

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

ESTOQUE DE CARBONO E NITROGÊNIO EM SOLO SOB SISTEMAS DE
MANEJO E CULTURAS DE INVERNO

DISSERTAÇÃO DE MESTRADO

Elci Gubiani

Santa Maria, RS, Brasil
2015

**ESTOQUE DE CARBONO E NITROGÊNIO EM SOLO SOB
SISTEMAS DE MANEJO E CULTURAS DE INVERNO**

Elci Gubiani

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração em Processos Químicos e Ciclagem de Elementos, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de **Mestre em Ciência do Solo**.

Orientador: Prof. Dr. Danilo Rheinheimer dos Santos

Santa Maria, RS, Brasil

2015

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

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,
aprova a Dissertação de Mestrado

**ESTOQUE DE CARBONO E NITROGÊNIO EM SOLO SOB SISTEMAS DE
MANEJO E CULTURAS DE INVERNO**

elaborada por
Elci Gubiani

como requisito parcial para obtenção do grau de
Mestre em Ciência do Solo

COMISSÃO EXAMINADORA:

Prof. Dr. Danilo Rheinheimer dos Santos
(Presidente/Orientador) – CCR – UFSM

Prof. Dra. Maria Alice Santanna dos Santos
CCNE – UFSM

Prof. Dr. Cledimar Rogério Lourenzi
CCA – UFSC

Santa Maria, 11 de março de 2015.

Aos meus pais, Ivo (em memoriam) e Natalina

Aos meus irmãos

Ao meu noivo Rodrigo

Aos familiares do meu noivo

À Melissa Berguemaier (em memoriam)

Dedico este trabalho!

AGRADECIMENTOS

À Universidade Federal de Santa Maria e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo pela oportunidade de realização do curso de mestrado.

Ao Professor Danilo Rheinheimer dos Santos, pela orientação desde a iniciação científica, e pela confiança depositada.

À Professora Maria Alice Santanna dos Santos pela ajuda e pela confiança depositada.

Ao pesquisador Ademir Calegari, pela concessão do experimento instalado no IAPAR de Pato Branco, Paraná, para realização do presente trabalho.

Ao colega de Pós-Graduação Tales Tiecher, pela amizade e por ter sido sempre prestativo e pronto a me auxiliar nos momentos de dúvida.

Aos colegas de Pós-Graduação em Ciência do Solo, pela amizade e convívio, especialmente, a Marcos Antonio Bender, José Augusto Medeiros de Castro Lima, Renan Gonzatto e Gilmar Luiz Schaefer, pela ajuda na coleta das amostras de solo.

Ao Professor Carlos Alberto Casali pelo auxílio na coleta das amostras de solo.

Ao Professor Cledimar Rogério Lourenzi pela participação na banca de defesa.

Aos bolsistas de iniciação científica do Laboratório de Química e Fertilidade dos Solos, pelo auxílio na execução dos trabalhos de laboratório.

Ao CNPq pela concessão da bolsa de estudo durante o mestrado.

Enfim, a todos que estiveram presentes direta ou indiretamente, nesta etapa da minha vida e que contribuíram para a realização deste trabalho.

RESUMO

Dissertação de Mestrado
Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo
Universidade Federal de Santa Maria

ESTOQUE DE CARBONO E NITROGÊNIO EM SOLO SOB SISTEMAS DE MANEJO E CULTURAS DE INVERNO

AUTORA: ELCI GUBIANI
ORIENTADOR: DR. DANILO RHEINHEIMER DOS SANTOS
Local e data da defesa: Santa Maria, 11 de março de 2015.

A matéria orgânica do solo (MOS) constitui o maior reservatório de carbono (C) e nitrogênio (N) da superfície terrestre. Em solos agrícolas, a fração orgânica tem grande importância na manutenção da qualidade do solo, apesar de contribuir com uma pequena fração. Dessa forma, a adoção de práticas de manejo de solo e plantas de cobertura é importante para promover o acúmulo de C e N no solo e, conseqüentemente, a melhoria de sua qualidade. O sistema plantio direto (SPD), como prática conservacionista, melhora a estrutura, a infiltração de água no solo e aumenta o aporte de C e N no solo, através da deposição dos resíduos culturais em sua superfície. Assim, o solo é mantido permanentemente coberto por resíduos orgânicos culturais ou pelas plantas em fase vegetativa. O presente trabalho tem como objetivo avaliar os estoques de C e N no perfil de um solo muito argiloso em que foram cultivadas plantas de cobertura de inverno sob dois sistemas de manejo (SPD e sistema cultivo convencional (SCC)), em um experimento de longa duração (26 anos). O experimento foi instalado no inverno de 1986, em um Latossolo Vermelho Aluminoférrico, na região sudoeste do Paraná, no Instituto Agrônômico do Paraná, com dois sistemas de manejo, SPD e SCC e com oito tratamentos de inverno (aveia preta, centeio, ervilhaca comum, ervilhaca peluda, nabo forrageiro, trigo, tremoço azul e o pousio). A coleta das amostras de solo foi realizada em novembro de 2012, nas seguintes profundidades: 0–5, 5–10, 10–20, 20–30, 30–40, 40–60, 60–80 e 80–100 cm. Também foram coletadas amostras de solo sob mata nativa, em área contígua à área experimental. Foram determinados os teores de C e N através do analisador elementar. Após 26 anos de cultivo, o solo sob SPD apresentou os maiores teores e estoques de C e N nas camadas superficiais comparativamente com o SCC. Abaixo de 20 cm e até a camada de um metro de profundidade, os estoques de C e N não diferiram entre os sistemas de manejo de solo. Quanto ao uso das diferentes plantas de cobertura, esses tratamentos não apresentaram diferenças nos estoques de C e N em ambos os sistemas de manejo (SPD e SCC).

