e 4359 kg ha⁻¹, nas sucessões Ap-S, Er-S e Nb-S, respectivamente (Tabelas 5 e 6). Quando somente os tratamentos com resíduos de soja foram comparados, o resíduo de soja na sucessão Ap-S apresentou menor decomposição (24,5%) e maior fitomassa seca remanescente (75,5%) em relação aos demais tratamentos (Tabela 6).

Quando os resíduos culturais de verão foram comparados entre si, considerando cada uma das culturas antecessoras (aveia preta, ervilhaca e nabo forrageiro), nas parcelas com a aveia preta antecedendo os resíduos de verão não houve diferença significativa para porcentagem de decomposição (Tabela 6). Nas parcelas com a ervilhaca antecedendo os resíduos de verão, houve diferença significativa para decomposição, conforme a sequência: F (61,3%) > S (42,4%) = M (41,6%) e nas parcelas com o nabo forrageiro antecedendo os resíduos de verão, a sequência para decomposição foi: F (61,0%) > S (46,9%) > M (36,0%) (Tabela 6). Isso indica que em condições de acúmulo de resíduo com relação C:N elevada, ocorrerá uma redução na disponibilidade de N. Em consequência, a eficiência dos microorganismos decompositores tende a diminuir quando aumenta a complexidade dos substratos e quando o N torna-se limitante (Six et al., 2006). Nesse caso, a leguminosa terá maior poder de competição com a gramínea para a decomposição, devido à capacidade desta em suprir parte ou totalmente sua necessidade de N através da fixação simbiótica (Ceretta et al., 2002).

Quando comparadas as médias dos resíduos culturais de verão, sem considerar as culturas antecessoras de inverno, o feijão apresentou a maior decomposição, seguido

pela soja, e o milho apresentou a menor decomposição: F (50,9%) > S (39,5%) > M (33,2%) (Tabela 6).

Meia-vida dos resíduos culturais

A meia-vida dos resíduos culturais apresentou a seguinte ordem decrescente em dias: milho (173) > soja (116) > feijão (87) > aveia preta (69) = nabo forrageiro (69) > ervilhaca (46) (Tabela 7).

Tabela 7. Coeficientes da equação de regressão da decomposição dos resíduos culturais $Q = Q_0 \exp^{-kt}$ (Wieder e Lang, 1982), coeficiente de determinação (R^2) e meia-vida dos materiais ($t_{1/2} = 0,693/k$)

Resíduos culturais	Q_0 kg ha ⁻¹	k	R^2	$t_{1/2}$
Ervilhaca	2182	0,015	0,95	46
Nabo forrageiro	2611	0,010	0,92	69
Aveia preta	3642	0,010	0,95	69
Feijão	4287	0,008	0,96	87
Soja	7795	0,006	0,98	116
Milho	10126	0,004	0,98	173

Para os resíduos culturais de inverno, a cinética da decomposição apresentou um comportamento cuja fase inicial teve um decaimento acentuado seguida de outra mais lenta. Após 70 dias da colocação das BD nas parcelas ainda restavam 48,5% da fitomassa inicial da aveia preta, enquanto para a ervilhaca constatou-se 25,4%, confirmando os resultados reportados em outros estudos, nos quais a taxa de decomposição das leguminosas superou a das gramíneas (Da Ros, 1993; Ranells & Wagger, 1996; Aita & Giacomini, 2003).

Em contraste, a cinética da decomposição dos resíduos culturais das espécies de verão teve um comportamento cujo decaimento foi mais lento e gradual, sem apresentar velocidade inicial destacada. Aos 175 dias de decomposição o resíduo do milho perdeu 33% de fitomassa, contrastando com a perda de 49% aos 149 dias e de 56% aos 150

dias encontradas por Wisniewski & Holtz (1997) e Kliemann et al. (2006), respectivamente. Wisniewski e Holtz (1997) continuaram a análise da decomposição dos resíduos de milho até completar 370 dias e observaram que aos 191 dias a perda atingiu 73,5% e ao final dos 370 dias de 85%. Eles reportaram que entre 149 e 191 dias ocorreu a perda de 50% do material remanescente. Kliemann et al. (2006) também projetaram a curva de decomposição de 150 para 360 dias e encontraram uma perda de 86%, com tendência de equilíbrio após 360 dias. Isto mostra que na entrada do período da primavera/verão, com o aumento das precipitações e temperaturas ocorre um pico no processo de decomposição dos materiais depositados sobre o solo, seja para as culturas de cobertura de inverno, recém manejadas, ou para os remanescentes dos cultivos do verão anterior. Teixeira Neto (2002), trabalhando em região tropical reportou a taxa de 66% aos 180 dias para resíduos consorciados (milho + braquiária) e 77% para o resíduo de milho não consorciado. Isto indica que a taxa de decomposição, neste caso, foi mais influenciada pela elevada temperatura e precipitação do que pela composição química do resíduo. Mesmo assim, o remanescente destas espécies foi elevado, confirmando a importância da natureza dos constituintes das espécies.

Considerando a elevada porcentagem de resíduo remanescente das culturas de verão, principalmente o milho e a soja, seria recomendável estender o período de avaliação destes resíduos para pelo menos um ano, visando obter valores de meia-vida mais ajustados.

Conclusões

A taxa de decomposição dos resíduos culturais de inverno foi de 0,44 para a aveia preta, 0,48 para o nabo forrageiro e 0,53% dia⁻¹ para a ervilhaca, enquanto para os resíduos culturais de verão foi de 0,19 para o milho, 0,23 para a soja e 0,29% dia⁻¹ para

o feijão. Constatou-se que a cultura sucessora não interferiu no processo de decomposição dos resíduos culturais, porém, a cultura antecessora influenciou a taxa de decomposição em função da sobreposição de resíduos com diferente qualidade e quantidade. A meia vida para os resíduos de milho de 173 dias evidencia a importância de sua inclusão na rotação de culturais por proporcionar grande aporte de matéria orgânica com decomposição lenta e gradual, enquanto que a meia vida para os resíduos da ervilhaca de 46 dias evidencia que leguminosas fixadoras de nitrogênio imprimem maior velocidade ao processo de decomposição.

Agradecimentos

À Fundação Agrisus pelo apoio financeiro para o desenvolvimento deste estudo.

Referências Bibliográficas

- ACOSTA-MARTÍNEZ, V., ZOBECK, T.M., GILL, T.E. & A.C. KENNEDY, A.C. Enzyme activities and microbial community structure in semiarid agricultural soils. *Biol. Fertil. Soils*, 38:216–227, 2003.
- AITA, C. & GIACOMINI, S.J. Decomposição e liberação de nitrogênio de resíduos culturais de plantas de cobertura de solo solteiras e consorciadas. *R. Bras. Ci. Solo*, 27:601-612, 2003.
- ALVARENGA, R.C.; CABEZAS, W.A.J.; CRUZ, J.C. & SANTANA, D.P. Plantas de cobertura de solo para sistema plantio direto. *Informe Agropecuário*, Belo Horizonte, v.22, n.208, p.25-36, jan/fev, 2001.
- AMADO, T.J.C.; BAYER, C.; ELTZ, F.L.F. & BRUM, A.C.R. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. *R. Bras. C. Solo*, 25: 189-197, 2001.
- BALBINOT JR., A.A.; BACKES, R.L. & TÔRRES, A.N.L. Desempenho de plantas invernais na produção de massa e cobertura do solo sob cultivos isolado e em consórcio. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, Lages, v. 3, n.1, p.38-42, 2004.
- BEARE, M.H.; PARMELEE, R.W.; HENDRIX, P.F.; CHENG, W.; COLEMAN, D.C. & GROSSLEY JR, D.A. Microbial and faunal interactions and effects on litter nitrogen and decomposition in agroecosystems. *Ecol. Monogr.* 62:569–591, 1992.
- BERTOL, I.; CIPRANDI, O.; KURTZ, C. & BAPTISTA, A. S. Persistência dos resíduos de aveia e milho sobre a superfície do solo em semeadura direta. *R. Bras. Ci. Solo*, 22:705-712, 1998.

- BOSSUYT, H., DENEFF, K., SIX, J., FREY, S.D., MERCKX, R. & PAUSTIAN, K. Influence of microbial populations and residue quality on aggregate stability. *Appl. Soil Ecol.*, 16:195–208, 2001.
- CALEGARI, A.; MONDARDO, A.; BULISANI, E.A.; WILDNER, L.P.; COSTA, M.B.B.; ALCÂNTARA, P.B.; MIYASKA, S. & AMADO, T.J.C. Adubação verde no sul do Brasil. 2 ed. Rio de Janeiro, AS-PTA, 1993. 346p.
- CALEGARI, A.; HARGROVE, W.L.; RHEINHEIMER, D.S.; RALISCH, R.; DANIEL TESSIER, D.; TOURDONNET, S. & GUIMARÃES, M.F. Impact of long-term no-tillage and cropping system management on soil organic carbon in an Oxisol: a model for sustainability. *Agronomy Journal*, 100: 1013-1019, 2008.
- CERETTA, C.A.; BASSO, C.J.; HERBES, M.G.; POLETTO, N. & SILVEIRA, M.J. da. Produção e decomposição de fitomassa de plantas invernais de cobertura de solo e milho, sob diferentes manejos da adubação nitrogenada. *Ciência Rural*, Santa Maria, 32:49-54, 2002.
- CORTEZ, J. Field decomposition of leaf litters: relationships between decomposition rates and soil moisture, soil temperature and earthworm activity. *Soil Biol. Biochem.*, 30:783-793, 1998.
- CORTEZ, J.; DEMARD, J.M.; BOTTNER, P & JOCTEUR MONROZIER, L. Decomposition of mediterranean leaf litters: a microcosm experiment investigating relationships between decomposition rates and litter quality. *Soil Biology and Biochemistry*, 28:443-452, 1996.
- CRUZ, L.E.C.; PILLON, C.N.; GIACOMINI, S.J.; SCIVITTARO, W.B.; LIMA, C.L.R. & FERREIRA, L. H.G. Dinâmica da decomposição e liberação de nitrogênio de resíduos culturais por meio de indicadores químicos em ambiente de terras baixas. *Rev. Bras. de Agroecologia*, 2:669-672, 2007.
- DA ROS, C.O. Plantas de inverno para cobertura do solo e fornecimento de nitrogênio ao milho em plantio direto. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 1993. 85p. (Tese de Mestrado)
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Manual de métodos de análise do solo. 2 Ed. Rio de Janeiro, RJ, 1997. p. 212.
- FREY, S.D., ELLIOTT, E.T. & PAUSTIAN, K. Bacterial and fungal abundance and biomass in conventional and no-tillage agroecosystems along two climatic gradients. *Soil Biol. Biochem.* 31:573–585, 1999.
- GONÇALVES, S.L.; SARAIVA, O.F.; FRANCHINI, J.C. Decomposição de resíduos de culturas anuais em semeadura direta e convencional. In: FERTIBIO, Londrina, 2008. Anais. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo.
- HOLLAND, E.A. & COLEMAN, D.C. Temperature and plant species control over litter decomposition in Alaskan tundra. *Ecological Monographs*, 66:503-522, 1987.
- IAPAR - Instituto Agronômico do Paraná. Dados climáticos. Londrina, PR, 1998.
- KLIEMANN, H. J.; BRAZ, A. J.P.B. & SILVEIRA, P.M. da. Taxas de decomposição de resíduos de espécies de cobertura em Latossolo Vermelho Distróférrico. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 36 (1): 21-28, 2006.
- LORENZ, K.; LAL, R.; PRESTON, C.M. & NIEROP, K.G.J. Strengthening the soil organic carbon pool by increasing contributions from recalcitrant aliphatic bio(macro)molecules. *Geoderma* 142:1–10, 2007.
- LUPWAYI, N.Z., RICE, W.A. & CLAYTON, G.W. Soil microbial biomass and carbon dioxide flux under wheat as influenced by tillage and crop rotation. *Can. J. Soil Sci.*, 79:273–280, 1999.

- MAACK, R. Geografia Física do Paraná. 2nd ed. Rio de Janeiro, Livraria José Olímpio Editora S.A., 1981. 355p.
- MONEGAT, C. Plantas de cobertura de solo: características e manejo em pequenas propriedades. Chapecó-SC, Ed. do Autor, 1991. 337p.
- PAVAN, M.A.; BLOCH, M.F.; ZEMPULSKI, H.C.; MIYAZAWA, M. & ZOCOLER, P.C. Manual de análise química do solo e controle de qualidade. Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), 1992. 38p. (Circular 76).
- PELÁ, A.; SILVA, M.S.; DA COSTA, L.A.; DA SILVA, C.J.; ZUCARELI, C.; DECARLI, L.D. & MATTER, U.F. Avaliação da resistência à decomposição de dez espécies de plantas de cobertura visando o plantio direto. Revista Plantio Direto, 53 (1): 26-33, 1999.
- PAUL, E.A. & CLARK, F.E. Soil microbiology and biochemistry. San Diego, Academic Press, 1989. 275p.
- RANELLS, N.N. & WAGGER, M.G. Nitrogen release grass and legume cover crop monocultures and bicultures. Agron. J., 88:777-782, 1996.
- ROBERSON, E.B.; SARIG, S.; SHENNAN, C. & FIRESTONE, M.K. Nutritional management of microbial polysaccharide production and aggregation in an agricultural soil. Soil Sci. Soc. Am. J., v.59:1587-159, 1995.
- SÁ, J.C.M.; CERRI, C.C.; LAL, R.; DICK, W.A.; VENZKE FILHO, S.P.; PICCOLO, M. & FEIGL, B. Organic matter dynamics and sequestration rates for a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. Soil Sci. Soc. Am. J., 65:1486-1499, 2001.
- SIX, J.; Frey, S.D.; THIET, R.K. & BATTEN, K.M. Bacterial and fungal contributions to carbon sequestration in agroecosystems. Soil Sci. Soc. Am. J., 70: 555-569, 2006.
- TEIXEIRA NETO, M.L. Efeito de espécies vegetais para cobertura, no sistema plantio direto na região dos cerrados, sobre as propriedades do solo. Dissertação de Mestrado. Escola de Agronomia e Engenharia de Alimentos, Universidade Federal de Goiás, Goiânia, 151 p., 2002.
- THOMAS, R.J. & ASAKAWA, N.M. Decomposition of leaf litter from tropical forage grasses and legumes. Soil Biology and Biochemistry, 25:1351-1361, 1993.
- TORRES, J.L.R.; PEREIRA, M.G.; ANDRIOLI, I.; POLIDORO, J.C. & FABIAN, A.J. Decomposição e liberação de nitrogênio de resíduos culturais de plantas de cobertura em um solo de Cerrado. R. Bras. Ci. Solo, 29:609-618, 2005
- WIEDER, R.K. & LANG, G. E. A critique of the analytical methods used in examining decomposition data obtained from litter bags. Ecology, 63 (6): 1636-1642, 1982.
- WISNIEWSKI, C. & HOLTZ, G.P. Decomposição da palhada e liberação de nitrogênio e fósforo numa rotação aveia-soja sob plantio direto. Pesquisa Agropecuária Brasileira, 32 (11): 1191-1197, 1997.

7. ALTERAÇÕES NO CARBONO LÁBIL DEVIDO A DECOMPOSIÇÃO DE RESÍDUOS CULTURAIS EM UM LATOSSOLO VERMELHO SOB PLANTIO DIRETO DE LONGA DURAÇÃO¹

Lutécia Beatriz dos Santos Canalli²; João Carlos de Moraes Sá³; Aníbal de Moraes⁴; Roberto Simão de Carli⁵; Lúcio Scherekenberg Elias⁵; Erielton Aparecido Pupo Antunes⁵; Marielle Letícia Romko⁵; Josiane Bürkner dos Santos⁶; Clever Briedis⁷; Ademir de Oliveira Ferreira⁸

Resumo - A quantidade e a natureza dos compostos orgânicos dos resíduos culturais (RC) adicionados à superfície do solo no sistema plantio direto alteram os compartimentos da matéria orgânica do solo (MOS) e o estoque de carbono de orgânico total (COT). O objetivo deste estudo foi avaliar a dinâmica da decomposição de culturas de inverno (aveia preta, ervilhaca e nabo forrageiro) e de verão (milho, feijão e soja) e sua contribuição para o aporte de COT na matéria orgânica lábil num Latossolo Vermelho sob plantio direto. Os parâmetros analisados nos resíduos culturais foram: conteúdo de carbono (C), nitrogênio (N), lignina, celulose, carboidratos solúveis, índice ligno-celulósico (ILC), quociente holocelulose-lignocelulose (HLQ) e o índice de decomponibilidade (ID). No solo foram determinadas as quantidades totais e a evolução do estoque de C e N na matéria orgânica lábil (fração > 53 µm). O conteúdo de lignina associado ao conteúdo de nitrogênio foi o fator preponderante no controle da taxa de decomposição dos resíduos. O conteúdo de nitrogênio e carboidratos solúveis foi determinante para a velocidade do processo de decomposição e conversão de C dos resíduos culturais para o estoque de C lábil no solo. Os índices de qualidade dos resíduos culturais que envolvem a lignina, o nitrogênio e os carboidratos solúveis,

representados pela relação lignina/nitrogênio, ILC, HLQ e ID foram os mais sensíveis para explicar a decomposição dos resíduos culturais estudados. O valor médio da contribuição do C oriundo dos RC para o estoque de C-lábil do solo independente das sucessões foi de 31,3%. As sucessões Aveia preta-Feijão e Ervilhaca-Feijão proporcionaram as maiores taxas de conversão do C dos resíduos culturais em COT (47,3% e 41,1%, respectivamente), em contraste, a sucessão Nabo forrageiro-Feijão resultou na menor taxa de conversão (10,3%). A faixa de variação no estoque de C na fração lábil afetada pelas sucessões foi de 0,27 a 0,91 Mg ha⁻¹ e a contribuição média das sucessões foi de 0,70 Mg ha⁻¹. A sucessão Aveia preta-Feijão promoveu a maior contribuição para o estoque de C na fração lábil, enquanto a sucessão Nabo forrageiro-Feijão teve a menor contribuição.

Palavras-chave: decomposição dos resíduos culturais, índices de qualidade dos resíduos culturais, taxa de conversão de C, estoque de C no solo.

LABILE CARBON CHANGES DUE TO DECOMPOSITION OF CROP RESIDUES IN A BRAZILIAN OXISOL UNDER LONG-TERM NO-TILLAGE

Abstract - The amount and nature of organic compounds of crop residues added to the soil surface under no-tillage change the soil organic matter (SOM) pools and carbon stock. The objective of this study was to evaluate the dynamics of decomposition of winter crops (black oat, vetch and radish) and summer (maize, bean and soybean) and their contribution for the labile organic matter in an Oxisol under no-tillage. The parameters analyzed in the crop residues were: content of carbon (C), nitrogen (N), lignin, cellulose, soluble carbohydrates, ligno-cellulose index (ILC), holocellulose-lignocellulose quotient (HLQ) and decomposition index (ID). In the whole soil were

determined the total amounts and the evolution of the stock of C and N in labile organic matter (> 53 m). The lignin content associated with the content of nitrogen was the most important factor in controlling the crop residues decay rate. The nitrogen and soluble carbohydrates content was crucial to increase the decomposition process and conversion of C residues into soil C stock. Among the crop residues quality index, those involving lignin, nitrogen and soluble carbohydrates (ratio lignin / nitrogen, ILC, HLQ, ID) were sensitive to express the crop residues decomposition studied. The highest conversion rates were presented by the black oat-bean (47.3%) and vetch-bean (41,1%). The average of C conversion from RC for the labile C in soil, was 31.3%. The labile C stock ranged from 0.27 to 0.91 Mg ha⁻¹ and the average was 0.70 Mg ha⁻¹. The succession black oat-bean provided the greatest contribution to the labile C stock, while the succession radish-bean had the lowest contribution.

Key words: crop residues decomposition, crop residues quality, C conversion ratio, C stock in the soil.

Introdução

A velocidade de decomposição das espécies está estreitamente relacionada à composição de cada espécie e as condições climáticas da região. A severidade na perda de carbono na forma de CO₂ devido à oxidação da matéria orgânica do solo (MOS) é maior em ambientes sob clima tropical e subtropical e pode ser 5 a 10 vezes superior às regiões sob clima temperado (Lal e Logan, 1995).