Palavras-chave: Sistema Plantio Direto. Sistema Cultivo Convencional. Plantas de Cobertura.

ABSTRACT

Master Dissertation
Post-Graduate Program in Soil Science
Federal University of Santa Maria

SOIL CARBON AND NITROGEN STOCK UNDER WINTER COVER CROPS MANAGEMENT SYSTEMS

AUTHOR: ELCI GUBIANI

ADVISER: DR. DANILO RHEINHEIMER DOS SANTOS

Place and Date of the Defense: Santa Maria, March 11th, 2015.

Soil organic matter (SOM) constitutes the largest reservoir of carbon (C) and nitrogen (N) of the earth's surface. In agricultural soils, the organic fraction is of great importance in maintaining soil quality, while contributing a small fraction. Thus, the adoption of soil management practices and cover crops are important to promote the C and N accumulation in the soil and consequently improve its quality. The no-tillage system (NT) as conservation practice improves the soil structure, water infiltration and increases the contribution of C and N in the soil by deposition of crop residue on the surface. Thus, the soil is kept constantly covered by organic residue of plants during their vegetative stage. This study aims to evaluate the stocks of C and N in the profile of a very clayey soil. The winter cover crops were grown under two management systems i. e., NT and conventional-tillage system (CT) in an long-term 26 years experiment. The experiment was started in the winter of 1986 in an Oxisol rich in aluminium, in southwestern Paraná at the Agronomic Institute of Paraná, with eight winter treatments (oat, rye, vetch, hairy vetch, wild radish, wheat, blue lupine and fallow). The collection of the soil samples was conducted in November 2012 at the following depths: 0–5, 5–10, 10–20, 20–30, 30–40, 40–60, 60–80 and 80–100 cm. A soil samples were collected under native forest from an area adjacent the experimental area serving as control. The soil C and N contents through the elemental analyzer. After 26 years of cultivation, the soil under NT showed the highest levels and stocks of C and N in the surface layers compared to the CT. However, below 20 cm and even upto 1 meter depth, the soil C and N stocks did not differ between the soil management systems. Regarding the use of different plant cover, these treatments did not differ in stocks of C and N in both management systems (NT and CT).

Keywords: No-tillage system. Conventional tillage system. Winter cover crops. Carbon.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Modelo que descreve a interação da matéria orgânica do solo e os minerais (KLEBER et al., 2007).....	14
Figura 2– Localização do experimento na Estação Experimental do IAPAR, na região Sudoeste do Paraná (CALEGARI, 2006).....	25
Figura 3– Visão geral da localização do experimento instalado na Estação Experimental do IAPAR, região Sudoeste do Paraná. Fonte: Google Earth.	26

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Classificação, localização, profundidade e teor de C dos solos em estudos realizados, comparando o SPD e SCC no teor de C.....	18
Tabela 2 – Classificação, localização, profundidade e estoque de C dos solos em estudos realizados, comparando o SPD e SCC no estoque de C.....	19
Tabela 3 – Textura e composição mineralógica do Latossolo Vermelho Aluminoférrico utilizado no experimento (CALEGARI, 2006).....	22
Tabela 4 – Culturas estabelecidas sob SPD e SCC, no decorrer de 26 anos na área experimental sob um Latossolo Vermelho Aluminoférrico situado na região Sudoeste do Paraná (adaptado de CALEGARI, 2006).	27
Tabela 5 – Produção de matéria seca da parte aérea das plantas cultivadas durante 26 anos, sob SPD e SCC.....	28
Tabela 6 – Significância dos efeitos dos fatores experimentais e suas interações na densidade do solo, e nos teores de C e N, como resultado da análise da variância (ANOVA).....	33
Tabela 7 – Densidade do solo, teores de C e N, e relação C/N no solo da mata e nos solos cultivados sob dois sistemas de manejo (SPD e SCC), após 26 anos.	34
Tabela 8 – Estoque de C e N no solo da mata e no solo cultivado sob dois sistemas de manejo (SPD e SCC), após 26 anos.	35
Tabela 9 – Estoque de C e N no solo da mata e no solo cultivado afetado por diferentes tratamentos de inverno após 26 anos.....	38

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	11
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA.....	13
2.1 Matéria orgânica do solo	13
2.2 Carbono e nitrogênio em solos sob diferentes sistemas de manejo.....	15
2.3 Carbono e nitrogênio influenciados pelos diferentes sistemas de culturas	20
3 HIPÓTESE	20
4 OBJETIVO	21
5 MATERIAL E MÉTODOS.....	22
5.1 Descrição do local de estudo e histórico da área experimental	22
5.2 Coleta das amostras de solo.....	28
5.3 Análise de solo	29
5.4 Análises estatísticas	29
6 RESULTADOS.....	31
6.1 Efeito do sistema de manejo do solo	31
6.2 Efeito dos tratamentos de inverno	31
6.3 Diferenças entre o solo cultivado e o solo da mata nativa	32
7 DISCUSSÃO	40
7.1 Efeito do sistema de manejo do solo	40
7.2 Efeito dos tratamentos de inverno	42
7.3 Diferenças entre o solo cultivado e o solo da mata nativa	45
8 CONCLUSÕES	49
9 REFERÊNCIAS	50

1 INTRODUÇÃO

A transformação de ambientes naturais em sistemas agrícolas em regiões tropicais e subtropicais é uma das principais causas da degradação dos solos, reduzindo significativamente o teor de matéria orgânica do solo (MOS). O frequente revolvimento aumenta os processos erosivos e as perdas de solo e água, além de acelerar a oxidação da MOS, reduzindo o seu teor. Visto que, os solos dessas regiões, em sua grande maioria, são altamente intemperizados e de baixa fertilidade natural, a fração orgânica torna-se a principal fonte de nutrientes para as plantas em sistemas sem adições de fertilizantes. A MOS é a principal fonte de carbono (C) e nitrogênio (N) no solo. O aumento do teor de C no solo promove melhoria na estabilidade estrutural, aumento da capacidade de troca de cátions, redução da compactação e aumento da infiltração e melhoria da capacidade de armazenamento de água no solo.

Com o objetivo de reduzir as perdas de solo pela erosão hídrica, o sistema plantio direto (SPD) vem sendo adotado na região Sul do Brasil desde a década de 70. O mesmo tem como principais fundamentos o revolvimento mínimo do solo, a manutenção permanente da cobertura com resíduos culturais ou plantas vivas e a rotação/sucessão de culturas. O revolvimento mínimo do solo (ou a ausência de revolvimento) proporciona aumento gradual nos teores de C e N na camada superficial do solo. A quantidade e qualidade dos resíduos das culturas de interesse econômico em rotação ou sucessão com as plantas de cobertura ao longo dos anos, bem como das plantas de cobertura, também são fatores que contribuem para essa elevação nas quantidades superficiais de C e N. O SPD proporciona melhorias no solo, tanto nas suas propriedades físicas quanto nas biológicas, como por exemplo, a redução da densidade do solo e aumento da atividade dos microrganismos. Porém, para que o SPD tenha bons resultados, a escolha das plantas de cobertura é de fundamental importância. Uma combinação adequada de plantas com características diferentes quanto a exigências nutricionais, desenvolvimento radicular, velocidade de decomposição e produção de fitomassa é importante para fazer com que o SPD seja mais eficiente quando comparado ao sistema cultivo convencional (SCC).

As principais famílias utilizadas como plantas de cobertura de solo são: (i) as leguminosas, devido à sua capacidade de fixar N do ar através da associação com bactérias do gênero *Rhizobium*; (ii) as gramíneas por apresentarem alta produção de matéria seca e lenta decomposição do material, quando comparada com as leguminosas, devido à sua alta

relação carbono/nitrogênio (C/N) da parte aérea; (iii) as crucíferas, que apresentam um sistema radicular agressivo, além de alta capacidade de reciclagem de nutrientes (N e P). Em experimentos sob condições de clima subtropical, já foi verificado que a utilização de plantas de cobertura com alto aporte de resíduos no solo sob SPD aumenta os estoques de C e N do solo, em relação ao SCC. Porém, essas alterações nos estoques de C e N são lentas e acumulativas, o que, associado a curtos períodos experimentais, acaba dificultando a visualização do aumento dos estoques em profundidade. Além disso, a maioria dos trabalhos científicos relacionados aos estoques de C e N no solo limitam-se ao estudo das camadas superficiais (ou camada arável), não investigando o que ocorre nas camadas mais profundas do perfil do solo.

Nesse sentido, faz-se necessário avaliar os estoques de C e N que resultam do efeito combinado do emprego de diferentes sistemas de manejos de solo e diferentes plantas de cobertura. Essas práticas visam minimizar as perturbações do solo e aumentar o armazenamento de C e N, permitindo assim a melhoria da qualidade e da produtividade agrícola.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 Matéria orgânica do solo

O solo é formado principalmente por duas frações, a mineral e a orgânica. A fração orgânica é constituída por compostos que contêm C, o que inclui resíduos de plantas, microrganismos vivos e mortos, em diferentes graus de transformação, e substâncias orgânicas quimicamente e/ou microbiologicamente alteradas (CHRISTENSEN, 1992; SILVA et al., 2004). De acordo com Silva et al. (2006), em solos cultivados, o teor de MOS varia de 0,5–5% nos horizontes superficiais, podendo apresentar valores mais elevados em solos orgânicos. Segundo Bayer e Mielniczuk, (2008) a MOS é considerada um indicador de qualidade de solo e tem seus estoques afetados por fatores como clima, tipo de solo, temperatura, natureza dos resíduos orgânicos depositados no solo e tempo de uso do solo. Além disso, a MOS pode ser caracterizada pela qualidade dos seus constituintes orgânicos (CERRI et al., 1997), variando com a intensidade dos processos de adição de resíduos orgânicos depositados na superfície do solo e com o grau de proteção pelo solo (SILVA e MACHADO, 2000).

Em relação à massa total da MOS, o C contribui com 52–58%, o oxigênio com 34–39%, o hidrogênio com 3,3–4,8% e o N com 3,7–4,15% (SILVA et al., 2004), sendo que o C é um indicativo para estimar a fração orgânica do solo (NELSON e SOMMERS, 1996) e um importante componente na definição dos sistemas agrícolas e na capacidade do solo de sequestrar C da atmosfera (LAL, 2004).

O C presente na MOS pode ser dividido em duas frações. A menor fração é denominada lábil, sendo formada por compostos orgânicos facilmente mineralizados em reações catalisadas por enzimas do solo, de origem microbiana, influenciando diretamente na liberação de CO₂ para a atmosfera (RANGEL et al., 2008).