A dinâmica da matéria orgânica em solos agrícolas é determinada pela diferença entre as quantidades de carbono aportadas e perdidas (Dalal e Mayer, 1986) e é diretamente afetada pelo manejo do solo e pela rotação de culturas adotada. A decomposição lenta e gradual dos resíduos culturais libera compostos orgânicos que

estimulam a formação e a estabilidade de agregados (Tisdall e Oades, 1982; Six et al., 2002). Em consequência, a matéria orgânica do solo fica menos exposta aos processos microbianos, reduzindo a taxa de mineralização e resultando em menor fluxo de CO₂ para a atmosfera (Reicosky, 1995). Dessa forma o solo torna-se um dreno de CO₂ atmosférico quando as adições de C são maiores que as perdas por oxidação.

Dieckow et al. (2005) reportaram que a matéria orgânica particulada, fração derivada diretamente dos resíduos de plantas, em solos da região subtropical foi significativamente afetada pelo manejo do solo e pelas diferentes combinações de culturas. Outros estudos mostram que alterações nas características da matéria orgânica particulada ocorrem quando a vegetação é mudada (Oades et al., 1988; Golchin et al., 1995a). Estes autores afirmam ainda que sistemas de culturas não afetam a qualidade da matéria orgânica associada aos minerais de argila porque essa fração da MO é oriunda principalmente de produtos microbianos, independente da quantidade e natureza dos resíduos de planta adicionados.

Recentemente, Sá e Lal (2009) constataram aumento significativo nas frações lábeis da MOS com o passar do tempo em plantio direto em um Oxisol. Além disso, afirmaram que essa fração é indicadora de qualidade da camada superficial do solo e é alterada em função da sucessão ou rotação de culturas.

A rotação de culturas afeta a biomassa microbiana, sua atividade e a relação fungos/bactérias (Six et al., 2006). Solos sob rotação de culturas apresentaram aumento da atividade enzimática (Acosta-Martínez et al., 2003) e aumentaram o sequestro de C quando comparados com solos sob monoculturas ou rotações que incluem pousio (Paustian et al., 1997; Rasmussen et al., 1998; Bayer et al., 2000; Sá et al., 2001; Kong et al., 2005; Amado et al., 2006; Calegari et al., 2008). A eficiência dos microorganismos decompositores tende a diminuir quando aumenta a complexidade dos

substratos e quando o N torna-se limitante. Roberson et al. (1995) sugeriram que o suprimento de N, mais que o suprimento de C, controla o efeito de culturas de cobertura sobre o conteúdo de carboidratos do solo. Vários autores têm reportado a enorme contribuição do aporte de N pelas leguminosas introduzidas no sistema de produção para o seqüestro de C (Bayer et al., 2000; Amado et al., 2001; Aita e Giacomini, 2003; Six et al., 2004; Amado et al., 2006; Calegari et al., 2008).

Mudanças na composição dos resíduos culturais provocam alterações na taxa de decomposição, pois alteram o conteúdo de N, lignina e polifenóis e estes por sua vez alteram as relações entre os constituintes orgânicos (C:N, Lignina/N, Lignina + polifenóis:N) (Wieder e Lang, 1982; Reinertsen et al., 1984; trinsoutrot et al., 2000) e os índices de qualidade dos resíduos (índice ligno-celulósico, quociente holocelulose lignocelulose ou suscetibilidade à decomposição e o índice de decomponibilidade ou resistência à decomposição (Cortez et al., 1996), os quais pela dinâmica do envolvimento de diferentes constituintes explicam melhor a decomposição dos resíduos culturais.

A biomassa de fungos compreende a maior parte da biomassa microbiana em ecossistemas naturais e em sistemas agrícolas sob plantio direto (Beare et al., 1992; Holland and Coleman, 1987; Frey et al., 1999) e conseqüentemente isto leva a um aumento quantitativo e qualitativo da matéria orgânica do solo. Portanto, o aumento da biomassa de fungos sob plantio direto não somente leva a um aumento da matéria orgânica microbiana (MOM), mas também pode afetar a acumulação de C derivado de resíduos de plantas (matéria orgânica particulada - MOP) (Six et al., 2006).

Assim, é importante conhecer as espécies utilizadas no sistema de rotação, sua dinâmica de decomposição após manejo ou colheita, a contribuição de carbono de cada uma delas e a conversão de C para o solo, para que possamos entender a dinâmica do

processo de transformação dos resíduos culturais, bem como sua contribuição para a melhoria das condições físico-química e biológica do solo e sua capacidade de retenção de carbono, como importante fator na redução da emissão de gases do efeito estufa. O presente estudo foi realizado com o objetivo de avaliar a dinâmica do processo de decomposição das culturas de aveia preta, ervilhaca, nabo forrageiro, feijão, soja e milho em função da qualidade dos resíduos, bem como a taxa de conversão de carbono destes resíduos para os estoques de carbono orgânico lábil no solo.

Material e métodos

O presente estudo foi realizado na Estação Experimental da Fundação ABC, localizada no município de Ponta Grossa, estado do Paraná, situada geograficamente a 25°00' de Latitude Sul e 50°09' de Longitude Oeste, com altitude aproximada de 975 m. O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen, é do tipo Cfb, subtropical úmido, com temperatura média anual de 18°C e precipitação média anual de, aproximadamente, 1550 mm. A tabela 1 apresenta a distribuição anual da temperatura e pluviosidade históricas da região (Iapar, 1998) e as ocorridas durante o período do experimento (out/2006 a nov/2007).

Tabela 1. Média mensal da precipitação pluviométrica, temperatura máxima (T máxima) e temperatura mínima (T mínima) para o período de 44 anos (média histórica) e durante o período do experimento (out/06 à set/07).

Descrição	Meses												Média
Média histórica†	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
Pluviosidade	188	155	136	105	118	115	95	80	134	149	120	150	128.8
T máxima	28	27	26	24	22	20	20	22	23	24	26	27	24.1
T mínima	17	17	16	14	11	9	9	10	12	14	15	16	13.3
Período do Experimento††	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	
Pluviosidade	75	195	155	262	163	126	75	170	4	138	21	34	118.2
T máxima	27	28	30	29	30	32	28	23	25	21	24	28	27.1
T mínima	16	16	19	19	19	18	16	10	10	8	11	14	14.7

† Média histórica para o período de 44 anos, de janeiro à dezembro

†† Dados para o período do experimento (out/06 à set/07)

Fonte: IAPAR, estação meteorológica de Ponta Grossa.

O solo foi classificado como Latossolo Vermelho Distrófico típico, textura argilosa, profundo, muito bem estruturado e drenado, derivado de material retrabalhado de arenitos da formação Furnas e folhelhos da formação Ponta Grossa, ambos sedimentos do período Devoniano. A composição florística natural da região, denominada Campos Gerais, caracteriza-se pela presença de gramíneas baixas, desprovidas de arbustos, ocorrendo apenas matos ou capões situados nas depressões em torno das nascentes (Maack, 1981). O relevo é suavemente ondulado com pendentes entre 2 a 7% de declividade.

Histórico e caracterização da área experimental

As avaliações do presente estudo foram feitas em um experimento sob plantio direto há longo período (18 anos), onde é avaliada anualmente a produção de palha de dez espécies de culturas de cobertura de inverno (aveia preta, aveia branca, azevém,

ervilhaca, nabo forrageiro, centeio, triticale, canola, tremoço branco, tremoço azul) e as produtividades das culturas de verão (feijão, soja e milho). Em 1989 foi realizada a análise do solo na profundidade de 0 a 20 cm, antes da implantação do experimento original e em outubro de 2006, para a caracterização da fertilidade e textura do solo antes do início das avaliações do presente estudo, foram coletadas em cada parcela três amostras de solo na profundidade de 0-20 cm. As análises químicas foram realizadas conforme Pavan et al. (1992) e a composição granulométrica para a definição da classe textural foi determinada pelo método do densímetro (Embrapa, 1997) (Tabela 2).

Tabela 2. Resultados da análise química do solo antes da implantação do experimento original, em 1989, e resultados da análise química do solo e de textura no início das avaliações do presente estudo, em outubro de 2006, na profundidade de 0-20 cm.

Análise química do solo antes da implantação do experimento, em 1989										
pH	H + Al	Al	Ca	Mg	K	CTC	V	MO	P	
CaCl ₂	-----		cmol _c dm ⁻³		-----		%	g dm ⁻³	mg dm ⁻³	
5,1	5,83	0,13	2,91	2,14	0,33	11,2	46,7	38,5	6,5	
Análise química e de textura no início das avaliações do presente estudo, em outubro de 2006										
pH	H + Al ⁺³	Al ⁺³	Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	CTC	P	Areia	Silte	Argila
CaCl ₂	-----		cmol _c dm ⁻³		-----		mg dm ⁻³	----- g kg ⁻¹ -----		
5,7	4,6	0,1	6,1	3,1	0,6	14,3	10,3	328	223	449

Em abril de 1989 foi efetuada a correção da acidez do solo com a aplicação de 5,6 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico e incorporado a 20 cm com arado de discos seguido de duas gradagens. Posteriormente (90 dias após), foi aplicado 213 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 60,5 kg ha⁻¹ de K₂O à lanço. Após a implantação do sistema plantio direto, a correção da acidez foi realizada a cada dois anos com a aplicação de duas toneladas de calcário à lanço e em superfície, antes do plantio das culturas de cobertura de inverno. O manejo das culturas de cobertura foi realizado com a aplicação de um herbicida de ação sistêmica (glifosate) no estágio de florescimento pleno. Posteriormente foi passado o rolo faca e quando os resíduos culturais estavam completamente secos, foi realizado o plantio das culturas de verão, de acordo com o calendário para cada cultura.

Modelo experimental

O experimento original foi constituído por 10 macroparcelas com as culturas de inverno (aveia preta, aveia branca, azevém, ervilhaca, nabo forrageiro, centeio, triticale, canola, tremçoço branco, tremçoço azul), de dimensão 10 x 50 m, e em sentido perpendicular a estas foram plantadas as culturas de verão (feijão, soja e milho), em macroparcelas de 16,67 x 100 m. O plantio das culturas de inverno é realizado em linhas, entre abril e maio, em função do ciclo das espécies. O plantio das culturas de verão é realizado entre outubro (milho) e novembro (soja e feijão). O sistema de rotação adotado é o de alternância entre gramíneas e leguminosas no inverno e a cada três anos a cultura do milho retorna na mesma área no verão. Portanto, são ciclos de 10 anos para as culturas de inverno e de 3 anos para as culturas de verão.

O modelo experimental do presente estudo consistiu de três macroparcelas com arranjo em parcelas subdivididas. Nas macroparcelas, de dimensão 10 x 50 m, foram semeadas as culturas de cobertura de inverno: aveia preta (*Avena strigosa Schieb*), ervilhaca (*Vicia sativa L.*) e nabo forrageiro (*Raphanus sativus L.*), sendo cada uma destas macroparcelas dividida em três parcelas de 10 x 16,67 m, e sobre os resíduos culturais de inverno foram semeadas as culturas de verão: feijão (*Phaseolus vulgaris L.*), soja (*Glycine max L. Merrill*) e milho (*Zea mays L.*). Nas parcelas foram comparadas as sucessões de culturas: aveia preta-feijão (Ap-F); aveia preta-milho (Ap-M); aveia preta-soja (Ap-S); ervilhaca-feijão (Er-F); ervilhaca-milho (Er-M); ervilhaca-soja (Er-S); nabo forrageiro-feijão (Nb-F); nabo forrageiro-milho (Nb-M) e nabo forrageiro-soja (Nb-S). As subparcelas foram constituídas pelas três épocas de coleta, para a avaliação da decomposição dos resíduos culturais: 0, 25 e 70 dias após o manejo das culturas de cobertura de inverno ou colheita das culturas de verão, com 4 repetições em cada época, e pelos dois tempos de amostragem do solo: no início do experimento,

em outubro de 2006 (t_1) e ao final de doze meses, em outubro de 2007(t_2), com 3 repetições em cada tempo. As amostras de solo foram retiradas na profundidade de 0-10 cm.

Avaliações e análises

A avaliação da decomposição dos resíduos culturais foi realizada de forma qualitativa, através da determinação dos constituintes orgânicos dos resíduos culturais em três épocas durante o período de decomposição.

Para a obtenção de fitomassa seca dos resíduos culturais (RC) de cada espécie foram coletas três amostras com 0,5 m² em cada parcela. Para as culturas de cobertura de inverno a coleta foi feita no estágio de florescimento pleno, antes do manejo das mesmas e para as culturas de verão no estágio de maturação fisiológica. O material foi seco em estufa a 60°C por 72 horas.

A decomposição dos resíduos culturais foi avaliada pelo método das bolsas de decomposição (BD) conforme Thomas & Asakawa (1993). As BD foram confeccionadas com náilon de malha 1 mm de abertura e dimensões de 15 x 15 cm. Em cada parcela foram colocadas doze BD contendo os resíduos culturais correspondentes. As BD foram colocadas abaixo da palha e em contato com o solo, no dia 24/10/2006 para os RC de inverno e no dia 10/05/2007 para os RC de verão, sendo coletados em três épocas: 0 (E_0); 25 (E_1); e 70 (E_3) dias após a colocação em cada parcela, com quatro repetições por época, definidas por sorteio.

O conteúdo de lignina e celulose foi determinado pelo método das fibras em detergente neutro (FDN) e detergente ácido (FDA) conforme Van Soest (1964). O conteúdo de carboidratos solúveis foi determinado de acordo com a metodologia descrita por Johnson et al., 1966. O índice de suscetibilidade a decomposição foi

calculado através do quociente holocelulose/lignocelulose (Cortez et al., 1996). O índice ligno-celulósico foi calculado conforme Melillo et al. (1989). O índice de decomponibilidade foi calculado conforme Hermann et al. (1977), através da expressão: $ID = (C:N) \times (\% \text{ Lignina}) / \sqrt{(\% \text{ carboidratos})}$.

A determinação do carbono orgânico total (COT) e do nitrogênio total (NT) nos resíduos culturais e no solo foi realizada pelo método da combustão seca (Nelson & Sommers, 1982), utilizando um determinador elementar de C e N (TruSpec LECO modelo 2006, St. Joseph, EUA).

O fracionamento granulométrico das amostras de solo foi realizado de acordo com Sá (2001) para obtenção da matéria orgânica lábil (fração > 53 μ m). Foi determinada ainda a densidade do solo (Blake & Hartge, 1986) no início do experimento (t_1) na profundidade de 0-10 cm.

A taxa de conversão do C (TCC) oriundo dos resíduos culturais em carbono orgânico do solo foi obtida com os valores do estoque inicial e final de C no solo e com os valores de C do resíduo decomposto, conforme a equação 1:

$$TCC = (\Delta \text{ Estoque } C_{\text{solo}}) / (C_{\text{RC decomposto}}) \times 100 \quad \text{equação 1}$$

onde: $\Delta \text{ Estoque } C_{\text{solo}}$ é a diferença entre o estoque final (t_2) e inicial (t_1) de C no solo;
 $C_{\text{RC decomposto}}$ é o equivalente ao C do resíduo cultural decomposto (aporte inicial de C – remanescente de C).

Análise estatística

Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), aplicando-se o teste F para identificar as diferenças entre os tratamentos, através do software Statistica. Para os efeitos significativos, foi realizada a comparação de médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade ($p < 0,05$). Para a obtenção das curvas de resposta foi

utilizado o procedimento da análise de regressão pelo programa JMP IN versão 3.2.1 (Sall et al., 2005), utilizando-se o teste F para identificar o nível de significância.

Resultados e Discussão

Conteúdo de C e N e a relação C:N nos resíduos culturais

O conteúdo de C nos resíduos culturais de inverno antes da decomposição (E_0), foi significativamente maior na aveia preta e obedeceu a sequência: Ap (41,6%) > Er (40,1%) > Nb (37,9%) (Tabela 3). Em contraste, o conteúdo de N foi maior na ervilhaca: Er (3,4%) > Nb (2,5%) > Ap (2,0%) (Tabela 3), corroborando com os resultados reportados por Calegari et al. (2008). A relação C:N apresentou diferença significativa conforme a sequência: Ap (21,8) > Nb (15,5) > Er (12,2) (Tabela 3).

Tabela 3. Comparação entre os constituintes orgânicos e índices de qualidade dos resíduos culturais de inverno, antes do início da decomposição (E_0)

Constituintes orgânicos e índices†	Aveia Preta	Ervilhaca	Nabo Forrageiro	Nível de significância
Lignina, %	6,5	6,7	7,1	ns
Celulose, %	29,7 a	24,1 b	30,0 a	0,0001
Hemicelulose, %	32,1 a	16,7 b	13,7 c	0,0001
Holocelulose, %	61,8 a	40,8 b	43,7 b	0,0001
Carboidratos, %	0,3	0,2	0,2	ns
Carbono, %	41,6 a	40,1 b	37,9 c	0,0001
Nitrogênio, %	2,0 c	3,4 a	2,5 b	0,0001
Relação C:N	21,8 a	12,2 c	15,5 b	0,0001
Relação Lignina:N	3,4 a	2,0 b	2,9 ab	0,009
HLQ, %	0,9 a	0,86 b	0,86 b	0,004
ILC, %	0,2	0,2	0,2	ns
ID, %	3,0	1,8	2,8	ns

Tratamentos com letras iguais na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade.

†HLQ= índice de suscetibilidade à decomposição ou quociente holocelulose/lignocelulose; ILC= índice lignocelulósico; Relação C:N= relação carbono:nitrogênio; Relação Lignina:N= relação lignina:nitrogênio; ID= índice de decomponibilidade.

O conteúdo de C e N e a relação C:N interferem no processo de decomposição e refletem diretamente na velocidade de decomposição dos resíduos culturais. O N exerce papel fundamental na estabilização do C como substância húmica através dos compostos aminados que se aloca nos anéis aromáticos durante a humificação (Cortez et al., 1996; Lorenz et al., 2007). Quanto maior a relação C:N, mais lentamente o

resíduo se decompõe (Floss, 2000). Por outro lado, quanto maior o conteúdo de nitrogênio mais rapidamente o resíduo se decompõe (Ceretta et al., 2002). O nitrogênio é utilizado pelos microorganismos do solo, fungos e bactérias, no processo de decomposição dos resíduos culturais. Em função disto, leguminosas, fixadoras de nitrogênio, propiciam um ambiente rico neste nutriente, liberando-o logo após o manejo ou colheita, proporcionando maior velocidade de decomposição dos resíduos culturais (Aita e Giacomini, 2003; Cruz et al., 2007). Podem-se agrupar as espécies em duas classes, uma de decomposição rápida (leguminosas) e outra de decomposição lenta (gramíneas), sendo bem aceito um valor de relação C:N próximo a 25, como referência de separação entre elas (Wieder & Lang 1982).

Nos resíduos culturais de verão, o conteúdo de C foi significativamente superior para o milho (42,2%) > soja (40,3%) = feijão (40,4%) (Tabela 4). Todavia, o conteúdo de N foi significativamente maior no feijão (1,8%) > soja (1,1%) = milho (1,0%) (Tabela 4). A relação C:N apresentou diferença significativa conforme a sequência: milho (45,1) > soja (37,8) > feijão (24,0%) (Tabela 4).

Tabela 4. Comparação entre os constituintes orgânicos e índices de qualidade dos resíduos culturais de verão, antes do início da decomposição (E_0)

Constituintes orgânicos e índices†	Feijão	Milho	Soja	Nível de significância
Lignina, %	8,2	8,6	9,8	ns
Celulose, %	35,0 b	39,2 a	40,7 a	0,0001
Hemicelulose, %	14,4 b	32,5 a	11,9 c	0,0001
Holocelulose, %	49,4 b	71,7 a	52,6 b	0,0001
Carboidratos, %	0,2 a	0,1 b	0,1 b	0,0001
Carbono, %	40,4 b	42,2 a	40,3 b	0,0001
Nitrogênio, %	1,8 a	1,0 b	1,1 b	0,0001
Relação C:N	24,0 c	45,1 a	37,8 b	0,0001
Relação Lignina:N	4,9 b	9,1 a	9,2 a	0,0001
HLQ, %	0,86 b	0,89 a	0,84 b	0,0004
ILC, %	0,2	0,2	0,2	ns
ID, %	5,0 b	13,4 a	14,0 a	0,0001

Tratamentos com letras iguais na linha não diferem entre si pelo teste de Tukey à 5% de probabilidade.

†HLQ= índice de suscetibilidade à decomposição ou quociente holocelulose/lignocelulose; ILC= índice lignocelulósico; Relação C/N= relação carbono/nitrogênio; Relação Lignina/N= relação lignina/nitrogênio; ID= índice de decomponibilidade.

A relação do conteúdo de N com a relação C:N foi elevada e significativa para os resíduos culturais de inverno ($C:N = 0,05N^2 - 3,27N + 65,5$, $R^2 = 0,94$, $p = 0,0001$) e para os resíduos culturais de verão ($C:N = 0,23N^2 - 9,18N + 112,1$, $R^2 = 0,98$, $p = 0,0001$). Isto evidencia que para cada g de N kg^{-1} ocorreu uma redução de 3,3 pontos na relação C:N nos resíduos das culturas de inverno e 9,2 pontos nos resíduos de verão, contribuindo para a velocidade de decomposição dos materiais. A velocidade de decomposição e liberação de N dos resíduos culturais foi inversamente proporcional à relação C:N e diretamente proporcional ao conteúdo de N total na fitomassa. Resultados semelhantes foram observados por Ranells & Wagger (1996), Da Ros (1993), Aita & Giacomini (2003) e Kliemann (2006).

Conteúdo de Lignina e N e a relação Lignina:N nos resíduos culturais

O conteúdo de lignina para os resíduos culturais de inverno, antes da decomposição (E_0) apresentaram valores semelhantes e não diferiram significativamente (Tabela 3). A relação lignina:N apresentou diferença significativa conforme a sequência: aveia preta (3,4%) > nabo forrageiro (2,9%) > ervilhaca (2,0%) (Tabela 3).

Também para os resíduos culturais de verão o conteúdo de lignina, antes da decomposição (E_0), apresentou valores semelhantes e não diferiu significativamente (Tabela 4). Por outro lado, a relação lignina:N foi significativamente maior para a soja (9,15%) = milho (9,12%) > feijão (4,86%) (Tabela 4).

Conteúdo de celulose, hemicelulose, holocelulose e carboidratos solúveis nos resíduos culturais

O conteúdo de celulose nos resíduos culturais de inverno antes da decomposição (E_0) foi mais elevado no nabo forrageiro e na aveia preta quando comparados à

ervilhaca: Nb (30%) = Ap (29,7%) > Er (24,1%) (Tabela 3). O conteúdo de hemicelulose foi mais elevado na aveia preta e menor na ervilhaca e no nabo forrageiro: Ap (32,1%) > Er (16,7%) > Nb (13,7%) (Tabela 3). O conteúdo de holocelulose comportou-se conforme a sequência: Ap (61,8%) > Nb (43,7%) = Er (40,8%) (Tabela 3). O conteúdo de carboidratos não diferiu significativamente para os resíduos culturais de inverno (Tabela 3).

O conteúdo de celulose para os resíduos culturais de verão, antes da decomposição (E_0), foi maior e igual para soja (40,7%) e milho (39,2%) e menor para feijão (35%) (Tabela 4). Para hemicelulose a sequência foi: milho (32,5%) > feijão (14,4%) > soja (11,9%) (Tabela 4). Para holocelulose o milho apresentou conteúdo mais alto (71,7%) que a soja (52,6%) e o feijão (49,4%), que foram iguais (Tabela 4). O conteúdo de carboidratos foi maior para o feijão (0,2%) do que para soja (0,1%) e milho (0,1%), que foram iguais (Tabela 4).

Índices de qualidade dos resíduos culturais

Os teores dos constituintes orgânicos interferem no processo de decomposição e refletem diretamente nos índices de qualidade dos resíduos (Cortez et al, 1996). Desta forma, constatou-se que o índice de suscetibilidade à decomposição ou quociente holocelulose/lignocelulose (HLQ), antes da decomposição (E_0), foi maior para a aveia preta em relação à ervilhaca e nabo forrageiro, que foram iguais (Tabela 3). O índice ligno-celulósico (ILC) e o índice de decomponibilidade (ID) não mostraram diferença significativa para os resíduos de inverno no início da decomposição (E_0).

O HLQ foi significativamente maior para milho quando comparado ao feijão e à soja, que foram iguais. O índice de decomponibilidade foi significativamente superior

para os resíduos de soja (14%) e para o milho (13,4%), que foram igual e menor para o feijão (5%). O ILC não apresentou diferença significativa (Tabela 4).

Alterações nos constituintes orgânicos e respectivos índices e relações após 70 dias de decomposição

Do início da decomposição (E_0) até os 70 dias (E_4), o C reduziu 10,9 e 12,4% na aveia preta e ervilhaca, respectivamente, e aumentou 9,1% no nabo forrageiro (Tabela 5). O N aumentou na aveia preta e reduziu na ervilhaca e no nabo forrageiro, enquanto a relação C:N reduziu na aveia preta e aumentou na ervilhaca e no nabo forrageiro (Tabela 5).

Nos resíduos culturais de verão o C reduziu no feijão e no milho e aumentou na soja. Por outro lado, o N diminuiu em todos os resíduos e a relação C:N aumentou em todos os resíduos (Tabela 5).

Tabela 5. Porcentagem de variação dos constituintes orgânicos e índices de qualidade dos resíduos culturais após 70 dias do início da decomposição

Constituintes orgânicos e índices†	Aveia Preta	Ervilhaca	Nabo Forrageiro	Feijão	Milho	Soja
Lignina, %	156,5	196,2	205,1	84,8	28,5	41,5
Celulose, %	8,6	34,1	28,2	22,9	3,1	18,4
Hemicelulose, %	-29,8	-3,3	33,1	36,2	-23,3	27,9
Holocelulose, %	-11,3	18,8	29,7	26,8	-8,9	20,6
Carboidratos, %	-80,0	-82,5	-76,4	-72,0	-51,4	-50,7
Carbono, %	-10,9	-12,4	9,1	-2,8	-0,7	2,5
Nitrogênio, %	1,7	-33,0	-31,8	-25,4	-19,3	-21,9
Relação C:N, %	-14,5	28,6	62,1	30,7	21,4	35,2
Relação Lignina:N, %	143,4	364,8	354,9	147,3	60,7	87,6
HLQ, %	-15,3	-17,3	-15,6	-6,2	-4,1	-2,6
ILC, %	88,9	72,4	86,2	37,1	18,8	15,2
ID, %	370,5	816,6	877,8	368,0	126,4	165,9

†HLQ= índice de suscetibilidade à decomposição ou quociente holocelulose/lignocelulose; ILC= índice lignocelulósico; Relação C/N= relação carbono/nitrogênio; Relação Lignina/N= relação lignina/nitrogênio; ID= índice de decomponibilidade.

O conteúdo de lignina aumentou expressivamente para todos os resíduos, refletindo diretamente no processo de decomposição dos mesmos. Para os resíduos culturais de inverno o maior aumento no conteúdo de lignina ocorreu no nabo forrageiro

(205,1%) e o menor na aveia preta (156,5%) (Tabela 5). O maior aumento da relação Lignina:N foi na ervilhaca (364,8%) e o menor na aveia preta (143,4%) (Tabela 5).

Para os resíduos culturais de verão o maior aumento no conteúdo de lignina foi para o feijão (84,8%) e o menor para o milho (28,5%) (Tabela 5). A relação Lignina:N aumentou para todos os resíduos, sendo maior para o feijão.

O conteúdo de lignina e a relação Lignina:N apresentaram alterações consistentes para todos os resíduos culturais, mostrando-se índices sensíveis para medir a decomposição dos materiais. Isto evidencia a lignina como fator importante no controle da decomposição dos materiais estudados. Cortez et al. (1996) reportou afinidade entre as taxas de decomposição de três espécies mediterrâneas arbóreas e a qualidade dos resíduos culturais, destacando que a concentração de lignina é o fator relevante no controle das taxas de decomposição. O presente estudo revelou o mesmo comportamento citado pelos autores e evidenciou que as relações com a lignina passaram a ser mais importantes do que o efeito isolado dos constituintes orgânicos. A preferência da microbiota na fase inicial da oxidação enzimática obedece a sequência decrescente (decomposição rápida para lenta): açúcares > amido e proteínas simples > hemicelulose > celulose > holocelulose > polifenóis e ligninas (Wieder e Lang, 1982).

Para os resíduos culturais de inverno a celulose aumentou para todos os resíduos, sendo este aumento maior para ervilhaca e nabo forrageiro. A hemicelulose reduziu para todos os resíduos, com exceção do nabo forrageiro que apresentou aumento de 33,1% (Tabela 5). A holocelulose diminuiu para a aveia preta e aumentou para ervilhaca e nabo forrageiro. A redução de carboidratos ficou entre 76,4% para nabo forrageiro e 82,5% para ervilhaca (Tabela 5). A alteração destes constituintes orgânicos refletiu diretamente nos índices de qualidade, onde o HLQ diminuiu para todos os resíduos, com maior expressão para a ervilhaca. O ILC aumentou para todos os materiais, com

maior expressão para a aveia preta. O índice de decomponibilidade (ID) teve maior aumento para o nabo forrageiro (877,8%), seguido pela ervilhaca (816,6%) e o menor aumento foi para a aveia preta (370,5%) (Tabela 5).

Para os resíduos culturais de verão a celulose aumentou para todos com menor expressão para o milho (3,1%). A hemicelulose e a holocelulose aumentaram para as leguminosas e reduziram para o milho (Tabela 5). Carboidratos reduziram para todos os resíduos, com maior expressão para o feijão. Estes resultados refletiram nos índices de qualidade, onde HLQ diminuiu para todos os resíduos, sendo esta redução maior para o feijão. O ILC e o ID aumentaram para todos os resíduos, sendo este aumento maior para o resíduo de feijão, 37,1 e 368%, respectivamente (Tabela 5).

Do início da decomposição (E_0) até os 70 dias (E_4), tanto para os resíduos de verão como para os de inverno, o conteúdo de lignina aumentou e o conteúdo de carboidratos diminuiu expressivamente para todos os resíduos, refletindo diretamente nos índices ILC, ID e Lignina:N que aumentaram com o tempo e HQL, que diminuiu com o passar do tempo (Tabela 5). Wieder e Lang (1982), explicaram o processo de decomposição de resíduos de plantas, afirmando que, de modo geral na fase inicial grande parte desses resíduos é constituída de materiais de fácil decomposição, como açúcares e proteínas, ficando para o final, o material recalcitrante e de difícil decomposição, como celulose, gorduras, tanino e lignina. Durante a decomposição, a proporção relativa de material recalcitrante aumenta progressivamente enquanto a decomposição absoluta decresce, ficando a decomposição relativa permanentemente constante.

O conteúdo de lignina e de carboidratos, bem como, a relação Lignina/N e os índices ILC, ID e HLQ apresentaram alterações consideráveis e consistentes para todos os resíduos culturais com o passar do tempo, mostrando-se índices sensíveis para medir

a decomposição dos materiais (Figuras 1 e 2). De modo geral as alterações foram mais expressivas para os resíduos culturais de inverno quando comparadas aos resíduos de verão, o que está relacionado com o período em que os resíduos se decompõem, ou seja, os resíduos de verão se decompõem no outono/inverno, período de temperaturas mais amenas e menores precipitações, portanto, decomposição mais lenta.

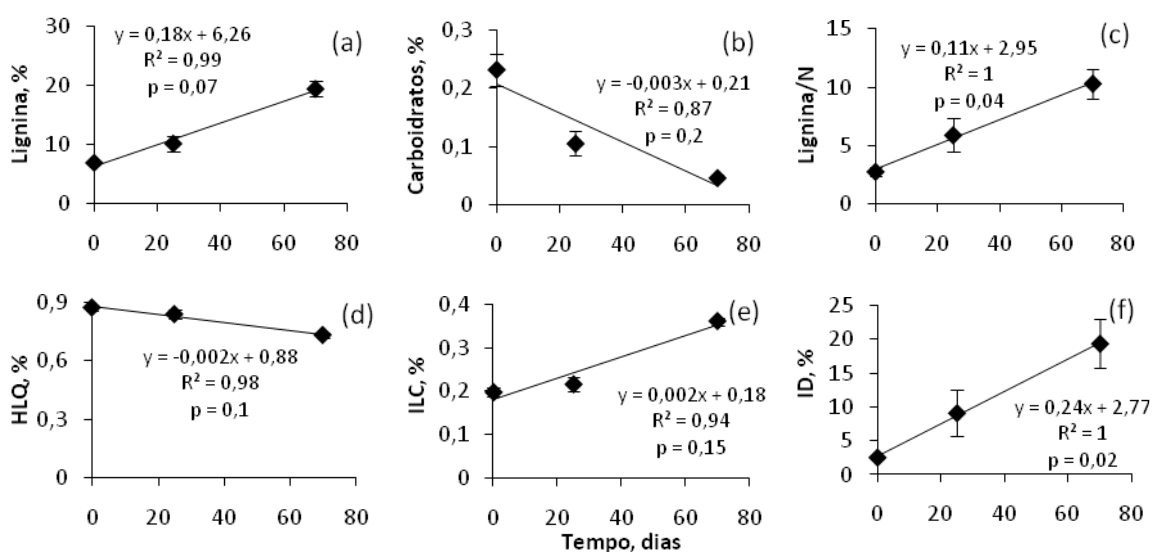


Figura 1. Alterações no conteúdo de: (a) lignina, (b) carboidratos solúveis, (c) relação lignina/nitrogênio (lignina/N), (d) quociente holocelulose/lignocelulose (HLQ), (e) índice lignocelulósico (ILC) e (f) índice de decomponibilidade (ID), para os resíduos culturais de inverno, do início aos 70 dias de decomposição, média de 4 repetições.

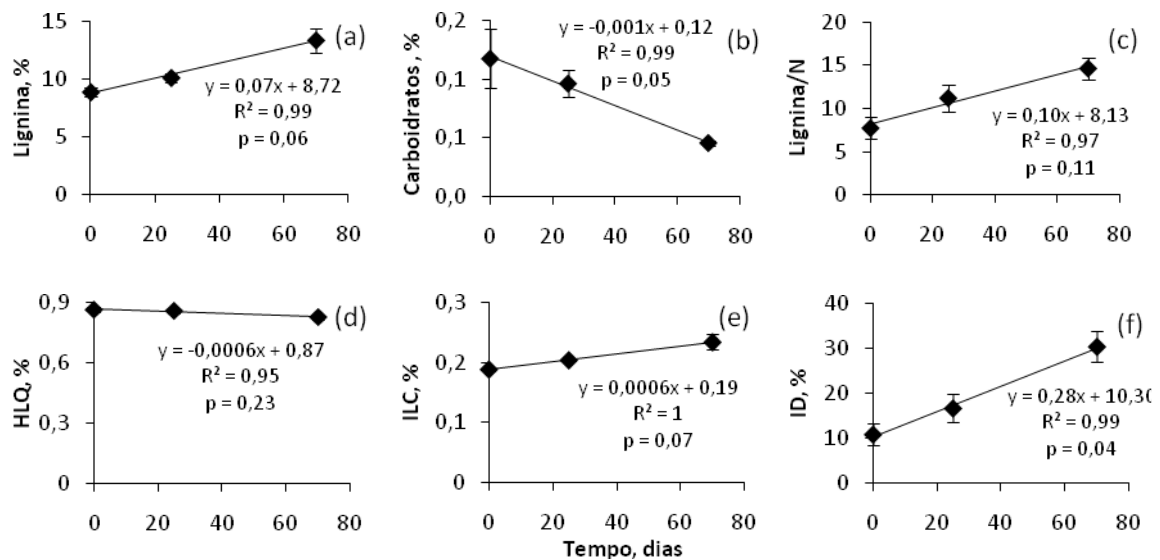


Figura 2. Alterações dos teores de (a) lignina, (b) carboidratos solúveis, (c) relação lignina/nitrogênio (lignina/N), (d) quociente holocelulose/lignocelulose (HLQ), (e) índice lignocelulósico (ILC) e (f) índice de decomponibilidade (ID), para os resíduos culturais de verão, do início aos 70 dias de decomposição, média de 4 repetições.

Além da relação C:N, as proporções dos carboidratos estruturais e lignina também podem ser alteradas nos resíduos culturais de espécies consorciadas (Ranells & Wagger, 1996). Essas mudanças na composição da fitomassa podem provocar alterações na taxa de decomposição dos resíduos culturais, uma vez que esse processo é controlado por diversos atributos intrínsecos aos resíduos, tais como o conteúdo de N, lignina e polifenóis na fração solúvel em água, além da relação C:N, lignina:N e lignina + polifenóis:N (Reinertsen et al., 1984; Trinsoutrot et al., 2000).

A relação da lignina com os índices de qualidade HLQ, ILC e ID e com a relação lignina/N, tanto para os resíduos culturais de inverno quanto para os resíduos culturais de verão, foi significativa (Figuras 3 e 4). Isto evidência a lignina como fator importante no controle da decomposição dos materiais estudados. Por sua vez, o conteúdo de nitrogênio e o de carboidratos solúveis mostraram-se importantes no processo de decomposição, definindo a velocidade de decomposição dos materiais.

Quanto maior foi o conteúdo de nitrogênio e de carboidratos solúveis, maior foi a velocidade de decomposição.

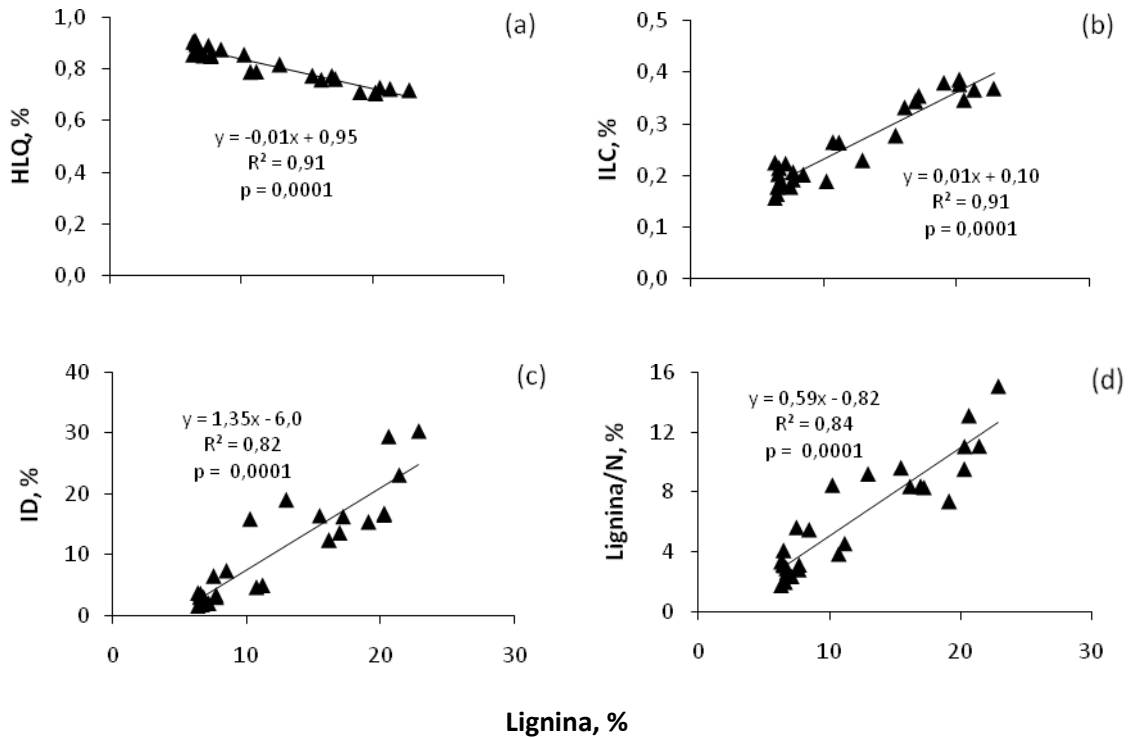


Figura 3. Relação entre o conteúdo de lignina e os índices de qualidade dos resíduos culturais de inverno: (a) índice de suscetibilidade à decomposição (HLQ), (b) índice ligno-celulósico (ILC), (c) índice de decomponibilidade (ID) e (d) relação lignina/N, média de 4 repetições, n= 27.