A fração maior do C presente na MOS é caracterizada pelo maior tempo de permanência no solo, devido à baixa taxa de degradação do C, que está fisicamente (KRULL et al., 2003) ou quimicamente protegida (SILVA e MENDONÇA, 2007). Nesse sentido, a equipe liderada por Kleber (Lawrence Berkeley National Laboratory) incluiu o modelo de estabilidade e permanência do C no solo decorrente da organização das moléculas orgânicas em relação a sua afinidade com a água e com a capacidade de compartilhamento de elétrons entre átomos da MOS e os colóides inorgânicos presentes nos solos. Kleber et al. (2007) desenvolveram um modelo em que a MOS apresenta moléculas orgânicas solúveis que

podem formar estruturas organizadas (micelas) com duas regiões; uma exterior, hidrofílica, e outra interior, hidrofóbica, a qual protege a região exterior do contato da água, impedindo que a MOS seja decomposta. Esse modelo, que descreve as interações da MOS com os minerais através de diferentes mecanismos de ligação, apresenta três zonas: a de contato, a hidrofóbica e a cinética (Figura 1). Cada zona apresenta diferentes forças de atração entre MOS e os minerais. A zona de contato apresenta a maior força de atração, a zona cinética, a menor (nesta última a MOS está fracamente ligada aos minerais). Esse modelo segue a mesma lógica da adsorção e dessorção de elementos químicos, que se encontra descrito em Essington, (2003); Sposito, (1989).

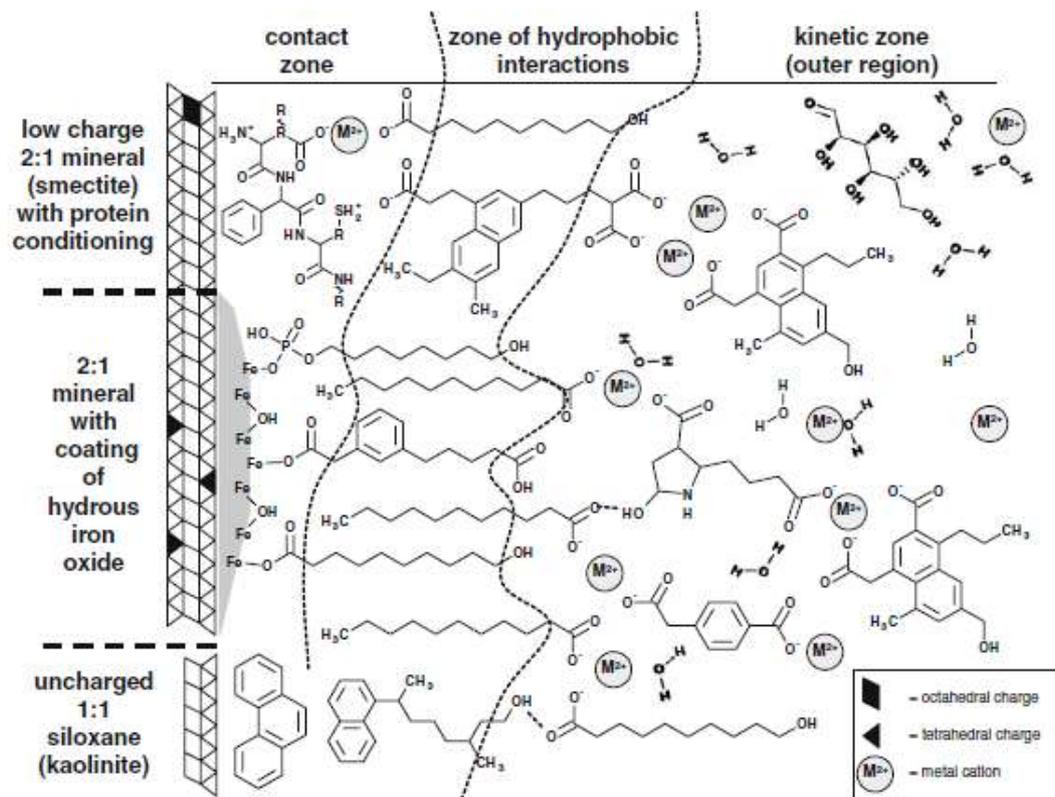


Figura 1 – Modelo que descreve a interação da matéria orgânica do solo e os minerais (KLEBER et al., 2007).

Kleber e Johnson, (2010) afirmam que os resíduos orgânicos, são hidrofóbicos, mas que no processo de decomposição adquirem maior quantidade de oxigênio em sua estrutura, tornando-se assim, mais solúveis em água. Esses autores afirmam ainda que a MOS se comporta de diferentes formas em relação a um solvente polar, pois alguns materiais orgânicos (ácidos orgânicos de baixo peso molecular e hidratos de C) são hidrofílicos e

solúveis em água, enquanto que os resíduos vegetais e animais tendem a ser hidrofóbicos. Estes, em contato com um solvente polar se agrupam dificultando a acessibilidade das enzimas e do oxigênio retardando a decomposição da MOS. Assim, segundo esse modelo, a molécula vai progressivamente tornando-se menor, pois o C presente na molécula é perdido na forma de CO₂ ou adquire grupos funcionais polares, que são solúveis em água. Além disso, a composição química dos resíduos, os fatores climáticos e, principalmente, o sistema de manejo adotado no solo são fatores que influenciam no acúmulo de C nas frações lábeis da MOS (SILVA e MENDONÇA, 2007).

Já o N presente na MOS pode ter sua origem dos microrganismos do solo, pois quando estes morrem sua decomposição disponibiliza N que pode ser absorvido pelas plantas. Outra origem do N são as plantas usadas como cobertura de solo, em especial as leguminosas, as quais têm a capacidade de realizar a fixação biológica, adicionando grandes quantidades de N atmosférico ao solo (SILVA et al., 2006). O N presente no solo na forma disponível para a absorção pelas plantas é influenciado por fatores como: temperatura e umidade (ROCHA et al., 2008), tipo de solo (THOMSEN et al., 2000), características dos resíduos vegetais (TRINSOUTROT et al., 2000) e sistema de manejo adotado (KRISTENSEN et al., 2003).

2.2 Carbono e nitrogênio em solos sob diferentes sistemas de manejo

A transformação de ambientes naturais em sistemas agrícolas tem provocado a degradação do solo devido à forma inadequada com que este é manejado (FONSECA et al., 2007). Práticas agrícolas baseadas no revolvimento do solo e na remoção dos resíduos culturais da superfície diminuem os teores de C e N (MANN et al., 2002) (Tabela 1), devido à redução de entradas e ao aceleração da mineralização, por meio da ruptura dos agregados e da consequente desestruturação do solo (SIX et al., 2002). De acordo com Lal (2004), lavar e remover os resíduos culturais da superfície contribui para o esgotamento do reservatório de C, acelerando a degradação do solo.

O potencial do solo para armazenar C varia conforme o tipo de cobertura, clima, práticas de manejo, aporte de resíduos, taxas de entradas e saídas (SLEUTEL et al., 2003; ZINN et al., 2005) e o teor de argila (SILVA e MENDONÇA, 2007; ZINN et al., 2002). Para Silva e Mendonça (2007), um solo com maior teor de argila, quando submetido às mesmas condições ambientais, apresenta maior teor de C, já que a MOS tem a capacidade de formar diferentes tipos de ligação com a fração argila. Os mesmos autores afirmam que a

proteção física da MOS dificulta e/ou impede o acesso dos microrganismos e de suas enzimas à MOS, resultando na preservação do C. Já para Frazão et al. (2010), os estoques podem ser mantidos, aumentados ou diminuídos em relação ao sistema natural, em função do manejo que for adotado. Dessa forma, dentre as práticas de manejo de solo que preconizam o aporte de C e N, contribuindo para o sequestro de C da atmosfera, destaca-se o SPD (LAL, 2004; FERREIRA et al., 2012; PAUL et al., 2013).

O SPD tem como fundamentos, o mínimo revolvimento do solo e a permanência de plantas vivas e/ou dos resíduos culturais sobre a superfície, o que proporciona incremento nos estoques de C (Tabela 2) e N e melhorias na agregação do solo (COSTA et al., 2004). Solos sob SPD acumulam maiores quantidades de nutrientes na sua camada superficial, enquanto que, sob SCC os nutrientes são distribuídos mais uniformemente no perfil do solo (HARGROVE et al., 1982; MACKAY et al., 1987; KARLEN et al., 1991; ISMAIL et al., 1994; HUSSAIN et al., 1999). Segundo Blanco-Canqui e Lal (2008) o estoque de C pode ter um incremento de 50 a 60% quando o solo estiver sob SPD, em comparação ao SCC, em uma profundidade de até 10 cm. Nesse sentido, trabalhos que estão sendo realizados em regiões de clima subtropical em experimentos de longa duração têm demonstrado que o SPD com plantas de cobertura e com alto aporte de resíduos vegetais resultam em aumento dos estoques de C e N do solo (Tabela 2) (BAYER et al., 2000; DERPSCHE et al., 1986; CASTRO FILHO, 1988; CALEGARI et al., 2008), promovendo maior inter-relação entre fluxo de água, oxigenação, temperatura, microrganismo do solo e ciclagem de nutrientes (FRANZLUEBBERS et al., 1995), bem como na melhoria das propriedades físicas dos solos (COSTA et al., 2003; CALEGARI et al., 2006). Trabalhando em um Latossolo Vermelho Calegari et al. (2008) verificaram que o SPD resultou em maior acúmulo de C na camada superficial, após 19 anos de experimentação (Tabela 2), quando compararam o SPD ao SCC com diferentes plantas de cobertura hibernais. Nesse sentido, Leite et al. (2010) verificaram aumento de 12 % no estoque de C depois de dois anos de cultivo sob SPD, sendo que após seis anos o incremento foi de 30%, na camada 0–5 cm, em relação à floresta nativa do Cerrado, em um Latossolo Vermelho-Amarelo. Já Diekow (2003) verificou, em um experimento com 14 anos de duração, uma redução de 22 e 14% nos estoques originais de C e N, respectivamente, até 17,5 cm do campo nativo, quando o solo foi manejado sob SCC. Trabalhando em um Gleissolo Háplico, com 11 anos de implantação, Nascimento et al. (2009) verificaram maior teor de C na camada 0–5 cm sob SPD e na camada 10–20 cm no solo sob SCC (Tabela 2). Os mesmos autores afirmam que isso se deve à incorporação dos

resíduos vegetais deixados sobre o solo, possibilitando uma melhor distribuição do teor de C no solo quando este é manejado sob SCC.