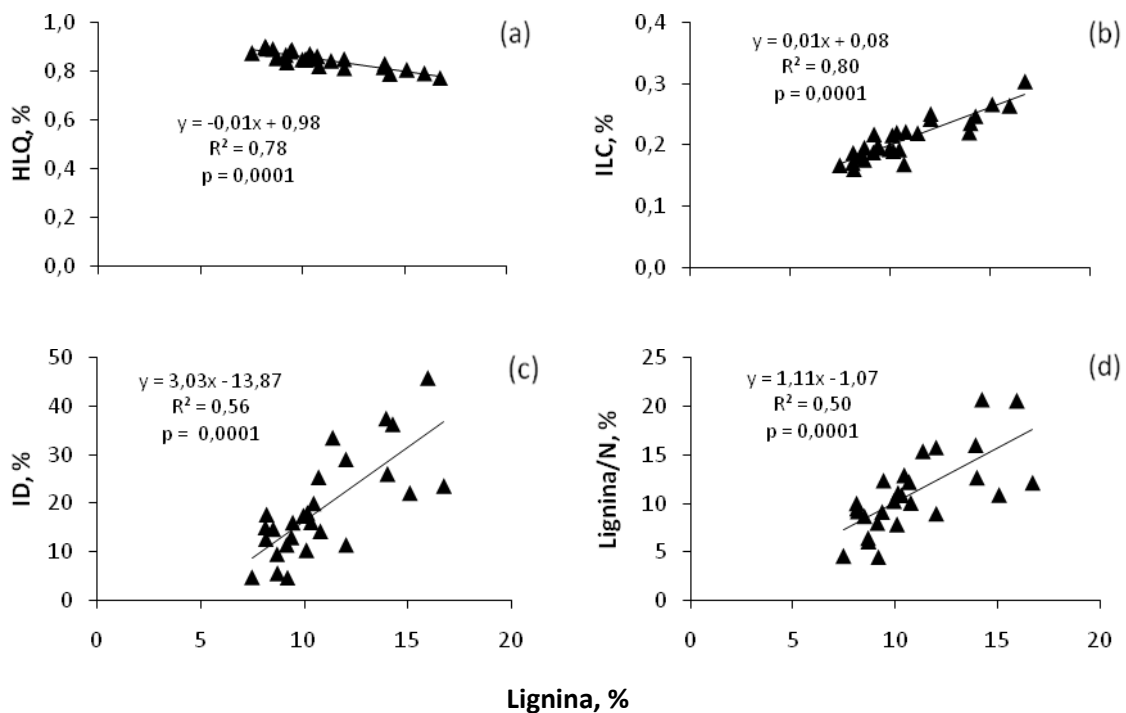


Figura 4. Relação entre os teores de lignina e os índices de qualidade dos resíduos culturais de verão: (a) índice de suscetibilidade à decomposição (HLQ), (b) índice ligno-celulósico (ILC), (c) índice de decomponibilidade (ID) e (d) relação lignina/N, média de 4 repetições, n= 27.

Quanto maior foi o conteúdo de lignina menor foi o índice de suscetibilidade à decomposição (HLQ), maior o índice ligno-celulósico, maior a relação Lignina/N e maior o índice de decomponibilidade dos materiais (Figuras 3 e 4). Portanto, entre os constituintes orgânicos e os índices de qualidade dos resíduos culturais, verificou-se que o conteúdo de lignina, nitrogênio e de carboidratos solúveis e os índices destes derivados (relação Lignina/N, ILC, HLQ, ID) foram os mais sensíveis para expressar a decomposição dos resíduos culturais estudados.

Alteração no estoque de C-lábil devido às sucessões de culturas

O delta estoque de COT ($t_2 - t_1$) variou em função do aporte e da qualidade dos resíduos nas sucessões (Tabela 6). A sucessão Nb-F apresentou o menor delta estoque ($0,27 \text{ Mg ha}^{-1}$) enquanto a sucessão Ap-F proporcionou o maior estoque ($0,91 \text{ Mg ha}^{-1}$). A variação média no C-lábil foi de $0,70 \text{ Mg ha}^{-1}$ em um ano. Sá et al. (2008) reportaram

para um Latossolo Vermelho argiloso na mesma região do presente estudo, variação de 0,64 a 1,3 Mg ha⁻¹, cuja média foi de 0,82 Mg ha⁻¹ ano⁻¹. Afirmaram também que, na camada de 0-5 cm, 65 a 90% da taxa era representada pelo C-lábil. Outros autores tem ressaltado a importância do C-lábil, uma vez que é o caminho para o armazenamento de C no solo e o primeiro passo para atingir formas de C mais humificadas (Bayer et al, 2004; Diekow et al., 2005; Amado et al. 2006; Santos, 2006; Sá e Lal, 2009).

Tabela 6. Balanço de carbono (C) na fração lábil da matéria orgânica do solo (> 53µm) afetado pelas sucessões de culturas na camada de 0 a 10 cm, no período de um ano (out/2006 a out-2007).

Sucessão de culturas†	Fitomassa adicionada	C Adicionado	C Mineralizado	C Sequestrado ‡	C convertido	C perdido
----- Mg ha ⁻¹ -----					----- % -----	
M/Ap-F	8,96	3,66	1,93	0,91	47,3	52,7
M/Er-F	7,27	2,93	2,12	0,87	41,1	58,9
M/Nb-F	9,48	3,70	2,66	0,27	10,3	89,7
S/Ap-M	15,13	6,41	2,35	0,66	28,0	72,1
S/Er-M	12,15	5,06	2,61	0,79	30,2	69,9
S/Nb-M	13,85	5,66	2,60	0,79	30,5	69,5
F/Ap-S	10,69	4,34	1,80	0,61	33,8	66,2
F/Er-S	10,51	4,23	2,20	0,74	33,7	66,3
F/Nb-S	10,48	4,21	2,31	0,63	27,5	72,5
Média	10,95	4,47	2,29	0,70	31,3	68,7

† Sucessão de culturas (em negrito período do presente estudo e antes da barra representa a cultura de verão que antecedeu o período do presente estudo): Milho/**Aveia preta-Feijão** (M/Ap-F); Milho/**Ervilhaca-Feijão** (M/Er-F); Milho/**Nabo forrageiro-feijão** (M/Nb/F); Soja/**Aveia preta-Milho** (S/Ap-M); Soja/**Ervilhaca-Milho** (S/Er-M); Soja/**Nabo forrageiro-Milho** (S/Nb/M); Feijão/**Aveia preta-Soja** (F/Ap-S); Feijão/**Ervilhaca-Soja** (F/Er-S); Feijão/**Nabo forrageiro-Soja** (F/Nb-S)

‡ C seqüestrado equivale a $\Delta COT (t_2-t_1)$, ou seja, delta estoque de C entre o tempo 2 (out/07) e tempo 1 (out/06).

Constatou-se as maiores taxas de conversão nas sucessões aveia preta-feijão (47,3%) e ervilhaca-feijão (41,1%). Em contraste a menor taxa foi observada na sucessão nabo forrageiro-feijão (10,3%). Para todas as outras sucessões as taxas de conversão de C dos resíduos culturais para o estoque de C no solo foram intermediárias, sem variações expressivas entre elas, e se situaram entre 27,5 a 33,8%. As sucessões aveia preta-soja (Ap-S) e ervilhaca-soja (Er-S) apresentaram taxas de conversão praticamente iguais, 33,8 e 33,7%, respectivamente. Da mesma forma, para as sucessões

nabo forrageiro-milho (Nb-M) e ervilhaca-milho (Er-M) as taxas de conversão foram 30,5 e 30,2%, respectivamente. E as taxas de conversão para as sucessões aveia preta-milho e nabo forrageiro-soja (Nb-S) foram 28 e 27,5 %. Independente das sucessões, a taxa média de conversão de C dos RC para a fração lábil da matéria orgânica do solo foi de 31,3%. Sá (2001) encontrou a taxa de 26,5% como média para a região dos campos gerais.

Considerando as culturas de inverno, observou-se que a aveia preta e a ervilhaca apresentaram um comportamento semelhante, com maior taxa de conversão quando a cultura sucessora foi o feijão, seguida pela taxa de conversão quando a cultura sucessora foi a soja e por fim a menor taxa quando a cultura sucessora foi o milho (Tabela 6). Este comportamento é esperado, pois o feijão e a soja são leguminosas e liberam maior quantidade de nitrogênio no solo, acelerando o processo de decomposição e conseqüentemente a conversão de C dos resíduos culturais para a fração lábil da matéria orgânica do solo. Para a cultura do nabo forrageiro, as taxas de conversão nas sucessões nabo forrageiro-soja (Nb-S) e nabo forrageiro-milho (Nb-M) foram semelhantes, porém houve uma baixa taxa de conversão quando sucedido pelo feijão (Tabela 6). Isto se deve possivelmente a interferência das culturas de verão que antecederam estas culturas de cobertura de inverno, as quais deixaram sobre o solo diferentes materiais em quantidade e qualidade. Nas parcelas com o feijão na safra 2006/07, período do presente estudo, havia na safra de verão anterior (2005/06) o milho; nas parcelas com o milho, havia a soja na safra 2005/06 e por fim, nas parcelas com a soja, havia na safra anterior o feijão. O nabo forrageiro foi o resíduo de inverno que teve o maior aumento no conteúdo de lignina e a menor redução no conteúdo de carboidratos comparado aos outros dois resíduos de inverno durante a decomposição. Foi também o resíduo de inverno que teve aumento no conteúdo de hemicelulose e holocelulose, enquanto os demais resíduos de

inverno tiveram redução destes constituintes orgânicos. Isto evidencia a concentração de constituintes orgânicos mais recalcitrantes e, portanto, o material tornou-se menos suscetível à decomposição. Possivelmente então, o resíduo de nabo forrageiro, com maior conteúdo de constituintes recalcitrantes, sobreposto sobre os resíduos de milho, com grande quantidade de material de elevada relação C:N, mesmo sucedido pelos resíduos de feijão, com baixa relação C:N e liberação de N, não proporcionou elevada taxa de conversão. Já a decomposição do nabo forrageiro quando sobreposto sobre os resíduos da soja ou do feijão, foi mais facilmente processada, pois os resíduos que antecederam o nabo forrageiro, por serem leguminosas, apresentaram decomposição mais rápida quando comparados ao milho, deixando sobre o solo menor quantidade de material e favorecendo assim o ataque dos microorganismos do solo aos resíduos de nabo forrageiro nestas condições. A aveia preta apresentou a maior taxa de conversão na sucessão com o feijão, sendo inclusive a maior taxa entre todos os tratamentos (Tabela 6).

Amado et al. (2001) avaliando diferentes sistemas de culturas mostrou que existe uma relação entre estoques de C e N no solo, e evidencia que a inclusão de leguminosas nos sistemas de rotação pode tornar mais eficiente o aporte de carbono. Estes resultados explicam a maior decomposição e a correspondente maior taxa de conversão de C dos resíduos vegetais para o estoque de C no solo quando o feijão sucedeu a aveia preta e a ervilhaca, comparado ao milho.

Sá et al (2001) constataram maior importância da fração lábil de C como precursora do C estável. Bayer et al. (2004) avaliaram o efeito de quatro sistemas de cultura sob plantio direto no armazenamento de carbono nas frações particulada (>53 μm) e associada aos minerais (<53 μm) da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho argiloso da Região do Cerrado e concluíram que o acúmulo de carbono no solo em

plantio direto ocorre preferencialmente na matéria orgânica particulada, a qual é mais sensível do que o carbono orgânico total às alterações no manejo do solo. Estes resultados concordam com os encontrados no presente estudo.

Conclusões

Constatou-se que o conteúdo de lignina associado ao conteúdo de nitrogênio foi o fator preponderante no controle da taxa de decomposição dos resíduos. Por sua vez o conteúdo de nitrogênio e carboidratos solúveis foi determinante para a velocidade do processo de decomposição e conversão de C dos resíduos culturais para o estoque de C no solo. Entre os índices de qualidade dos resíduos culturais, os que envolvem a lignina, o nitrogênio e os carboidratos solúveis (relação lignina/nitrogênio, ILC, HLQ, ID) foram os mais sensíveis para expressar a decomposição dos resíduos culturais estudados. O estoque de C-lábil variou de 0,27 a 0,91 Mg ha⁻¹ e a média das sucessões foi de 0,70 Mg ha⁻¹. As maiores taxas de conversão de C dos RC para a fração lábil da matéria orgânica do solo foram apresentadas pelas sucessões Aveia preta-Feijão (47,3%) e Ervilhaca-Feijão (41,1%). A sucessão Aveia preta-Feijão promoveu a maior contribuição para o estoque de C-lábil, enquanto a sucessão Nabo forrageiro-Feijão teve a menor contribuição. A taxa média de conversão de C dos RC para a fração lábil da matéria orgânica do solo foi de 31,3%.

Agradecimentos

À Fundação Agrisus pelo apoio financeiro para o desenvolvimento deste estudo.

Referências Bibliográficas

- ACOSTA-MARTÍNEZ, V., ZOBECK, T.M., GILL, T.E. & A.C. KENNEDY, A.C. Enzyme activities and microbial community structure in semiarid agricultural soils. *Biol. Fertil. Soils*, 38:216–227, 2003.
- AITA, C. & GIACOMINI, S.J. Decomposição e liberação de nitrogênio de resíduos culturais de plantas de cobertura de solo solteiras e consorciadas. *R. Bras. Ci. Solo*, 27(3):601-612, 2003.
- AMADO, T.J.C., BAYER, C., CONCEIÇÃO, P.C., SPAGNOLLO, E., CAMPOS, B.H.C. & VEIGA, M. Potential of carbon accumulation in no-till soils with intensive use and cover crops in Southern Brazil. *J. Environ. Qual.*, 35:1599-1607, 2006.
- AMADO, T.J.C.; BAYER, C.; ELTZ, F.L.F. & BRUM, A.C.R. Potencial de culturas de cobertura em acumular carbono e nitrogênio no solo no plantio direto e a melhoria da qualidade ambiental. *R. Bras. Ci. Solo*, 25(1):189-197, 2001.
- BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A. & DIECKOW, J. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. *Soil Tillage Res.*, 86:237-245, 2006.
- BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J. & PAVINATO, A. Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 39: 677-683, 2004.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; AMADO, T.J.C.; 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 Tillage Res.*, 54:101-109, 2000.
- BEARE, M.H.; PARMELEE, R.W.; HENDRIX, P.F.; CHENG, W.; COLEMAN, D.C. & GROSSLEY JR, D.A. Microbial and faunal interactions and effects on litter nitrogen and decomposition in agroecosystems. *Ecol. Monogr.*, 62:569–591, 1992.
- BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk Density. In: KLUTE, A. (Ed) *Methods of soil analysis*. 2. ed. Part 1: Physical and mineralogical methods. Madison, ASA, 1986. p. 363-376.
- CALEGARI, A.; HARGROVE, W.L.; RHEINHEIMER, D.S.; RALISCH, R.; DANIEL TESSIER, D.; TOURDONNET, S. & GUIMARÃES, M.F. Impact of long-term no-tillage and cropping system management on soil organic carbon in an Oxisol: a model for sustainability. *Agronomy Journal*, 100:1013-1019, 2008.
- CALEGARI, A.; MONDARDO, A.; BULISANI, E.A.; WILDNER, L.P.; COSTA, M.B.B.; ALCÂNTARA, P.B.; MIYASKA, S. & AMADO, T.J.C. *Adubação verde no sul do Brasil*. 2 ed. Rio de Janeiro, AS-PTA, 1993. 346p.
- CERETTA, C.A.; BASSO, C.J.; HERBES, M.G.; POLETTO, N. & SILVEIRA, M.J. da. Produção e decomposição de fitomassa de plantas de inverniais de cobertura de solo e milho, sob diferentes manejos da adubação nitrogenada. *Ciência Rural*, Santa Maria, 32(1):49-54, 2002.
- CERRI, C.E.P., SPAROVEK, G.; BERNOUX, M.; EASTERLING, W.E.; MELILLO, J.M. & CERRI, C.C. Tropical agriculture and global warming: impacts and mitigations options. *Sci. Agric.*, 64:83-99. 2007.
- CORBEELS, M.; SCOPEL, E.; CARDOSO, A.; BERNOUX, M.; DOUZETS, J.M. & SIQUEIRA-NETO, M. Soil carbon storage potential of direct seeding mulch-based cropping systems in the Cerrados of Brazil. *Global Change Biol.*, 12:1773-1787, 2006.
- CRUZ, L.E.C.; PILLON, C.N.; GIACOMINI, S.J.; SCIVITTARO, W.B.; LIMA, C.L.R. & FERREIRA, L.H.G. Dinâmica da decomposição e liberação de nitrogênio

- de resíduos culturais por meio de indicadores químicos em ambiente de terras baixas. *Rev. Bras. de Agroecologia*, 2(2):669-672, 2007.
- CORTEZ, J.; DEMARD, J.M.; BOTTNER, P & JOCTEUR MONROZIER, L. Decomposition of mediterranean leaf litters: a microcosm experiment investigating relationships between decomposition rates and litter quality. *Soil Biology and Biochemistry*, 28(4/5):443-452, 1996.
- DA ROS, C.O. Plantas de inverno para cobertura do solo e fornecimento de nitrogênio ao milho em plantio direto. Santa Maria, Universidade Federal de Santa Maria, 1993. 85p. (Tese de Mestrado)
- DALAL, R.C. & MAYER, R.J. Long-term trends in fertility of soils under continuous conservation and cereal cropping in Southern Queensland. II. Total organic carbon and its rate of loss from the soil profile. *Australian Journal of Soil Research*, 24: 281-292, 1986b.
- DIECKOW, J., MIELNICZUK, J., KNICKER, H., BAYER, C., DICK, D.P. & KOGEL-KNABNER, I. Composition of organic matter in a subtropical Acrisol as influenced by land use, cropping and N fertilization, assessed by CPMAS ¹³C NMR spectroscopy. *British Society of Soil Science, European Journal of Soil Science*, 56: 705–715, 2005.
- DORAN, J.W. & PARKIN, T.B. Defining and assessing soil quality. In: Doran, J.W., Coleman, D.C., Bezdicek, D.F. & Stewart, B.A. (Eds.). *Defining soil quality for a sustainable environment*. Soil Sci. Soc. Am., Am. Soc. Agron., Madison, WI, 1994. p.3–21.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. Manual de métodos de análise do solo. 2 Ed. Rio de Janeiro, RJ, 1997. p. 212.
- FLOSS, E.L. Benefícios da biomassa de aveia ao sistema plantio direto. *Revista Plantio Direto*, Mai/Jun:25-29, 2000.
- FREY, S.D., ELLIOTT, E.T. & K. PAUSTIAN, K. Bacterial and fungal abundance and biomass in conventional and no-tillage agroecosystems along two climatic gradients. *Soil Biol. Biochem.* 31:573–585, 1999.
- GOLCHIN, A., OADES, J.M., SKJEMSTAD, J.O. & CLARKE, P. Structural and dynamic properties of soil organic matter as reflected by ¹³C natural abundance, pyrolysis mass spectroscopy and solid-state ¹³C NMR spectroscopy in density fractions of an Oxisol under forest and pasture. *Australian Journal of Soil Research*, 33, 59–76, 1995a.
- GONÇALVES, S.L.; SARAIVA, O.F.; FRANCHINI, J.C. Decomposição de resíduos de culturas anuais em semeadura direta e convencional. In: FERTIBIO, Londrina, 2008. Anais. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2008, p.
- HERMAN, W.A.; MCGILL, W.B. & DORMAAR, J.F. Effects of initial chemical composition of roots of three grass species. *Canadian Journal of Soil Science*, 57(2):205-215, 1977.
- HOLLAND, E.A. & COLEMAN, D.C. Temperature and plant species control over litter decomposition in Alaskan tundra. *Ecological Monographs*, 66:503-522, 1987.
- IAPAR - Instituto Agronômico do Paraná. Dados climáticos. Londrina, PR, 1998.
- JOHNSON, R.R.; BALWANI, T.L.; JOHNSON, L.J.; McCLURE, K.E. & DEHORITY, B.A. Corn plant maturity. II. Effect on *in vitro* cellulose digestibility and soluble carbohydrate content. *Journal of Animal Science*, 25: 617-623, 1966.
- KLIEMANN, H.J.; BRAZ, A.J.P.B. & SILVEIRA, P.M. da. Taxas de decomposição de resíduos de espécies de cobertura em Latossolo Vermelho Distróférrico. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 36 (1):21-28, 2006.