A maioria dos estudos sobre teor e estoque de C tem como foco principal o solo das camadas superficiais (Tabela 1 e 2), não abordando o que ocorre nas camadas mais profundas. Em um trabalho realizado por Ussiri e Lal (2009), em um experimento com 43 anos de implantação e com três diferentes sistemas de manejo, encontraram estoque de C no solo sob SPD de $\pm 80 \text{ Mg ha}^{-1}$ nos primeiros 30 cm de profundidade, com uma taxa de acúmulo de C de $1,37 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ (Tabela 1). De acordo com Jobbágy e Jackson (2000), nos primeiros 20 cm do perfil de um solo (avaliado até 1 m de profundidade) a porcentagem de C pode chegar até 50% para a floresta nativa. Nesse sentido, estimativas indicam que cerca de 1.500 Pg ($\text{Pg} = 10^{15} \text{ g}$) de C está armazenado na MOS até 1 m de profundidade (JANZEN, 2006; LAL, 2002), sendo considerado como reservatório de C (SCHÖNING et al., 2006; RUMPEL et al., 2002).

O teor de C é variável entre os diferentes sistemas de manejo de solo (SPD e SCC) (Tabela 1), nos diferentes sistemas de culturas, e ao longo do perfil do solo, pois o C das camadas subsuperficiais pode ser estabilizado por interações minerais (EUSTERHUES et al., 2005) e também pela escassez de entrada de resíduos vegetais (FONTAINE et al., 2007). Dessa forma, o estoque de C no solo em profundidade, com o passar do tempo, pode proporcionar benefícios, pois o C é menos susceptível de ser perdido pela decomposição da MOS e pela erosão (FRANZLUEBBERS e STUEDEMANN, 2009). Alguns autores verificaram acúmulo de C em profundidade. Bayer et al. (2005) constaram que 43% do C acumulado no solo está na camada 20–100 cm de profundidade, conferindo um maior potencial ao solo em sequestrar e armazenar C. Uma possível explicação para isso estaria relacionada com a profundidade a que o sistema radicular atinge e com a lixiviação de compostos orgânicos, as quais conjuntamente podem contribuir para o aumento do estoque de C em camadas subsuperficiais do solo. Segundo Balesdent e Balabane (1996) o sistema radicular é o principal responsável pelo acúmulo de C em profundidade. Nesse sentido, Inácio (2009), trabalhando em um Latossolo Vermelho até 1 m de profundidade, verificou que, apesar da redução no teor de C nas camadas subsuperficiais, as quantidades armazenadas eram significativas, uma vez que o C armazenado de 40–100 cm representou 37 a 53% do C do perfil.

Tabela 1 – Classificação, localização, profundidade e teor de C dos solos em estudos realizados, comparando o SPD e SCC no teor de C.

Solo	Local	Teor de argila (g kg ⁻¹)	Anos após adoção do SPD	Profundidade avaliada (cm)	Profundidade com diferenças significativas (cm)	Teores de COT (g kg ⁻¹)		Fonte
						SPD	SCC	
Crosby silt-loam	Ohio – USA	200	43	0–30	0–15	26,97 a	8,67 b	Ussiri e Lal (2009)
					15–30	8,27	9,70	
Argissolo	Coimbra – MG	450	23	0–40	0–5	21,70 a	14,40 b	Hickmann e Costa (2012)
Latossolo	Guarapuava – PR	629	21	0–20	0–5	44,00 a	34,00 b	Costa et al. (2003)
Latossolo	Planaltina – DF	530	20	0–20	0–5	30,00 a	20,00 b	Oliveira et al. (2003)
Argissolo	Eldorado do Sul – RS	220	18	0–30	0–2,5	20,70 a	14,60 b	Zanatta et al. (2007)
					2,5–5	11,00 a	10,10 b	
Cambisol	Shanxi – China	–	17	0–60	0–5	15,10 a	9,70 b	Liu et al. (2014)
					5–10	7,50 a	6,30 b	
Latossolo	Passo Fundo – RS	630	15	0–100	0–5	22,90 a	16,40 b	Jantalia et al. (2003)
Entic	Córdoba – Argentina	167	15	0–100	0–5	17,70 a	13,20 b	Alvarez et al. (2014)
Haplustoll					5–10	10,90 b	12,20 a	
Cambissolo	Lages – SC	443	12	0–20	0–5	40,00 a	20,00 b	Andrade et al. (2010)
Mollisol	Buenos Aires – Argentina	310	8	0–20	0–5	34,06 a	28,38 a	Zamuner et al. (2008)
					5–10	29,86 a	27,72 b	
					10–20	28,38 a	27,19 a	
					20–40	3,84 b	5,07 a	
Argissolo	Santa Maria – RS	140	6	0–40	0–5	8,95 a	7,17 b	Rheinheimer et al. (1998)
					5–10	7,71 b	7,21 b	
					10–20	4,70 b	6,10 a	
					20–40	14,62 a	14,34 a	
Latossolo	Jaboticabal – SP	–	6	0–20	0–20	17,10 a	9,20 b	Souza e Melo (2003)
Argissolo	Eldorado do Sul – RS	310	5	0–17,5	0–17,5	17,10 a	9,20 b	Bayer et al. (2000)
Latossolo	Sto Antônio de Goiás – GO	500	4	0–30	0–5	21,40 a	24,20 a	Freixo et al. (2002)
					5–10	19,20 a	22,40 a	
					10–20	18,30 b	21,40 a	
					20–40	12,20 a	7,30 b	
Typic Haplorthox	Santo Antônio de Goiás – GO	–	3	0–20	0–5	12,20 a	7,30 b	Nascente et al. (2013)
Latossolo	Baixa Grande do Ribeiro – PI	430	2	0–40	0–5	25,20 a	19,10 b	Leite et al. (2010)
					5–10	21,70 a	18,10 b	
					10–20	15,90 b	15,00 b	
					20–40	9,65 b	13,80 a	

Tabela 2 – Classificação, localização, profundidade e estoque de C dos solos em estudos realizados, comparando o SPD e SCC no estoque de C.