- KONG, A.Y.Y.; SIX, J.; BRYANT, D.C.; DENISON, R.F. & VAN KESSEL, C. The Relationship between Carbon Input, Aggregation and Soil Organic Carbon Stabilization in Sustainable Cropping Systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 69:1078-1085, 2005.
- LAL, R. & LOGAN, T.J. Agricultural activities and greenhouse gas emission from soils of the tropics. In: LAL, R., KIMBLE, J.M., LEVINE, E. & STUART, B.A. (Eds). *Soil management greenhouse effect*. Boca Raton, CRC Press., 1995. p.293-307.
- LORENZ, K.; LAL, R.; PRESTON, C.M. & NIEROP, K.G.J. Strengthening the soil organic carbon pool by increasing contributions from recalcitrant aliphatic bio(macro)molecules. *Geoderma* 142:1-10, 2007.
- MAACK, R. *Geografia Física do Paraná*. 2nd ed. Rio de Janeiro, Livraria José Olímpio Editora S.A., 1981. 355p.
- MELILLO, J.M.; ABER, J.D.; LINKINS, A.E.; RICCA, A.; FRY, B. & NADELHOFFER, K.J. Carbon and nitrogen dynamics along the decay continuum: Plant litter to soil organic matter. *Plant and Soil*, 115(2):189-198, 1989.
- METAY, A.; MOREIRA, J.A.A.; BERNOUX, M.; BOYER, T.; DOUZET, J.M.; FEIGL, B.; CHRISTIAN FELLER, C.; MARAUX, F.; OLIVER, R. & SCOPEL, E. Storage and forms of organic carbon in a no-tillage under cover crops system on clayey Oxisol in dryland rice production (Cerrados, Brazil). *Soil & Tillage Research* 94:122-132, 2007.
- MONEGAT, C. *Plantas de cobertura de solo: características e manejo em pequenas propriedades*. Chapecó-SC, Ed. do Autor, 1991. 337p.
- NELSON, P.W. & SOMMERS, C.E. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: PAGE, A.L. (Ed.). *Methods of soil analysis*. Madison, Soil Science Society of America, pt.2, 1982. p.539-579. (SSSA. Agronomy Monograph, 9).
- OADES, J.M. The retention of organic matter in soils. *Biogeochemistry*, 5:35-70, 1988.
- PAUL, E.A. & CLARK, F.E. *Soil microbiology and biochemistry*. San Diego, Academic Press, 1989. 275p.
- PAUSTIAN, K., COLLINS, H.P. & PAUL, E.A. Management controls on soil carbon. In: PAUL, E.A. (Ed.). *Soil Organic Matter in Temperate Agroecosystems: Long-term Experiments in North America*. Boca Raton, CRC Press, 1997. p. 15-49.
- PAVAN, M.A.; BLOCH, M.F.; ZEMPULSKI, H.C.; MIYAZAWA, M. & ZOCOLER, P.C. *Manual de análise química do solo e controle de qualidade*. Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), 1992. 38p. (Circular 76).
- RANELLS, N.N. & WAGGER, M.G. Nitrogen release grass and legume cover crop monocultures and bicultures. *Agron. J.*, 88:777-782, 1996.
- RASMUSSEN, P.E.; ALBRECHT, S.L. & SMILEY, R.W. Soil C and N changes under tillage and cropping systems in semi-arid Pacific Northwest agriculture. *Soil Tillage Res.* 47:197-205, 1998.
- REICOSKY, D.C.; KEMPER, W.D.; LANGDALE, G.W.; DOUGLAS JR., C.L. & RASMUSSEN, P.E. Soil organic matter changes resulting from tillage and biomass production. *J. Soil Water Conservation*. 50:253-261, 1995.
- REINERTSEN, S.A.; ELLIOT, L.F.; COCHRAN, V.L. & CAMPBELL, G.S. Role of available carbon and nitrogen in determining the rate of wheat straw decomposition. *Soil Biology and Biochemistry*, 16 (5):459-464, 1984.
- ROBERSON, E.B.; SARIG, S.; SHENNAN, C. & FIRESTONE, M.K. Nutritional management of microbial polysaccharide production and aggregation in an agricultural soil. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 59:1587-1594, 1995.

- SÁ, J.C.M.; SÉGUY, L.; GOZÉ, E.; BOUZINAC, S.; HUSSON, O.; BOULAKIA S.; TIVET, F.; FOREST, F. & SANTOS, J.B. Carbon pools and balance in no-tillage soils under intensive cropping systems in tropical agroecozones. *Soil Sci. Soc. Am. J.* "in press", 2009.
- SÁ, J. C. M & R. LAL. Stratification ratio of soil organic matter pools as an indicator of carbon sequestration in a tillage chronosequence on a Brazilian Oxisol. *Soil & Tillage Research. Res.*, 103:46-56, 2009.
- SÁ, J.C.M.; CERRI, C.C.; PICCOLO, M.C.; FEIGL, B.E.; BUCKNER, J.; FORNARI, A.; SÁ, M.F.M.; SEGUY, L.; BOUZINAC, S.; VENZKE-FILHO, S.P.; PAULETTI, V. & NETO, M.S. O plantio direto como base do sistema de produção visando o sequestro de carbono. *Revista Plantio Direto* 84:45-62, 2004.
- SÁ, J.C.M.; CERRI, C.C.; LAL, R.; DICK, W.A.; VENZKE FILHO, S.P.; PICCOLO, M. & FEIGL, B. Organic matter dynamics and sequestration rates for a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65: 1486-1499, 2001.
- SALL, J.; CREIGHTON, L. & LEHMAN, A. *JMP start statistics: a guide to statistics and data analysis using JMP and JMP IN software*. 3rd ed. Cary, Duxbury Press, 2005. 580p.
- SANTOS, J B. Alterações no estoque e taxa de seqüestro de carbono em um Latossolo Vermelho submetido a sistemas de manejo. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Estadual de Ponta Grossa-PR, 2006.
- 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 and Tillage Research*, 79:7-31, 2004.
- SIX, J.; FELLER, C.; DENEFF, K.; OGLE, S.M.; SÁ, J.C.M. & ALBRECHT, A. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils: effect of no-tillage. *Agronomie*, 22:755-775, 2002.
- SYLVIA, D.M., FUHRMANN, J.J., HARTEL, P.G. & ZUBERER, D.A. *Principles and applications of soil microbiology*. 2nd ed. Pearson Education Inc., Upper Saddle River, NJ, 2005.
- TISDALL, J.M. & OADES, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.* 33:141-163, 1982.
- THOMAS, R.J. & ASAKAWA, N.M. Decomposition of leaf litter from tropical forage grasses and legumes. *Soil Biology and Biochemistry*, 25:1351-1361, 1993.
- TRINSOUTROT, I.; RECOUS, S.; BENTZ, B.; LINÈRES, D.; CHÈNEBY, D. & NICOLARDOT, B. Biochemical quality of crop residues and carbon and nitrogen mineralization kinetics under nonlimiting nitrogen conditions. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 64:918-926, 2000.
- VAN SOEST, P.J. New chemical procedures for evaluating forages. In: *Symposium on nutrition and forage and pasture*. *Journal of Animal Science*, 23(3): 838-845, 1964.
- WIEDER, R.K. & LANG, G.E. A critique of the analytical methods used in examining decomposition data obtained from litter bags. *Ecology*, 63 (6): 1636-1642, 1982.

8. ESTOQUE DE CARBONO E NITROGENIO NOS MACROAGREGADOS E RELAÇÃO DE ESTRATIFICAÇÃO AFETADOS POR SUCESSÕES DE CULTURAS EM UM LATOSSOLO VERMELHO SOB PLANTIO DIRETO DE LONGA DURAÇÃO¹

Lutécia Beatriz dos Santos Canalli²; João Carlos de Moraes Sá³; Aníbal de Moraes⁴; Roberto Simão de Carli⁵; Lúcio Scherekenberg Elias⁵; Erielton Aparecido Pupo Antunes⁵; Marielle Letícia Romko⁵; Josiane Bürkner dos Santos⁶; Clever Briedis⁷; Ademir de Oliveira Ferreira⁸

Resumo - O manejo do solo altera sua estrutura, interferindo na formação, no tamanho e no arranjo dos agregados do solo. No sistema plantio direto (SPD), a ausência de revolvimento do solo associada à manutenção dos resíduos culturais na superfície estimula a atividade da biomassa microbiana, gerando um fluxo contínuo de C e N, o que afeta a reorganização dos agregados. O objetivo deste estudo foi determinar o conteúdo e estoque de C e N nos macroagregados e a relação de estratificação, considerando diferentes sucessões de culturas: aveia preta-feijão (Ap-F), ervilhaca-feijão (Er-F), nabo forrageiro-Feijão (Nb-F), aveia preta-milho (Ap-M), ervilhaca-milho (Er-M), nabo forrageiro-milho (Nb-M), aveia preta-soja (Ap-S), ervilhaca-soja (Er-S) e nabo forrageiro-soja (Nb-S). As amostras foram coletadas em outubro/07, em três profundidades (0-2,5; 2,5-5 e 5-10 cm). Foram determinados carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) em três classes de macroagregados (19-8; 8-4 e 4-2 mm) e os índices de agregação: diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG). Foi calculada a relação de estratificação e os estoques de COT e NT no solo. Independente das sucessões de culturas, o DMP foi significativamente

menor na profundidade de 0-2,5 cm em relação as profundidade de 2,5-5 e 5-10 cm e para o DMG não houve diferença significativa entre as profundidades. A porcentagem da classe de macroagregados de 19-8 mm foi significativamente superior às demais, e representou 71,9% na média das sucessões e profundidades. Constatou-se relação positiva e significativa entre a massa das classes de macroagregados e a porcentagem de C nas classes de agregados. O conteúdo de COT e NT na camada de 0-2,5 cm foi significativamente superior em todas as classes de agregados, independente das sucessões de culturas, e reduziu em profundidade, indicando a formação de estratificação no perfil do solo, devido ao aporte contínuo de matéria orgânica através dos resíduos culturais. O conteúdo e o estoque de COT aumentaram quando a sucessão incluiu espécies de relação C:N mais alta (aveia preta, milho e soja). A sucessão de cultura que apresentou o maior conteúdo e estoque de C no solo foi a aveia preta-soja e a relação C:N desta sucessão foi significativamente superior às demais, independente da classe de agregado e profundidade. Independente das sucessões, o conteúdo de COT e NT (g kg^{-1}) e o estoque de COT e NT (kg ha^{-1}) na classe de macroagregados 19-8 mm foi significativamente superior as demais classes em todas as profundidades. Observou-se relação linear significativa entre o conteúdo e o estoque de COT com a relação de estratificação na classe de macroagregados de 19-8 mm. Estes resultados confirmam a importância do sistema plantio direto que, pelo não revolvimento do solo e pelo aporte contínuo de resíduos culturais, propicia a formação de macroagregados grandes (19-8 mm) e mais estáveis, que favorecem a proteção física da matéria orgânica no seu interior, com conseqüente aumento no conteúdo e estoque de C e N no solo.

Palavras-chave: agregados no solo, relação de estratificação, estoque de C e N no solo, plantio direto, sucessão de culturas

CARBON AND NITROGEN POOLS IN MACROAGGREGATES AND STRATIFICATION RATIO AFFECTED BY CROP SEQUENCES IN A BRAZILIAN OXISOL UNDER LONG-TERM NO-TILLAGE

Abstract - Soil management changes soil structure, the size and the formation of the aggregates. No-tillage (NT) associated with crop residues maintenance on the soil surface stimulates the microbial biomass activity, promoting a continuous C and N flow, which affects the aggregates reorganization. The objective of this study was to assess the content and stock of C and N in the macroaggregates and the relationship with the stratification ratio, affected by different crop sequences: black oat-bean (Bo-B), vetch-bean (Vt-B), radish-bean (Rd-B), black oat-mayze (Bo-M), vetch-maize (Vt-M), radish-mayze (Rd - M), black oat-soybean (Bo-S), vetch-soybean (Vt-S) and radish-soybean (Rd-S). This study was conducted in a long-term no-tillage experiment for 18 years at the Experiment Station of ABC Foundation, located in Ponta Grossa, PR. The samples were taken on October/2007 in three depths (0-2.5, 2.5-5 and 5-10 cm) and were measured total organic carbon (TOC) and total nitrogen (TN) in three macroaggregates classes (19-8, 8-4 and 4-2 mm). The aggregation indices, mean weight diameter (MWD) and geometric mean diameter (GMD), and the stratification ratio and the stocks of TOC and TN in the soil were calculated. Regardless of crop sequences, the MWD was significantly lower in the depth of 0-2.5 cm than the depth of 2.5-5 and 5-10 cm and the GMD was no significant difference among depths. The percentage of 19-8 mm macroaggregates was significantly higher than the others, and represented 71.9% of the average for crop sequences and depths. There was a significant positive relation between the macroaggregates mass and C percentage in the aggregate size classes. The TOC and TN contents in the 0-2.5 cm layer was significantly higher in all aggregates

classes, and reduced with increase depth, indicating the formation of stratification in the soil profile, due to continuous input of organic matter through crop residues. The content and stock of TOC increased when species with high C:N ratio was included (oat, maize and soybean). The crop sequence, which had the highest carbon content and storage in soil was the black oat-soybean (Bo-S) and C:N ratio of this sequence was significantly superior than the others, regardless of the aggregate classe and depth. Regardless of sequences, the content and stock of TOC and TN to macroaggregates 19-8 mm was significantly superior than the other classes in all depths. There was linear and significant relation between the content and stock of TOC with the stratification ratio in macroaggregates of 19-8 mm. These results confirm the importance of no-tillage, that by the lack of soil disturbance and the continued contribution of crop residues, promotes the formation of more stable large macroaggregates (19-8 mm) and the physical protection of the organic matter in your interior, resulting in an increase of C and N content and storage in the soil.

Key words: soil aggregates, stratification ratio, C and N soil stock, no-tillage, crop sequences.

Introdução

A dinâmica da matéria orgânica em solos agrícolas é determinada pela diferença entre as quantidades de carbono aportadas e perdidas (Dalal e Mayer, 1986). A decomposição lenta e gradual dos resíduos culturais libera compostos orgânicos que estimulam a formação e a estabilidade de agregados (Tisdall e Oades, 1982; Six et.al., 2002). Em consequência, a matéria orgânica do solo (MOS) fica menos exposta aos processos microbianos, reduzindo a taxa de mineralização e resultando em menor fluxo

de CO₂ para a atmosfera (Reicosky, 1995). Esse mecanismo proporciona a proteção física da matéria orgânica do solo que atua como agente de ligação entre os microagregados na formação dos macroagregados (Six et al., 2002). A formação de agregados no SPD está associada com a taxa de macroagregação como o caminho para a proteção do C oriundo do fluxo contínuo da decomposição dos resíduos culturais (Sá et al., 2001; Diekow et al., 2009; Sá e Lal, 2009; Ferreira, 2009). A combinação das culturas de gramíneas com leguminosas em rotação forma a base do sistema plantio direto e parece proporcionar efeito intermitente na formação de macroagregados na camada superficial e direciona o solo a funcionar como um dreno de C (Sá e Lal, 2009). Dessa forma o solo torna-se um dreno de CO₂ atmosférico quando as adições de C são maiores que as perdas por oxidação.

Os sistemas de manejo que usam o preparo do solo para a produção vegetal constituem-se no principal fator dessas perdas. Os mecanismos envolvidos nesse processo são os seguintes: a) a ruptura dos agregados expõe a MOS, que está atuando como agente de ligação entre microagregados, à ação da biomassa microbiana; b) a mistura do material orgânico fresco com o solo resulta em condições mais favoráveis à decomposição; e c) o aumento na atividade da biomassa microbiana devido à maior aeração do solo e ao aumento da oferta de fonte de C facilmente oxidável, resultando em maior fluxo de mineralização de C (Elliot, 1986; Powlson et al., 1987; Reicosky et al., 1995).

Bayer (2005) reuniu resultados de vários experimentos realizados na região tropical (Cerrado, SP) e região Subtropical (Sul do Brasil) e encontrou que as taxas de seqüestro de C em solos (0-20 cm) sob plantio direto variam de -0,03 a 0,81 Mg ha⁻¹ ano, com valores médios de 0,35 Mg ha⁻¹ ano para solos da região Centro-Oeste e Sudeste e de 0,48 Mg ha⁻¹ ano para solos da região Sul. Em cada região as taxas de

seqüestro de C são bastante variáveis, em decorrência do tipo de solo (textura e mineralogia), condições climáticas (temperatura e precipitação) e sistema de rotação de culturas adotado (aporte de resíduos).

A rotação de culturas é considerada como um dos pilares para o sucesso do SPD devido aos inúmeros benefícios à melhoria da qualidade do solo e a resposta dos cultivos comerciais com o passar do tempo (Derpsch et al., 1985; Bayer et al., 2000; Sá, et al., 2001; Amado et al., 2006; Seguy et al., 2006). A fração lábil da matéria orgânica do solo é de particular interesse, por causa da sua contribuição no suprimento de nutrientes e por apresentar resposta mais rápida às mudanças nas práticas de manejo do solo (Sá e Lal, 2009). A adição contínua de resíduos culturais com relações C:N contrastantes proporciona fluxos diferenciados de C e N. Dessa forma, haverá períodos com elevado fluxo de C ou de N e outros com menor fluxo. É essa variação que proporciona o acúmulo de matéria orgânica no solo, porque ocorrerá sobreposição de resíduos em camadas em razão da resistência à decomposição dos resíduos com maior relação C:N. A relação de estratificação do COT foi proposta como um indicador eficiente da qualidade do solo (Franzluebbers, 2002; Díaz-Zorita e Grove, 2002), e seu aumento pode ser relacionado com a taxa e quantidade de seqüestro de COT (Franzluebbers, 2002; Moreno et al., 2006; Bayer et al., 2006, Sá e Lal, 2009).

A formação e a estabilidade dos agregados do solo estão estreitamente relacionadas com o conteúdo de COT e NT no solo, e estes por sua vez dependem do manejo do solo e da rotação de culturas adotada, que determinam a quantidade e a qualidade dos resíduos culturais adicionados ao solo. O objetivo deste estudo foi determinar o conteúdo e o estoque de COT e NT em classes de macroagregados e a relação de estratificação em função de diferentes sucessões de culturas em um Latossolo Vermelho sob plantio direto consolidado.

Material e métodos

Localização do experimento e descrição do meio físico

O presente estudo foi realizado na Estação Experimental da Fundação ABC, localizada no município de Ponta Grossa, estado do Paraná, situada geograficamente a 25°00' de Latitude Sul e 50°09' de Longitude Oeste, com altitude aproximada de 975 m. O clima da região, de acordo com a classificação de Köppen, é do tipo Cfb, subtropical úmido, com temperatura média anual de 18°C e precipitação média anual de, aproximadamente, 1550 mm. A tabela 1 apresenta a distribuição anual da temperatura e pluviosidade históricas da região (Iapar, 1998) e as ocorridas durante o período do experimento (out/2006 a set/2007).

Tabela 1. Média mensal da precipitação pluviométrica, temperatura máxima (T máxima) e temperatura mínima (T mínima) para o período de 44 anos (média histórica) e durante o período do experimento (out/06 à set/07).

Descrição	Meses												Média
	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	Out	Nov	Dez	
Média histórica†													
Pluviosidade	188	155	136	105	118	115	95	80	134	149	120	150	128.8
T máxima	28	27	26	24	22	20	20	22	23	24	26	27	24.1
T mínima	17	17	16	14	11	9	9	10	12	14	15	16	13.3
Período do Experimento††	Out	Nov	Dez	Jan	Fev	Mar	Abr	Mai	Jun	Jul	Ago	Set	
Pluviosidade	75	195	155	262	163	126	75	170	4	138	21	34	118.2
T máxima	27	28	30	29	30	32	28	23	25	21	24	28	27.1
T mínima	16	16	19	19	19	18	16	10	10	8	11	14	14.7

† Média histórica para o período de 44 anos, de janeiro à dezembro

†† Dados para o período do experimento (out/06 à set/07)

Fonte: IAPAR, estação meteorológica de Ponta Grossa.

O solo foi classificado como Latossolo Vermelho Distrófico típico, textura argilosa, profundo, muito bem estruturado e drenado, derivado de material retrabalhado de arenitos da formação Furnas e folhelhos da formação Ponta Grossa, ambos

sedimentos do período Devoniano. A composição florística natural da região, denominada Campos Gerais, caracteriza-se pela presença de gramíneas baixas, desprovidas de arbustos, ocorrendo apenas matos ou capões situados nas depressões em torno das nascentes (Maack, 1981). O relevo é suavemente ondulado com pendentes entre 2 a 7% de declividade.

Histórico e caracterização da área experimental

As avaliações foram feitas em um experimento sob plantio direto há longo período (18 anos), onde é avaliada anualmente a produção de palha de dez espécies de culturas de cobertura de inverno (aveia preta, aveia branca, azevém, ervilhaca, nabo forrageiro, centeio, triticale, canola, tremoço branco, tremoço azul) e as produtividades das culturas de verão (feijão, soja e milho). Em 1989 foi realizada a análise do solo na profundidade de 0 a 20 cm, antes da implantação do experimento original e em outubro de 2006, para a caracterização da fertilidade e textura do solo antes do início das avaliações do presente estudo, foram coletadas em cada parcela três amostras de solo na profundidade de 0-20 cm. As análises químicas foram realizadas conforme Pavan et al. (1992) e a composição granulométrica para a definição da classe textural foi determinada pelo método do densímetro (Embrapa, 1997) (Tabela 2).