Solo	Local	Teor de argila (g kg ⁻¹)	Anos após adoção dos SPD	Profundidade avaliada (cm)	Profundidade com diferenças significativas (cm)	Estoque de C (Mg ha ⁻¹)		Fonte
						SPD	SCC	
Oxisol	Sete Lagoas – MG	–	30	0–45	0–45	11,80 a	11,80a	Roscoe e Buurman (2003)
Argissolo	Coimbra – MG	450	23	0–40	0–5	9,23 a	6,15 b	Hickmann e Costa (2012)
Latossolo	Guarapuava – PR	–	21	0–20	0–5	22,00a	16,70 b	Costa et al. (2004)
Latossolo	Londrina – PR	720	19	0–60	0–5	23,74 a	17,72 b	Calegari et al. (2008)
					5–10	17,01 a	16,39 a	
					10–20	28,07 b	31,09 a	
Latossolo	Cruz Alta – RS		19	0–30	0–5	18,47 a	15,21 b	Campos et al. (2011)
					5–10	13,91 b	14,85 a	
Argissolo	Eldorado do Sul – RS	220	18	0–5	0–5	12,10 a	7,20 b	Conceição et al. (2008)
Acrisol	Eldorado do Sul – RS	220	18	0–20	0–5	10,40 a	6,80 b	Conceição et al. (2013)
Argissolo	Eldorado do Sul – RS	220	18	0–20	0–20	36,10 a	31,60 b	Costa et al. (2008)
Acrisol	Eldorado do Sul – RS	220	18	0–30	0–30	51,60 a	46,60 a	Zanatta et al. (2007)
Cambisol	Gülzow – Alemanha	56	17	0–30	0–30	36,70 a	30,20 b	Kahle et al. (2013)
Cambisol	Shanxi – China	–	17	0–60	0–5	9,50 a	4,50 b	Liu et al. (2014)
					5–10	6,20 a	3,90 b	
Latossolo	Passo Fundo – RS	630	13	0–100	0–100	175,20 a	163,80 b	Sisti et al. (2004)
Argissolo	Eldorado do Sul – RS	240	13	0–30	0–17,5	36,22 a	29,56 b	Lovato et al. (2004)
Gleissolo	Cachoeirinha – RS	200	11	0–20	0–5	16,38 a	10,45 b	Nascimento et al. (2009)
					10–20	11,80 b	16,95 a	
Latossolo	Planaltina – DF	571	11	0–20	0–20	38,06 a	35,23 b	Nunes et al. (2011)
Typic Calcixerolls	Burgos – ES Espanha	–	10	0–30	0–30	53,44 a	38,17 b	Sombbrero e Benito (2010)
Argissolo	Eldorado do Sul – RS	186	8	0–20	0–2,5	8,20 a	4,20 b	De Bona et al. (2006)
					2,5–5	5,20 a	2,80 b	
					5–10	7,40 a	7,90 b	
					10–20	11,00 b	15,20 a	
Argissolo	Tabuleiros Costeiros – SE	–	±8	0–20	0–10	11,33 a	6,90 b	Pedra et al. (2012)
					10–20	19,06 a	10,83 b	
Latossolo	Costa Rica – MS	600	6	0–20	0–20	58,96 a	54,30 b	Bayer et al. (2004)
Argissolo	Eldorado do Sul – RS	310	5	0–17,5	0–17,5	30,00 a	16,11 b	Bayer et al. (2000)
Latossolo	Sto Antônio de Goiás – GO	500	4	0–30	0–5	13,50 a	13,70 a	Freixo et al. (2002)
					5–10	12,20 a	14,20 a	
					10–20	10,80 b	13,60 a	
Argissolo	Pelotas – RS	121	3	0–20	0–10	37,70 a	27,40 b	Cruz et al. (2003)

2.3 Carbono e nitrogênio influenciados pelos diferentes sistemas de culturas

Nas últimas décadas, a prática da utilização de plantas de cobertura de solo no SPD vem ganhando espaço em áreas agrícolas da região Sul do Brasil. De acordo com Casão et al. (2012), o SPD tem, como um dos seus fundamentos básicos a permanência da cobertura do solo, com plantas vivas e/ou com os resíduos delas. Nesse sentido, Argenta et al. (2001) e Oliveira et al. (2002) reforçam a importância da escolha das plantas de cobertura, pois elas devem atender ao requisito de adicionar quantidades satisfatórias de resíduos ao solo além de disponibilizar nutrientes para as plantas sucessoras.

Baseado nisso, as plantas mais utilizadas para essa finalidade pertencem às famílias das leguminosas, gramíneas e crucíferas. As leguminosas, além de adicionar resíduos ao solo, são também fonte de N, devido ao fato de se associarem simbioticamente com bactérias capazes de transformar o N₂ atmosférico em NH₃, no processo de fixação biológica (AITA e GIACOMINI, 2006; SILVA et al., 2006) e de apresentarem baixa relação carbono/nitrogênio (C/N) na parte aérea, bem como potencial para produção de matéria seca (GIACOMINI et al., 2003; CALEGARI et al., 1993). Nesse sentido, Giacomini (2001) avaliou a decomposição da ervilhaca (*Vicia sativa* L.) e verificou que, decorridos 30 dias do manejo, 43% da matéria seca havia sido decomposta e em torno de 40% do N havia sido mineralizado.