Tabela 2. Resultados da análise química do solo antes da implantação do experimento original, em 1989, e resultados da análise química do solo e de textura no início das avaliações do presente estudo, em outubro de 2006, na profundidade de 0-20 cm.

Análise química do solo antes da implantação do experimento, em 1989										
pH	H + Al	Al	Ca	Mg	K	CTC	V	MO	P	
CaCl ₂	----- cmol _c dm ⁻³ -----		-----			%	g dm ⁻³	mg dm ⁻³		
5,1	5,83	0,13	2,91	2,14	0,33	11,2	46,7	38,5	6,5	
Análise química e de textura no início das avaliações do presente estudo, em outubro de 2006										
pH	H + Al ⁺³	Al ⁺³	Ca ⁺²	Mg ⁺²	K ⁺	CTC	P	Areia	Silte	Argila
CaCl ₂	----- cmol _c dm ⁻³ -----		-----			mg dm ⁻³	-----	g kg ⁻¹ -----		
5,7	4,6	0,1	6,1	3,1	0,6	14,3	10,3	328	223	449

Em abril de 1989 foi efetuada a correção da acidez do solo com 5,6 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico incorporado, além da adubação corretiva com 213 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 60,5 kg ha⁻¹ de K₂O à lanço. Como correção de manutenção foi adotado o critério de aplicar 2 toneladas de calcário superficialmente a cada 2 anos, antes do plantio das culturas de cobertura de inverno. O manejo das culturas de cobertura foi realizado com a aplicação de um herbicida de ação sistêmica (glifosate) no estágio de florescimento pleno. Posteriormente foi passado o rolo faca e quando os resíduos culturais estavam completamente secos, foi realizado o plantio das culturas de verão, de acordo com o calendário para cada cultura.

Modelo experimental

O experimento original foi constituído por 10 macroparcelas com as culturas de inverno (aveia preta, aveia branca, azevém, ervilhaca, nabo forrageiro, centeio, triticale, canola, tremoço branco, tremoço azul), de dimensão 10 x 50 m, e em sentido perpendicular a estas foram plantadas as culturas de verão (feijão, soja e milho), em macroparcelas de 16,67 x 100 m. O plantio das culturas de inverno é realizado em linhas, entre abril e maio, em função do ciclo das espécies. O plantio das culturas de verão é realizado entre outubro (milho) e novembro (soja e feijão). O sistema de rotação adotado é o de alternância entre gramíneas e leguminosas no inverno e a cada três anos a cultura do milho retorna na mesma área no verão. Portanto, são ciclos de 10 anos para as culturas de inverno e de 3 anos para as culturas de verão.

O modelo experimental do presente estudo consistiu de três macroparcelas com arranjo em parcelas subdivididas. Nas macroparcelas, de dimensão 10 x 50 m, foram plantadas as culturas de cobertura de inverno: aveia preta (*Avena strigosa Schieb*), ervilhaca (*Vicia sativa L.*) e nabo forrageiro (*Raphanus sativus L.*), sendo cada uma

destas macroparcelas dividida em três parcelas de 10 x 16,67 m, e sobre os resíduos culturais de inverno foram plantadas as culturas de verão: feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), soja (*Glycine max* L. Merrill) e milho (*Zea mays* L.). Nas parcelas foram comparadas as sucessões de culturas: aveia preta-feijão (Ap-F); aveia preta-milho (Ap-M); aveia preta-soja (Ap-S); ervilhaca-feijão (Er-F); ervilhaca-milho (Er-M); ervilhaca-soja (Er-S); nabo forrageiro-feijão (Nb-F); nabo forrageiro-milho (Nb-M) e nabo forrageiro-soja (Nb-S). As subparcelas foram constituídas pela profundidade de amostragem do solo (0-2,5; 2,5-5 e 5-10 cm), coletadas em outubro de 2007, sendo 3 repetições.

Avaliações e métodos de análises

Amostras indeformadas para a determinação da densidade do solo foram coletadas com anéis de aço inox com diâmetro de 5 cm e altura de 2,5 cm para as profundidades 0-2,5 e 2,5-5 e para a profundidade de 5-10 cm com anéis de 5 cm de altura, usando um trado amostrador de densidade, de acordo com Blake & Hartge (1986).

A determinação do carbono orgânico total (COT) e do nitrogênio total (NT) no solo foi realizada pelo método da combustão seca (Nelson & Sommers, 1982), utilizando um determinador elementar de C e N (TruSpec LECO modelo 2006, St. Joseph, EUA).

As amostras de agregados foram coletadas com o auxílio de uma espátula e ainda no campo foram passadas por peneira de 19 mm, com a finalidade de estabelecer um diâmetro máximo para os agregados (Madari, 2005).

Para cada amostra foi determinada a distribuição das classes de agregados por meio do tamisamento a úmido pelo método de Yoder (1936), adaptado por Castro Filho

et al. (1998), considerando as peneiras de malha 8, 4 e 2 mm. O solo retido em cada peneira foi transferido para frascos e colocados para secar em estufa a 60°C por 72 horas, sendo posteriormente pesados. Após a obtenção do peso do solo seco de cada classe de agregado, calculou-se a média entre as três classes iguais (triplicatas). A classe de solo mais fino foi considerada aquela que passou pela peneira de 2 mm, ficando dispersa no tamisador. Seu valor, em gramas, foi calculado subtraindo-se o somatório do peso das outras classes de agregados do peso total da amostra seca. Os valores obtidos foram usados para o cálculo do DMP e DMG de acordo com as expressões:

$$DMP = \sum_{i=1}^n (x_i \cdot w_i) \quad (\text{Eq. 1})$$

$$DMG = EXP \frac{\sum_{i=1}^n w_p \cdot \log x_i}{\sum_{i=1}^n w_i} \quad (\text{Eq. 2})$$

onde: w_i = proporção de cada classe de agregado em relação ao total;
 x_i = diâmetro médio das classes de agregados (mm);
 w_p = peso dos agregados de cada classe (g)

Nas amostras integrais e nas classes de macroagregados: 19-8, 8-4 e 4-2 mm foram determinados o conteúdo de COT e NT. O cálculo do estoque de C e N para as amostras integrais foi determinado com os dados do conteúdo de carbono orgânico total (COT) e nitrogênio total (NT) em g kg^{-1} , transformados para kg Mg^{-1} , na densidade do solo (DS) determinada em g cm^{-3} e transformada para Mg m^{-3} e no volume da profundidade de amostragem (VPA) em m^3 . Os resultados finais foram expressos em Mg ha^{-1} para cada profundidade amostrada, conforme a seguir:

$$\text{Estoque de C (Mg ha}^{-1}\text{)} = \text{COT (kg Mg}^{-1}\text{)} \times \text{DS (Mg m}^{-3}\text{)} \times \text{VPA (m}^3\text{)} \times 1000 \quad (\text{Eq. 3})$$

A partir dos valores do estoque de C e N calculados para as amostras integrais foi determinado o estoque de C e N para as classes de macroagregados, considerando a porcentagem correspondente a cada classe de agregado.

A relação de estratificação (RE) foi calculada conforme Franzluebbbers (2002) e Sá e Lal (2009), onde os valores do conteúdo e do estoque de COT da camada superficial do solo (0- 2,5 cm) foram divididos pelo valor da camada subsuperficial (5- 10 m).

Análise estatística

Os resultados foram submetidos à análise de variância (ANOVA), aplicando-se o teste F para identificar as diferenças entre os tratamentos, através do software Statistica. Para os efeitos significativos foi realizada a comparação de médias pelo teste de Tukey ao nível de 5% de probabilidade ($p < 0,05$). Para a obtenção das curvas de resposta foi utilizado o procedimento da análise de regressão pelo programa JMP IN versão 3.2.1 (Sall et al., 2005), utilizando-se o teste F para identificar o nível de significância.

Resultados e discussão

Indicadores de agregação do solo

O DMP apresentou diferença significativa entre as sucessões de culturas na profundidade 2,5-5 cm, onde a sucessão Ap-S apresentou o menor valor em relação as demais (Tabela 3). O DMG diferiu significativamente entre as sucessões de culturas somente na profundidade 0-2,5 cm, onde a sucessão Ap-F foi superior e igual as sucessões Nb-M e Ap-S, e estas superiores as demais (Tabela 3). A ausência de alteração significativa no DMP e DMG, exceto nas camadas mais superficiais,

provavelmente está relacionado ao longo período sob plantio direto na área experimental, e de acordo com Sá (2004) esta situação representa o sistema plantio direto consolidado, onde não são esperadas alterações expressivas.

Tabela 3. Comparação entre as sucessões de culturas para DMP e DMG em cada profundidade.

Sucessão de culturas	DMP			DMG		
	Profundidade (cm)					
	0-2,5	2,5-5,0	5,0-10,0	0-2,5	2,5-5,0	5,0-10,0
M/ Ap-F	9,33	11,03 a	11,58	9,46 a	8,78	9,42
S/ Ap-M	9,79	10,21 ab	10,48	8,17 b	8,37	8,67
F/ Ap-S	7,73	8,95 b	10,79	8,97 ab	8,88	8,73
M/ Er-F	9,18	10,69 a	10,67	8,82 ab	8,69	8,52
S/ Er-M	10,11	10,61 ab	11,00	8,68 ab	8,66	8,87
F/ Er-S	9,15	10,21 ab	10,76	8,86 ab	8,46	8,47
M/ Nb-F	10,34	10,62 ab	10,89	8,65 ab	8,32	8,39
S/ Nb-M	10,48	10,71 a	10,96	8,98 ab	9,06	8,84
F/ Nb-S	9,71	10,83 a	11,17	8,32 b	8,20	8,73

Tratamentos com letras iguais na coluna não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

† Sucessão de culturas (em negrito período do presente estudo e antes da barra representa a cultura de verão que antecedeu o período do presente estudo): Milho/**Aveia preta-Feijão** (M/**Ap-F**); Soja/**Aveia preta-Milho** (S/**Ap-M**); Feijão/**Aveia preta-Soja** (F/**Ap-S**); Milho/**Ervilhaca-Feijão** (M/**Er-F**); Soja/**Ervilhaca-Milho** (S/**Er-M**); Feijão/**Ervilhaca-Soja** (F/**Er-S**); Milho/**Nabo forrageiro-Feijão** (M/**Nb-F**); Soja/**Nabo forrageiro-Milho** (S/**Nb-M**); Feijão/**Nabo forrageiro-Soja** (F/**Nb-S**)

Além disso, o sistema de rotação adotado nesta área é de alternância entre gramíneas e leguminosas no inverno e a cada três anos a cultura do milho retorna na mesma área no verão. Isto deixa a área ainda mais equilibrada quanto a modificações extremas. Na realidade o que ocorre são modificações de curto prazo, relacionadas ao aporte imediato dos resíduos culturais e seus reflexos, principalmente na matéria orgânica particulada. Liu et al. (2005) registrou que o uso de culturas de cobertura aumentou o DMP, o C-orgânico total, o N total e os polissacarídeos diluídos extraídos em ácido, refletindo no aumento e estabilização dos agregados do solo.

Independente das sucessões de culturas, o DMP foi significativamente menor na profundidade de 0-2,5 cm em relação às demais e para o DMG não houve diferença significativa entre as profundidades (Figura 1). A camada superficial de 0-2,5 cm é a mais suscetível a modificações por ser a que está diretamente em contato com os resíduos culturais continuamente aportados e também por sofrer leve perturbação com

as operações de plantio que se sucedem a cada safra. Comparando plantio direto com plantio convencional, Castro Filho et al. (1998) concluiu que independente das sucessões de culturas, os valores de DMP e DMG foram superiores no plantio direto.

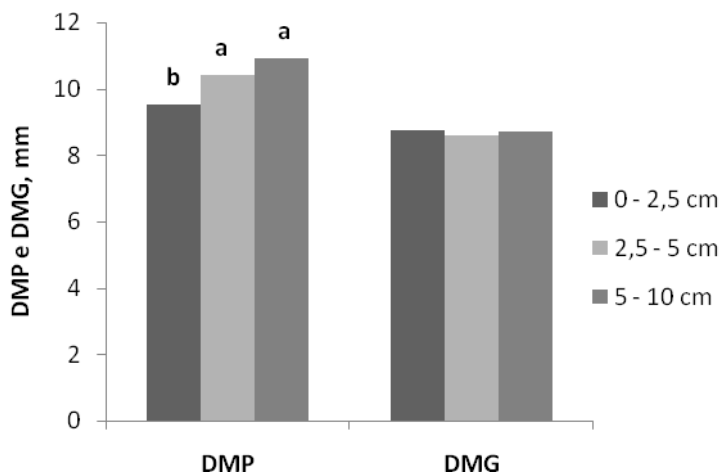


Figura 1. DMP e DMG em função das profundidades
Tratamentos com letras iguais não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Conteúdo de C e N nas classes de macroagregados

A porcentagem da classe de macroagregados de 19-8 mm foi significativamente superior as demais, e representou 71,9% na média das sucessões e profundidades (Tabela 4). Esses resultados são similares aos obtidos por Ferreira (2009) em um Latossolo Vermelho na mesma região do presente estudo. Constatou-se também que a classe de macroagregados de 19-8 mm apresentou diferença significativa com o aumento da profundidade, sendo maior a porcentagem de agregados nas profundidades de 2,5-5 e 5-10 cm (Tabela 4). Para a classe de agregados 8-4 mm não houve diferença significativa em relação à profundidade e para a classe de agregados 4-2 mm a maior porcentagem de agregados ocorreu na profundidade de 0-2,5 cm que foi maior e igual a 2,5-5 cm e esta maior que 5-10 cm. Isto indica que o PD com cobertura permanente do solo resulta na proteção das classes de macroagregados grandes.

Tabela 4. Porcentagem da classe de agregado em cada profundidade de amostragem, média das sucessões.

Profundidade (cm)	Classe de Agregado (%)		
	19-8 mm	8-4 mm	4-2 mm
0 - 2,5	65,65 bA	5,32 B	3,16 aB
2,5 - 5	72,88 aA	5,22 B	2,90 abC
5 - 10	77,10 aA	4,70 B	2,55 bC

Tratamento com letras minúsculas iguais na coluna e maiúsculas iguais na linha não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Observou-se estreita relação entre a massa das classes de agregados e a porcentagem de C nas classes de agregados, cujas equações de regressão linear apresentaram elevados coeficientes de determinação e nível de significância (Figura 2). Castro Filho et al. (1998) reporta que o aumento de C-orgânico resultou no aumento dos índices de agregação pela diminuição das classes de agregados de menor diâmetro e aumento das classes de maior diâmetro. Madari (2004) enfatiza a importância de se considerar a classe de agregados 19-8 mm para o estudo de agregados no solo, principalmente para o sistema plantio direto, pois o mesmo propicia a formação de agregados maiores e mais estáveis em água quando comparado ao sistema de plantio convencional. Além disso, essa classe de agregados é muito influenciada pelo efeito dos resíduos culturais e dos agentes de agregação temporários (Duxbury et al., 1989; Six et al., 2006).

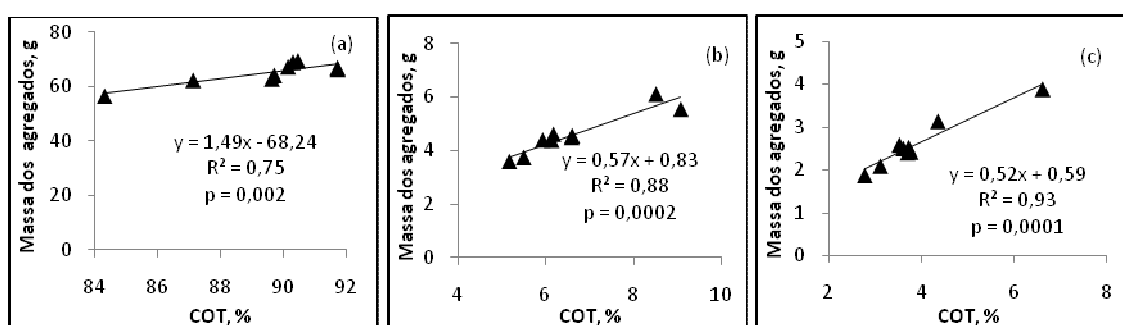


Figura 2. Regressão linear entre a massa da classe de agregado e a porcentagem de COT, na camada de 0-10 cm: (a) classe de agregados de 19-8 mm; (b) 8-4 mm e (c) 4-2 mm.

O conteúdo de C não diferiu significativamente entre as sucessões de culturas para a classe de agregados 19-8 mm em cada profundidade (Tabela 5). Para a classe de agregados 8-4 mm não houve diferença significativa para o conteúdo de C entre as sucessões de culturas na profundidade 0-2,5 cm, porém, na profundidade 2,5-5 cm, a sucessão Ap-S apresentou o maior conteúdo de C ($2,92 \text{ g kg}^{-1}$) e as sucessões Ap-F, Nb-F, Er-M e Nb-S apresentaram os menores conteúdos ($1,31$, $1,09$, $1,41$ e $1,03 \text{ g kg}^{-1}$), respectivamente e as demais sucessões apresentaram valores intermediários e não diferiram entre si (Tabela 5). Na mesma classe de agregados na profundidade 5-10 cm não houve diferença significativa para o conteúdo de C entre as sucessões de culturas (Tabela 5). Para a classe de agregados 4-2 mm na profundidade de 0-2,5 cm, a sucessão Ap-S apresentou o maior conteúdo de C ($2,12 \text{ g kg}^{-1}$) e a sucessão Nb-F o menor conteúdo ($0,91 \text{ g kg}^{-1}$), enquanto as demais sucessões não diferiram entre si e apresentaram conteúdo intermediário (Tabela 5). Nesta mesma classe de agregados na profundidade 2,5-5,0 cm, também a sucessão Ap-S apresentou o maior conteúdo de C ($2,07 \text{ g kg}^{-1}$), sendo este maior e igual a sucessão Ap-M ($1,21 \text{ g kg}^{-1}$), enquanto as demais sucessões foram iguais entre si, com menor conteúdo de C (Tabela 5). Para a profundidade 5-10 cm, na classe de agregados 4-2 mm não houve diferença significativa entre as sucessões de culturas.

Tabela 5. Comparação entre as sucessões de culturas para o conteúdo de COT (g kg^{-1}) e para o estoque de COT (Mg ha^{-1}) em cada classe de agregado e profundidade.

Sucessão de culturas†	Conteúdo de COT, g kg^{-1}			Estoque de COT, Mg ha^{-1}		
	Classes de agregados					
	19-8 mm	8-4 mm	4-2 mm	19-8 mm	8-4 mm	4-2 mm
	----- 0 - 2,5 cm -----					
M/Ap-F	21,55	2,15	1,36 ab	10,17	1,00	0,64 ab
M/Er-F	20,73	1,63	1,07 ab	9,91	0,79	0,51 ab
M/Nb-F	22,11	1,37	0,91 b	10,14	0,61	0,40 ab
S/Ap-M	26,43	2,18	1,32 ab	12,05	0,99	0,59 ab
S/Er-M	25,77	2,00	1,19 ab	8,71	0,72	0,42 ab
S/Nb-M	25,23	1,73	1,00 ab	9,39	0,67	0,38 b
F/Ap-S	24,26	2,69	2,12 a	10,59	1,32	1,06 a
F/Er-S	22,20	1,99	1,21 ab	9,48	0,85	0,52 ab
F/Nb-S	24,82	2,23	1,03 ab	8,72	0,87	0,37 b
	----- 2,5 - 5,0 cm -----					
M/Ap-F	25,69	1,31 b	0,78 b	10,37 ab	0,54 b	0,32 b
M/Er-F	23,30	1,63 ab	0,79 b	10,24 ab	0,70 b	0,33 b
M/Nb-F	21,37	1,09 b	0,66 b	8,07 b	0,41 b	0,25 b
S/Ap-M	25,79	2,42 ab	1,21 ab	9,29 ab	0,90 ab	0,45 b
S/Er-M	23,20	1,41 b	0,93 b	8,93 ab	0,55 b	0,35 b
S/Nb-M	22,13	1,61 ab	0,89 b	7,73 b	0,59 b	0,33 b
F/Ap-S	24,07	2,92 a	2,07 a	13,02 a	1,59 a	1,10 a
F/Er-S	23,21	1,78 ab	0,93 b	9,08 ab	0,74 b	0,39 b
F/Nb-S	24,61	1,03 b	0,65 b	8,01 b	0,33 b	0,21 b
	----- 5,0 - 10 cm -----					
M/Ap-F	20,01	0,99	0,56	13,92	0,70	0,38 bc
M/Er-F	18,79	1,30	0,69	14,94	1,02	0,55 abc
M/Nb-F	18,30	1,02	0,54	13,94	0,76	0,40 bc
S/Ap-M	18,13	2,04	0,92	14,81	1,63	0,74 ab
S/Er-M	19,81	1,23	0,72	15,62	0,98	0,57 abc
S/Nb-M	18,75	1,10	0,63	16,11	0,95	0,54 abc
F/Ap-S	18,42	1,25	0,84	19,61	1,36	0,87 a
F/Er-S	20,34	1,08	0,60	14,87	0,80	0,45 bc
F/Nb-S	22,20	0,99	0,48	14,62	0,68	0,32 c

Tratamento com letras iguais na coluna, para cada profundidade, não diferem pelo teste de Tukey a 5%.

† Sucessão de culturas (em negrito período do presente estudo e antes da barra representa a cultura de verão que antecedeu o período do presente estudo): Milho/Aveia preta-Feijão (M/Ap-F); Milho/Ervilhaca-Feijão (M/Er-F); Milho/Nabo forrageiro-Feijão (M/Nb/F); Soja/Aveia preta-Milho (S/Ap-M); Soja/Ervilhaca-Milho (S/Er-M); Soja/Nabo forrageiro-Milho (S/Nb/M); Feijão/Aveia preta-Soja (F/Ap-S); Feijão/Ervilhaca-Soja (F/Er-S); Feijão/Nabo forrageiro-Soja (F/Nb-S)

As sucessões alteraram o estoque de COT na profundidade de 0-2,5 cm, somente na classe de agregados de 4-2 mm, onde a sucessão Ap-S apresentou o maior valor ($1,06 \text{ Mg ha}^{-1}$) e as sucessões Nb-M e Nb-S apresentaram os menores valores ($0,38$ e $0,37 \text{ Mg ha}^{-1}$), enquanto as demais foram intermediárias e iguais entre si (Tabela 5). Para a profundidade 2,5-5 cm na classe de agregados 19-8 mm, o maior estoque de COT ocorreu na sucessão Ap-S e os menores foram nas sucessões Nb-F, Nb-S e Nb-M, sendo as demais intermediárias e iguais entre si (Tabela 5). Na mesma profundidade, para a classe de agregados 8-4 mm, a sucessão Ap-S também foi significativamente superior

no estoque de COT, seguida pela Ap-M e as demais foram inferiores. Na classe de agregados 4-2 mm para a mesma profundidade, a sucessão Ap-S foi significativamente superior as demais. Em contraste na profundidade 5-10 cm nas classes de agregados 19-8 e 8-4 mm, o estoque de COT nas sucessões de culturas não apresentou diferença significativa (Tabela 5). Na classe de agregados 4-2 mm na profundidade 5-10 cm, o estoque de C foi significativamente superior para a sucessão Ap-S, sendo inferior para a sucessão Nb-S e as demais foram intermediárias.

De modo geral, as sucessões que envolveram a cultura do feijão no verão e ou as que envolveram a cultura de cobertura do nabo forrageiro no inverno apresentaram os menores conteúdos e estoques de C. Por outro lado, as sucessões que envolveram a cultura do milho e da soja no verão e ou a cultura de cobertura da aveia preta no inverno apresentaram os maiores conteúdos e estoques de C. Isto evidência a importância das gramíneas, culturas com relação C:N mais elevada, para o aumento de C no solo. Estas culturas, em função de sua alta relação C:N decompõem mais lentamente quando comparadas as leguminosas, como o feijão e a ervilhaca. Por sua vez a soja, apesar de ser uma leguminosa, apresenta uma relação C:N relativamente alta e maior conteúdo de celulose em comparação com o feijão, aproximando-se mais do comportamento do milho que do feijão quanto à velocidade de decomposição. A sucessão Ap-S apresentou o maior estoque de COT, independente da profundidade e classe da agregado. Calegari et al.(2008) reportou que as maiores concentrações de COT foram obtidas respectivamente pelos seguintes tratamentos de inverno: tremoço azul > aveia preta > nabo > ervilhaca peluda > trigo > pousio. A contribuição das raízes na formação, manutenção e tamanho dos agregados foi detalhada por Six et al. (2006), onde estes autores sugerem que as raízes de gramíneas estão associadas à liberação de polissacarídeos e elevada colonização por hifas de micorrizas e por isso são mais

eficientes no aumento da estabilidade de agregados do solo. Assim, as diferentes práticas de manejo que propiciam maior e melhor enraizamento das culturas, bem como a presença de gramíneas na rotação de culturas, melhoram os processos de agregação do solo.

Independente das sucessões, o conteúdo de COT (g kg^{-1}) e o estoque de COT (kg ha^{-1}) na classe de agregados 19-8 mm foi significativamente superior as demais classes de agregados em todas as profundidades (Tabela 6). Esse resultado reforça o fato de que o sucesso do SPD está na qualidade da camada superficial como elo de ligação com o perfil do solo. Com relação à profundidade, o conteúdo de COT (g kg^{-1}) para todas as classe de agregados foi significativamente superior na camada de 0-2,5 cm e decresceu em profundidade, sendo significativamente inferior na camada de 5-10 cm (Tabela 6), indicando que o maior acúmulo de matéria orgânica na camada superficial é consequência do aporte contínuo de resíduos culturais no sistema de plantio direto. A soma dos estoques das profundidades 0-2,5 e 2,5-5 cm supera o estoque de COT da camada de 5-10 cm para todas as classes de agregados (Tabela 6), confirmando que o sistema de plantio direto através do aporte contínuo de resíduos culturais reflete no estoque de carbono no solo, com maior expressão nas camadas superficiais, principalmente considerando o curto intervalo de tempo (1 ano). O comportamento do nitrogênio foi semelhante ao carbono (Tabela 6). Independente da profundidade constatou-se relação linear significativa entre C e N para todas as classes de agregados ($R^2 = 0,99$; $p < 0,0001$).

Tabela 6. Média das sucessões para COT e NT em função das classes de agregados e profundidades

Profundidade de Amostragem (cm)	Conteúdo de COT			Estoque de COT		
	g kg ⁻¹			Mg ha ⁻¹		
	19-8 mm	8-4 mm	4-2 mm	19-8 mm	8-4 mm	4-2 mm
0 - 2,5	23,68 aA	2,00 aB	1,25 aB	9,91 A	0,87 B	0,54 B
2,5 - 5	23,71 aA	1,69 aB	0,99 bB	9,42 A	0,71 B	0,42 B
5 - 10	19,42 bA	1,22 bB	0,66 cB	15,38 A	0,99 B	0,54 B
	Conteúdo de NT			Estoque de NT		
0 - 2,5	1,49 A	0,12 aB	0,07 aB	0,62 A	0,05 B	0,03 C
2,5 - 5	1,56 A	0,11 abB	0,06 aB	0,72 A	0,05 B	0,03 C
5 - 10	1,45 A	0,09 bB	0,05 bC	1,50 A	0,09 B	0,05 C

Tratamento com letras minúsculas iguais na coluna e letras maiúsculas iguais na linha não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Independente das sucessões, não foi constatada diferença significativa para a relação C:N entre as classes de agregados nas profundidades avaliadas. Porém, a relação C:N foi significativamente superior na profundidade 0-2,5 cm em relação à profundidade 2,5-5 cm, que por sua vez foi significativamente superior em relação à profundidade 5-10 cm (Figura 3). Esses resultados coincidem com os reportados por outros autores (Castro Filho et al., 1998; Madari, 2005)

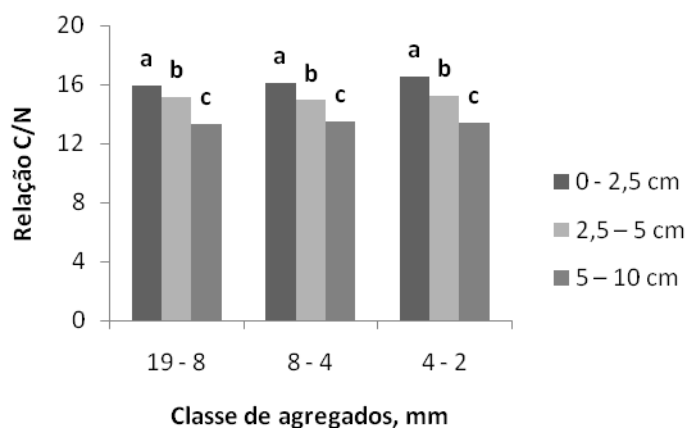


Figura 3. Comportamento da relação C:N nas classes de agregados em função da profundidade. Tratamentos com letras iguais não diferem pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

A sucessão Ap-S apresentou a maior relação C:N e foi significativamente superior as demais sucessões de culturas, independente da classe de agregado e profundidade.

Relação de estratificação do COT e acúmulo de C

A relação linear significativa entre o conteúdo e o estoque de COT com a relação de estratificação (RE, 0-2,5:5-10 cm) indica que o aumento do estoque de COT está sendo representado pelo aumento da estratificação do COT nos macroagregados (19-8 mm) (Figura 4). Este comportamento resume o princípio do SPD que integra as adições contínuas de C através dos resíduos culturais com o processo de decomposição, no qual parte do C é convertido em COT no solo e o restante retorna à atmosfera na forma de CO₂. Estes resultados confirmam os argumentos apresentados por outros autores (Amado et al, 2006; Bayer et al, 2006; Cerri et al, 2007) de que o SPD consolidado está direcionando o solo para atuar como um dreno de C. Sendo assim, a adição contínua de C pelos resíduos culturais vai enriquecendo a camada superficial do perfil do solo, promovendo o aumento da relação de estratificação e do potencial de sequestro de C no solo (Sá e Lal, 2009). Estes macroagregados propiciam a proteção física da matéria orgânica, reduzindo a oxigenação e a ação microbiana, favorecendo a decomposição lenta e gradual dos resíduos culturais, com conseqüente aumento da concentração e do estoque de C no solo.

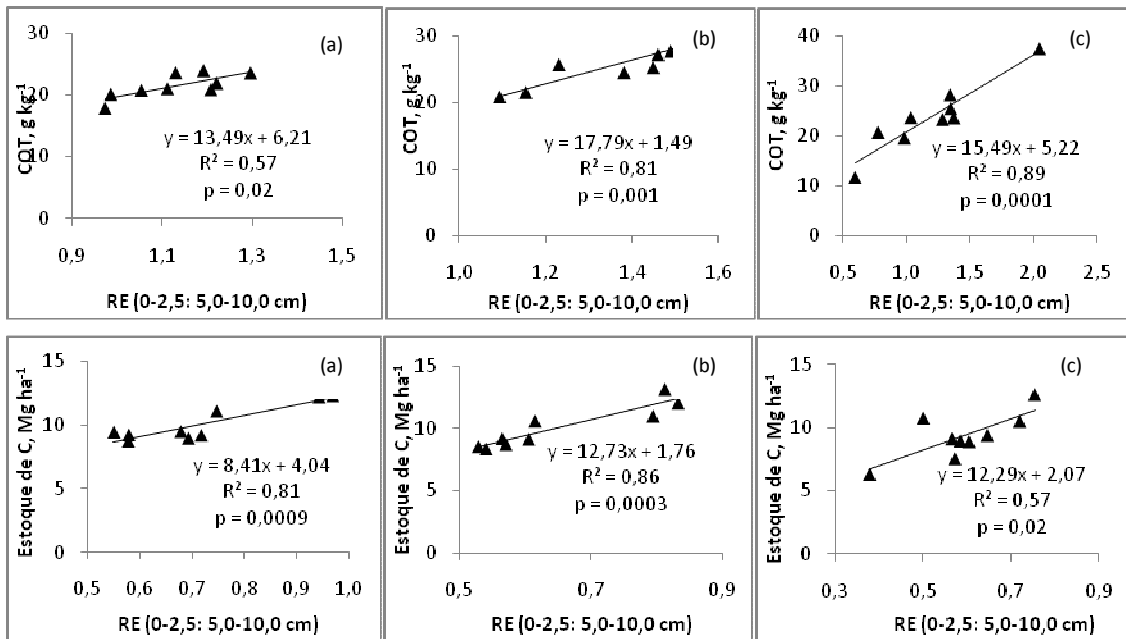


Figura 4. Relação entre conteúdo de COT (g kg⁻¹) e estoque de COT (Mg ha⁻¹) com a relação de estratificação (RE), 0-2,5: 5-10 cm, para a classe de agregado de 19-8 mm nas sucessões com: (a) Feijão, (b) Milho e (c) Soja.

A redução no conteúdo de COT nas camadas mais profundas do solo, indicando a ocorrência de uma estratificação entre a camada superficial e a subsuperficial devido à adição contínua de C pelos resíduos orgânicos, enriquecendo a camada superficial do perfil do solo foi reportada por outros autores (Dick, 1983; Rasmussen and Parton, 1994; Sá, 1999; Franzluebbbers, 2002; Díaz-Zorita e Grove, 2002; Franzluebbbers et al., 2007; Sá & Lal, 2009; Ferreira, 2009). Esse enriquecimento mantém a qualidade do solo através da melhor agregação, facilitando as trocas gasosas e fluxo de água no perfil (Doran & Parking, 1994; Franzluebbbers, 2007). A relação de estratificação (0-2,5: 5-10 cm) foi 1,23 na média das sucessões para a classe de agregados 19-8 mm. Tormena et al. (2004) verificaram que a RE (0-5:10-20 cm) em um Latossolo Vermelho muito argiloso (> 600 g kg⁻¹) sob plantio direto da região de Palotina, PR foi 1,73. Enquanto Sá e Lal (2009), na região dos Campos Gerais, em um Latossolo Vermelho argiloso (450 g kg⁻¹ de argila) registraram que a média da RE (0-5: 5-10 cm) do COT foi de 1,48 e também constataram a estreita relação entre a RE (0-5: 5-10 cm) do COT com a taxa

de seqüestro de C para a camada de 0-10 cm, sugerindo que a interação desses parâmetros pode ser utilizada como indicadora do seqüestro de C em áreas sob plantio direto consolidado.

Segundo Franzluebbbers (2002) e Sá e Lal (2009) a alta relação de estratificação de C do solo representa a alta qualidade da camada superficial do solo, direcionando para a melhor infiltração e rápida transmissão de água no perfil do solo e uma maior estabilidade de agregados. No presente estudo ficou demonstrado que a RE acompanhou o aumento de estoque de COT, confirmando a hipótese sobre o uso deste parâmetro como indicador do seqüestro de C sob plantio direto de longa duração.

Conclusões

Independente das sucessões de culturas, o DMP foi significativamente menor na profundidade de 0-2,5 cm em relação às demais e para o DMG não houve diferença significativa entre as profundidades. Constatou-se relação linear positiva e significativa entre a massa das classes de agregados e a porcentagem do COT nas classes de agregados. A porcentagem da classe de macroagregados de 19-8 mm foi significativamente superior às demais, e representou 71,9% na média das sucessões e profundidades. As sucessões envolvendo a cultura do milho e da soja no verão e a cultura de cobertura da aveia preta no inverno apresentaram os maiores conteúdos e estoques de COT nos macroagregados do solo. Em contraste, as sucessões envolvendo a cultura do feijão no verão e a cultura de cobertura do nabo forrageiro no inverno apresentaram os menores conteúdos e estoques de COT nos macroagregados do solo. A sucessão de cultura que apresentou o maior estoque de COT no solo foi a aveia preta-soja (Ap-S) e a relação C:N desta sucessão foi significativamente superior as demais sucessões de culturas, independente da classe de agregado e profundidade. O conteúdo

(g kg⁻¹) e o estoque (kg ha⁻¹) de COT e NT na classe de agregados 19-8 mm, independente das sucessões, foi significativamente superior as demais classes de agregados em todas as profundidades. Independente das sucessões, o conteúdo de COT (g kg⁻¹) para cada classe de agregados foi significativamente superior na camada de 0-2,5 cm e decresceu em profundidade, indicando uma relação de estratificação entre as camadas do solo. A relação C:N não apresentou diferença significativa entre as classes de agregados em cada profundidade, mas foi significativamente superior na profundidade 0-2,5 cm em relação à profundidade 2,5-5 cm, que por sua vez foi significativamente superior em relação à profundidade 5-10 cm, confirmando a relação de estratificação no perfil do solo. Constatou-se relação linear significativa entre o conteúdo e o estoque de COT com a relação de estratificação entre as camadas do solo para a classe de agregados de 19-8 mm, demonstrando que a RE acompanhou o aumento do estoque de COT no solo, confirmando assim a hipótese sobre o uso deste parâmetro como indicador do sequestro de C sob plantio direto de longa duração.

Agradecimentos

À Fundação Agrisus pelo apoio financeiro para o desenvolvimento deste estudo.

Referências bibliográficas

- AMADO, T.J.C., BAYER, C., CONCEIÇÃO, P.C., SPAGNOLLO, E., CAMPOS, B.H.C. & VEIGA, M. Potential of carbon accumulation in no-till soils with intensive use and cover crops in Southern Brazil. *J. Environ. Qual.*, 35:1599-1607, 2006.
- BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A. & DIECKOW, J. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. *Soil Tillage Res.*, 86:237-245, 2006.
- BAYER, C. & DIECKOW, J. Metodologia para determinação do sequestro de carbono em solos sob plantio direto no Brasil. *Simpósio sobre plantio direto e meio ambiente – sequestro de carbono e qualidade da água. Anais. Federação Brasileira de Plantio Direto na Palha*, 2005. p. 58-62.

- BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J. & PAVINATO, A. Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 39:677-683, 2004.
- BLAKE, G.R.; HARTGE, K.H. Bulk Density. In: KLUTE, A. (Ed). *Methods of soil analysis*. 2. ed. Part 1: Physical and mineralogical methods. Madison, ASA, 1986. p. 363-376.
- CALEGARI, A.; HARGROVE, W.L.; RHEINHEIMER, D.S.; RALISCH, R.; DANIEL TESSIER, D.; TOURDONNET, S. & GUIMARÃES, M.F. Impact of long-term no-tillage and cropping system management on soil organic carbon in an Oxisol: a model for sustainability. *Agronomy Journal*, 100:1013-1019, 2008.
- 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 das amostras. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 22:527-538, 1998.
- CERRI, C.E.P.; SPAROVEK, G.; BERNOUX, M.; EASTERLING, W.E.; MELILLO, J.M. & CERRI, C.C. Tropical agriculture and global warming: impacts and mitigations options. *Sci. Agric.*, 64:83-99. 2007.
- DALAL, R.C. & MAYER, R.J. Long-term trends in fertility of soils under continuous conservation and cereal cropping in Southern Queensland. II. Total organic carbon and its rate of loss from the soil profile. *Australian Journal of Soil Research*, 24:281-292, 1986b.
- DERPSCH, R., SIDIRAS, N. & HEINZMANN, F.X. Manejo do solo com coberturas verdes de inverno. *Pesq. Agrop. Bras.*, 20:761-773, 1985.
- DIECKOW, J.; BAYER, C.; CONCEIÇÃO, P.C.; ZANATTA, J.A.; MARTIN-NETO, L.; MILORI, D.B.M.; SALTON, J.C.; MACEDO, M.M.; MIELNICZUK, J. & HERNANI, L.C.. Land use, tillage, texture and organic matter stock and composition in tropical and subtropical Brazilian soils. *European Journal of Soil Science*, 60:240-249, 2009.
- DICK, W.A. Organic carbon, nitrogen and phosphorus concentrations and pH profiles as affected by tillage intensity. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 47, 102-107, 1983.
- DÍAZ-ZORITA, M. & GROVE, J.H., Duration of tillage management affects carbon and phosphorus stratification in phosphatic Paleudalfs. *Soil Till. Res.*, 66:165-174, 2002.
- DORAN, J.W. & PARKIN, T.B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D.F. & STEWART, B.A. eds. *Defining soil quality for a sustainable environment*. Madison, Soil Science Society of America, 1994. p.3-22. (Publication Number, 35).
- DUXBURY, J.M.; SMITH, M.S. & DORAN, J.W. Soil organic matter as a source and sink of plant nutrients. In: COLEMAN, D.C.; OADES, J.M. & UEHARA, G. (Ed.) *Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems*. Honolulu, University of Hawaii Press, NifTAL Project, 1989. p.33-67.
- ELLIOT, E. T. Aggregate structure and carbon, nitrogen and phosphorus in natives and cultivated soils. *Soil Science Society of America Journal*, 50:627-633, 1986.
- EMBRAPA - Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. *Manual de métodos de análise do solo*. 2 Ed. Rio de Janeiro, RJ, 1997. p. 212.
- FERREIRA, A.O. Compartimentos da matéria orgânica do solo como indicadores do sequestro de carbono em sistema plantio direto de longa duração. *Dissertação de Mestrado em Agronomia – Universidade Estadual de Ponta Grossa-PR*, 2009.

- FRANZLUEBBERS, A.J. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. *Soil & Tillage Research Res.*, 66:95-106, 2002.
- FRANZLUEBBERS, A.J., SCHOEMBERG, H.H., ENDALE, D.M. Surface-soil responses to paraplowing of long-term no-tillage cropland in the Southern Piedmont USA. *Soil Till. Res.*, 96: 303-315, 2007.
- IAPAR - Instituto Agronômico do Paraná. Dados climáticos. Londrina, PR, 1998.
- LIU, A.; MA, B.L. & BOMKE, A.A. Effects of cover crops on soil aggregate stability, total organic carbon e polyssacarides. *Soil Science Society of America Journal*, 69: 2041-2048. 2005.
- MAACK, R. Geografia Física do Paraná. 2nd ed. Rio de Janeiro, Livraria José Olímpio Editora S.A., 1981. 355p.
- MADARI, B. E. Procedimento para uma estimativa compartimentada do seqüestro de carbono no solo. In: *Matéria Orgânica do Solo - Comunicado Técnico Embrapa nº 22*, 2004.
- MORENO, F., MURILLO, J.M., PELEGRÍN, F., GIRÓN, I.F. Long-term impact of conservation tillage on stratification ratio of soil organic carbon and loss of total and active CaCO₃. *Soil Till. Res.* 85:86-93, 2006.
- NELSON, P.W. & SOMMERS, C.E. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: PAGE, A.L. (Ed.). *Methods of soil analysis*, Madison, Soil Science Society of America, pt.2, 1982. p.539-579. (SSSA. Agronomy Monograph, 9).
- PAVAN, M.A.; BLOCH, M.F.; ZEMPULSKI, H.C.; MIYAZAWA, M. & ZOCOLER, P.C. Manual de análise química do solo e controle de qualidade. Instituto Agronômico do Paraná (IAPAR), 1992. 38p. (Circular 76).
- POWLSON, D.S.; BROOKES, P.C.; CHRISTENSEN, B.T. Mensurament of soil microbial biomass provides an early indication of changes in total soil organic matter due to straw incorporation. *Soil Biology and Biochemistry*, 19:159-164, 1987.
- RASMUSSEN, P.E. & PARTON, W.J. Long-term effects of residue management in wheat-fallow. I. Inputs, yield, and soil organic matter. *Soil Sci. Soc. Am. J.* 58: 523-530, 1994.
- REICOSKY, D.C.; KEMPER, W.D.; LANGDALE, G.W.; DOUGLAS JR., C. L. & RASMUSSEN, P.E. Soil organic matter changes resulting from tillage and biomass production. *J. Soil Water Conservation.* 50:253-261, 1995.
- SÁ, J. C. M & R. LAL. Stratification ratio of soil organic matter pools as an indicator of carbon sequestration in a tillage chronosequence on a Brazilian Oxisol. *Soil & Tillage Research. Res.*, 103:46-56, 2009.
- SÁ, J.C.M.; CERRI, C.C.; PICCOLO, M.C.; FEIGL, B.E.; BUCKNER, J.; FORNARI, A.; SÁ, M.F.M.; SEGUY, L.; BOUZINAC, S.; VENZKE-FILHO, S.P.; PAULLETI, V. & NETO, M.S. O plantio direto como base do sistema de produção visando o seqüestro de carbono. *Revista Plantio Direto*, 84:45-62, 2004.
- SÁ, J.C.M.; CERRI, C.C.; LAL, R.; DICK, W.A.; VENZKE FILHO, S.P.; PICCOLO, M. & FEIGL, B. Organic matter dynamics and sequestration rates for a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65:1486-1499, 2001.
- SALL, J.; CREIGHTON, L.; LEHMAN, A. *JMP start statistics: a guide to statistics and data analysis using JMP and JMP IN software*. 3rd ed. Cary, Duxbury Press, 2005. 580p.
- SANTOS, J B. Alterações no estoque e taxa de seqüestro de carbono em um Latossolo Vermelho submetido a sistemas de manejo. Dissertação de Mestrado, Curso de Pós-Graduação em Agronomia, Universidade Estadual de Ponta Grossa-PR, 2006.

- SÉGUY, L.; BOUZINAC, S. & HUSSON, O. Direct-Seeded tropical soil systems with permanent soil cover: learning from Brazilian experience. In N. Uphoff et al., (eds) *Biological approaches to sustainable soil systems*. Taylor and Francis Group, Boca Raton, CRC Press Publ., 2006. p.323-342
- SIX, J.; Frey, S.D.; THIET, R.K. & BATTEN, K.M. Bacterial and Fungal Contributions to Carbon Sequestration in Agroecosystems. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 70:555-569, 2006.
- SIX, J.; FELLER, C.; DENEFF, K.; OGLE, S.M.; SÁ, J.C.M. & ALBRECHT, A. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils: effect of no-tillage. *Agronomie*, 22:755-775, 2002.
- TISDALL, J.M. & OADES, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.*, 33:141-163, 1982.
- TORMENA, C.A.; FRIEDRICH, R.; PINTRO, J.C.; COSTA, A.C.S. & FIDALSKI, J. Propriedades físicas e taxa de estratificação de carbono orgânico num Latossolo Vermelho após dez anos sob dois sistemas de manejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 28(2):1023-1031, 2004.
- YODER, R.E. A direct method of aggregate analysis of soils and a study of the physical nature of erosion losses. *J. Am. Soc. Agr.*, 28:337-351, 1936.

9. CONCLUSÕES GERAIS

O aporte de diferentes tipos de resíduos no sistema de plantio direto altera a dinâmica do processo de decomposição e conseqüentemente a conversão de C dos resíduos para o estoque de C no solo. Sucessões de cultura com elevada relação C:N vão direcionar para uma decomposição mais lenta e gradual e, ao contrário, espécies com relação C:N mais baixa aceleram o processo de decomposição. Este efeito ficou evidenciado nos resultados deste estudo, em que as sucessões com a ervilhaca no inverno e ou com o feijão no verão apresentaram mais rápida decomposição que as sucessões que incluíram aveia preta no inverno e milho ou soja no verão. A taxa de decomposição dos resíduos culturais de inverno variou de 0,44 para a aveia preta a 0,53% dia⁻¹ para ervilhaca e para nabo forrageiro. Para os resíduos culturais de verão variou de 0,19 para o milho a 0,29% dia⁻¹ para o feijão.

Um resultado muito importante foi a constatação de que a cultura sucessora não interferiu no processo de decomposição dos resíduos culturais. Por outro lado, a cultura antecessora teve efeito no processo de decomposição em função da quantidade e qualidade dos resíduos deixados sobre o solo. Culturas que deixam sobre o solo grande quantidade de resíduos e de elevada relação C:N como o milho, por exemplo, imprimiram menor velocidade de decomposição para os resíduos sobrepostos, mesmo sendo leguminosas de baixa relação C:N. Isto nos indica que devemos levar em consideração a sobreposição dos resíduos quando do planejamento das rotações.

A meia-vida dos resíduos culturais apresentou a seguinte ordem decrescente: milho (173) > soja (116) > feijão (87) > aveia preta (69) = nabo forrageiro (69) > ervilhaca (46) dias. A meia vida para os resíduos de milho de 173 dias evidencia a importância de sua inclusão na rotação de culturais por proporcionar grande aporte de

matéria orgânica com decomposição lenta e gradual. Em contraste, a meia vida para os resíduos de ervilhaca de 46 dias evidencia que o conteúdo de nitrogênio é determinante para a velocidade do processo de decomposição. Dessa forma, a sucessão que envolve culturas de baixa e elevada relação C:N terá um comportamento mais estável em manter o solo coberto e garantir os respectivos benefícios do sistema de plantio direto.

Outra constatação importante deste estudo é que o principal fator na definição do processo de decomposição está relacionado com a constituição orgânica dos resíduos culturais, que são afetados pelas condições climáticas e pela atividade microbiana. Constatou-se que o conteúdo de lignina associado ao conteúdo de nitrogênio é o fator preponderante no controle da taxa de decomposição dos resíduos. Por sua vez, o conteúdo de nitrogênio e de carboidratos solúveis é determinante para a velocidade do processo de decomposição e conversão de C dos resíduos culturais para o estoque de C no solo. Considerando as relações Lignina:N e C:N, observou-se que o N é o constituinte orgânico que define o compasso da decomposição.

Durante o período de avaliação, a medida que a decomposição avançava, o conteúdo de lignina aumentou e o conteúdo de carboidratos diminuiu expressivamente para todos os resíduos, refletindo diretamente nos índices ILC (índice ligno-celulósico), ID (índice de decomponibilidade) e na relação Lignina:N que aumentaram com o tempo e no índice HLQ (quociente holocelulose/lignocelulose ou índice de suscetibilidade à decomposição), que diminuiu com o passar do tempo. Isto indica que estes índices mostraram-se sensíveis para medir a decomposição dos materiais. De modo geral as alterações foram mais expressivas para os resíduos culturais de inverno quando comparadas aos resíduos de verão, o que está relacionado com o período em que os resíduos se decompõem, ou seja, os resíduos de verão se decompõem no

outono/inverno, período de temperaturas mais amenas e menores precipitações, portanto, decomposição mais lenta.

O delta estoque de COT no solo variou em função do aporte e da qualidade dos resíduos nas sucessões. O estoque de C-lábil variou de 0,27 a 0,91 Mg ha⁻¹ e a média das sucessões foi de 0,70 Mg ha⁻¹. As maiores taxas de conversão foram apresentadas pelas sucessões Aveia preta-Feijão (47,6%) e Ervilhaca-Feijão (41 %). A sucessão Aveia preta-Feijão promoveu a maior contribuição para o estoque de C-lábil, enquanto a sucessão Nabo forrageiro-Feijão teve a menor contribuição. A taxa média de conversão de C dos RC para a fração lábil da matéria orgânica do solo foi de 31,3%. Isto indica que o aporte contínuo de resíduos culturais é importante para o aumento de C-lábil no solo e é o primeiro passo para o armazenamento de C no solo até atingir formas de C mais humificadas.

A estrutura do solo pode ser modificada pelo manejo do solo, interferindo na formação, tamanho e arranjo dos agregados do solo. O sistema de plantio direto por não revolver o solo e manter sobre a superfície os resíduos culturais é um sistema que proporciona a adição contínua de matéria orgânica ao solo, afetando diretamente a atividade biológica do solo e a formação de agregados. Os resultados deste estudo mostraram a importância do plantio direto para a formação de macroagregados grandes, os quais promovem a proteção física da matéria orgânica em seu interior. A constatação de que a porcentagem da classe de macroagregados de 19-8 mm foi significativamente superior as demais, representando 71,9% na média das sucessões e profundidades e, a relação linear positiva entre a massa das classes de agregados e a porcentagem do COT nas classes de agregados, indica que a matéria orgânica está protegida pela estrutura dos macroagregados do solo. As sucessões envolvendo a cultura do milho e da soja no verão e a cultura de cobertura da aveia preta no inverno apresentaram os maiores conteúdos e

estoques de COT nos macroagregados do solo. Em contraste, as sucessões envolvendo a cultura do feijão no verão e a cultura de cobertura do nabo forrageiro no inverno apresentaram os menores conteúdos e estoques de COT nos macroagregados do solo. Isto evidencia a importância da inclusão de culturas de relação C:N mais elevadas quando do planejamento da rotação, com efeitos sobre a estruturação do solo, através da formação de agregados. A sucessão de cultura que apresentou o maior conteúdo e estoque de COT no solo foi a aveia preta-soja (Ap-S) e a relação C:N desta sucessão foi significativamente superior as demais sucessões de culturas, independente da classe de agregado e profundidade.

Independente das sucessões de culturas, constatou-se que o conteúdo (g kg^{-1}) e o estoque (kg ha^{-1}) de COT e NT na classe de agregados 19-8 mm foi significativamente superior as demais classes de agregados em todas as profundidades, mostrando a importância de práticas de manejo do solo que privilegiem a manutenção da estrutura do solo e a formação de macroagregados.

Constatou-se também, independente das sucessões de culturas, que o conteúdo de COT (g kg^{-1}) para cada classe de agregado foi significativamente superior na camada superior de 0-2,5 cm e decresceu em profundidade, indicando uma relação de estratificação entre as camadas do solo. A relação C:N não apresentou diferença significativa entre as classes de agregados em cada profundidade, mas foi significativamente superior na profundidade 0-2,5 cm em relação à profundidade 2,5-5 cm, que por sua vez foi significativamente superior em relação à profundidade 5-10 cm, confirmando a relação de estratificação no perfil do solo. Houve relação linear significativa entre o conteúdo e o estoque de COT com a relação de estratificação entre as camadas do solo para a classe de agregados de 19-8 mm, indicando que com o aumento do COT aumenta a RE. Portanto, a RE pode ser usada como um índice de

qualidade do solo e um indicador de sequestro de C no solo sob plantio direto de longa duração.

O DMP foi significativamente menor na profundidade de 0-2,5 cm em relação as profundidades de 2,5-5 e 5-10 cm e para DMG não houve diferença significativa entre as profundidades, independente das sucessões de culturas. A camada superficial de 0-2,5 cm é a mais suscetível a modificações por ser a que está diretamente em contato com os resíduos culturais continuamente aportados e também por sofrer leve perturbação com as operações de plantio que se sucedem a cada safra.

Em resumo, estes resultados permitem afirmar que as espécies com a finalidade de cobertura vegetal de inverno em sucessão com culturas de verão apresentam diferentes taxas de decomposição, refletindo em diferentes contribuições para o estoque de carbono e nitrogênio total nos macroagregados e na fração lábil da matéria orgânica do solo manejado sob sistema plantio direto na palha por longo período. Este sistema, quando criteriosamente implantado e racionalmente conduzido, associado à rotação de culturas, com o uso de culturas de relação C:N contrastantes, promove elevado aporte de resíduos culturais favorecendo a proteção e a estruturação do solo, além de aumentar o aporte de COT no solo, refletindo na melhoria da qualidade do solo.

10. REFERÊNCIAS

- ALVARENGA, R.C.; CABEZAS, W.A.J.; CRUZ, J.C.; SANTANA, D.P. Plantas de cobertura de solo para sistema plantio direto. Informe Agropecuário, Belo Horizonte, 22(208):25-36, 2001.
- AMADO, T.J.C., BAYER, C., CONCEIÇÃO, P.C., SPAGNOLLO, E., CAMPOS, B.H. C., VEIGA, M. Potential of carbon accumulation in no-till soils with intensive use and cover crops in Southern Brazil. *J. Environ. Qual.*, 35:1599-1607, 2006.
- BALOTA, E.L.; COLOZZI-FILHO, A.; ANDRADE, D.S. & P. DICK, R.P. Microbial biomass in soils under different tillage and crop rotation systems. *Biol Fertil Soils*, 38:15–20, 2003.
- BAYER, C; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; CERETTA, C.A. Effect of no-till cropping systems on soil organic matter in a sandy clay loam Acrisol from Southern Brazil monitored by electron spin resonance and nuclear magnetic resonance. *Soil & Tillage Research*, 53:95-104, 2000.
- BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A. & DIECKOW, J. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. *Soil Tillage Res.*, 86:237-245, 2006.
- BEARE, M.H.; PARMELEE, R.W.; HENDRIX, P.F.; CHENG, W.; COLEMAN, D.C.; GROSSLEY JR, D.A. Microbial and faunal interactions and effects on litter nitrogen and decomposition in agroecosystems. *Ecol. Monogr.* 62:569–591, 1992.
- CALEGARI, A.; HARGROVE, W.L.; RHEINHEIMER, D.S.; RALISCH, R.; DANIEL TESSIER, D.; TOURDONNET, S. & GUIMARÃES, M.F. Impact of long-term no-tillage and cropping system management on soil organic carbon in an Oxisol: a model for sustainability. *Agronomy Journal*, 100:1013-1019, 2008.
- 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 das amostras. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 22:527-538, 1998.
- DERPSCH, R., SIDIRAS, N., HEINZMANN, F.X., Manejo do solo com coberturas verdes de inverno. *Pesq. Agrop. Bras.*, 20:761-773, 1985.
- DIECKOW, J., MIELNICZUK, J., KNICKER, H., BAYER, C., DICK, D.P. & KOGEL-KNABNER, I. Composition of organic matter in a subtropical Acrisol as influenced by land use, cropping and N fertilization, assessed by CPMAS ¹³CNMR spectroscopy. *British Society of Soil Science, European Journal of Soil Science*, 56: 705–715, 2005.
- DORMAAR, J.F. & FOSTER, R.C. Nascent aggregates in the rizosphere of perennial ryegrass (*Lolium perenne* L.). *Can. J. Soil Sci.* 71:465-474, 1991.
- DUXBURY, J.M.; SMITH, M.S.; DORAN, J.W. Soil organic matter as a source and sink of plant nutrients. In: COLEMAN, D.C.; OADES, J.M.; UEHARA, G. (Ed.) *Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems*. Honolulu, University of Hawaii Press, NifTAL Project, 1989. p.33-67.
- KLIEMANN, H.J.; BRAZ, A.J.P.B. & SILVEIRA, P.M. da. Taxas de decomposição de resíduos de espécies de cobertura em Latossolo Vermelho Distrófico. *Pesquisa Agropecuária Tropical*, 36 (1): 21-28, 2006.
- KONG, A.Y.Y.; SIX, J.; BRYANT, D.C.; DENISON, R.F. & VAN KESSEL, C. The Relationship between Carbon Input, Aggregation and Soil Organic Carbon Stabilization in Sustainable Cropping Systems. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 69:1078-1085, 2005.

- MADARI, B. E. Procedimento para uma estimativa compartimentada do seqüestro de carbono no solo. In: *Matéria Orgânica do Solo - Comunicado Técnico nº 22*, 2004.
- REICOSKY, D.C.; KEMPER, W.D.; LANGDALE, G.W.; DOUGLAS JR., C.L. & RASMUSSEN, P.E. Soil organic matter changes resulting from tillage and biomass production. *J. Soil Water Conservation*. 50:253-261, 1995.
- SÁ, J.C.M & R. LAL. Stratification ratio of soil organic matter pools as an indicator of carbon sequestration in a tillage chronosequence on a Brazilian Oxisol. *Soil & Tillage Research. Res.*, 103:46-56, 2009.
- SÁ, J.C.M.; CERRI, C.C.; PICCOLO, M.C.; FEIGL, B.E.; BUCKNER, J.; FORNARI, A.; SÁ, M.F.M.; SEGUY, L.; BOUZINAC, S.; VENZKE-FILHO, S.P.; PAULETTI, V. E NETO, M.S. O plantio direto como base do sistema de produção visando o sequestro de carbono. *Revista Plantio Direto*, 84:45-62, 2004.
- SÁ, J.C.M.; CERRI, C.C.; LAL, R.; DICK, W.A.; VENZKE FILHO, S.P.; PICCOLO, M. & FEIGL, B. Organic matter dynamics and sequestration rates for a tillage chronosequence in a Brazilian Oxisol. *Soil Sci. Soc. Am. J.*, 65: 1486-1499, 2001.
- SANTI, A; AMADO, T.J.C. & ACOSTA, J.A.A. Adubação nitrogenada na aveia preta. I – Influência na produção de matéria seca e ciclagem de nutrientes sob plantio direto. *R. Bras. Ci. Solo*, 27:1075-1083, 2003.
- SÉGUY, L., BOUZINAC, S. & HUSSON, O. Direct-Seeded tropical soil systems with permanent soil cover: learning from Brazilian experience. In: N. Uphoff et al., (eds). *Biological approaches to sustainable soil systems*. Boca Raton, Taylor and Francis Group, CRC Press Publ., 2006. p.323-342.
- SISTI, C.P.J., DOS 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 Res.*, 76:39-58, 2004.
- SIX, J., CONANT, R.T., PAUL, E.A., PAUSTIAN, K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant Soil*, 241:55-176, 2002.
- TISDALL, J.M. & OADES, J.M. Organic matter and water-stable aggregates in soils. *J. Soil Sci.*, 33:141-163, 1982.
- WIEDER, R.K. & LANG, G.E. A critique of the analytical methods used in examining decomposition data obtained from litter bags. *Ecology*, 63(6):1636-1642, 1982.