As gramíneas apresentam relação C/N alta, o que lhes confere um maior tempo de permanência sob a superfície, podendo favorecer a imobilização microbiana de N do solo durante a decomposição dos resíduos, quando são utilizadas como plantas de cobertura hibernais, em sucessão a culturas comerciais (SILVA et al., 2006; KRAMBERGER et al., 2009). Além disso, também possuem um sistema radicular volumoso, possibilitando estruturar o solo e aumentar o aporte de C (BAYER et al., 2003). Essas espécies, quando cultivadas em consórcio, podem proporcionar benefícios aos sistemas de produção, pois apresentam características intrínsecas que resultam na exploração de camadas distintas de solo, na ciclagem de nutrientes (CHERR et al., 2006) e na produção de resíduo vegetal com relação C/N intermediária.

As crucíferas, que dentre elas, a espécie mais utilizada é o nabo forrageiro (*Raphanus sativus* L.). O seu uso como planta de cobertura é devido à boa produção de matéria seca (DONEDA et al., 2012) e à elevada capacidade de reciclar nutrientes, principalmente N, potássio (WIETHÖLTER, 2003) e fósforo (WILDNER, 1990). Além disso, o nabo

forageiro possui um sistema radicular pivotante, bastante profundo (mais de 2 metros), que promove a descompactação do solo.

Nesse sentido, Jantalia et al. (2003) trabalhando com sistemas de rotação com maior diversidade de espécies, em relação à sucessão trigo (*Triticum aestivum* L.)/soja (*Glycine max* L.) encontraram maiores estoques de C e N, nos sistemas que mantinham os resíduos das plantas sobre a superfície do solo, sendo que no SCC estes efeitos foram nulos. Já Bayer et al. (2004), trabalhando em um Latossolo, verificaram que o SPD promoveu maior estoque de C na camada 0–20 cm, comparativamente ao SCC; porém, esse resultado foi dependente do sistema de cultura adotado e apenas o tratamento com o nabo forrageiro e milho (*Zea mays* L.) no outono promoveu aumento no estoque de C.

Após seis anos de experimento com diferentes sucessões de culturas e sob SPD, Gonçalves e Ceretta (1999) verificaram que o acúmulo de C foi maior na camada de 0–25 cm, sendo que, a rotação com tremoço azul (*Lupinus angustifolius* L.) e milho promoveu maiores quantidades de C acumulado no solo. Segundo Calegari et al. (2008), os elevados teores de C no solo estocados na camada superficial (0–20 cm) sob SPD, são resultado da adição anual de resíduos de culturas deixados na superfície e do não revolvimento do solo. Os mesmos autores encontraram em solos cultivados com tremoço e nabo forrageiro os maiores valores de estoque de C, em todas as profundidades avaliadas, em comparação ao pousio. Esse efeito é devido à grande quantidade de resíduo vegetal produzido e que é restituído ao solo, bem como à melhor distribuição do sistema radicular dessas espécies.

Segundo Calegari et al. (2008), os resíduos vegetais das culturas de inverno deixados ao solo promoveram maiores níveis de C em relação ao pousio (5–20 cm), tanto no SPD como no SCC. Os mesmos autores afirmam que o pousio em SPD apresenta maiores valores de C na camada 0–5 cm, em relação às espécies de inverno sob SCC; porém, nas camadas inferiores, o pousio (tanto no SPD quanto no SCC) apresentou menores valores de C em relação aos tratamentos de inverno. Nos solos onde os resíduos são mantidos na superfície e não há revolvimento, é verificado, além do aumento do teor de C, um aumento no tempo de residência do C do solo (SIX et al., 2002). Albuquerque (2012) observou maiores taxas de sequestro de C na camada 20–100 cm, no sistema ervilhaca-milho-trigo-soja. A menor taxa de sequestro na camada 0–20 cm, comparada àquela que ocorre na camada de 20–100 cm, pode ser devida à migração da MOS dissolvida para as camadas mais profundas do solo, e também à sua estabilização através da sorção de óxidos e hidróxidos de ferro e alumínio (KALBITZ e KAISER, 2008).

3 HIPÓTESE

A adição contínua e prolongada de resíduos vegetais sobre a superfície do solo sob sistema plantio direto (SPD), principalmente quando utilizadas plantas de cobertura hibernais em sucessão com as culturas comerciais, aumenta os teores de carbono (C) e nitrogênio (N) nas camadas superficiais de solo, quando comparado ao sistema cultivo convencional (SCC). Dessa forma, a hipótese do presente trabalho é:

Após 26 anos, o cultivo do solo com diferentes plantas de cobertura de inverno, além das culturas comerciais altera de maneira semelhante os estoques de C e N no solo sob SPD quando comparado ao SCC. E quando esses estoques (SPD e SCC) são comparados com os estoques de um solo testemunha (mata nativa) até 1 metro de profundidade os valores se diferenciam.

4 OBJETIVO

Objetivou-se com o presente trabalho (i) avaliar o efeito do cultivo de diferentes plantas cobertura de inverno em sucessão as culturas comerciais nos estoques de carbono (C) e nitrogênio (N) em um solo muito argiloso, sob sistema plantio direto (SPD) e sistema cultivo convencional (SCC) após 26 anos e (ii) avaliar a eficiência dos sistemas de manejo (SPD e SCC) através da comparação dos estoques de C e N com os estoques análogos de um solo testemunha, sob mata nativa (não antropizados), até um metro de profundidade após 26 anos.

5 MATERIAL E MÉTODOS

5.1 Descrição do local de estudo e histórico da área experimental

O estudo foi desenvolvido em experimento instalado na Estação Experimental do Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR), no município de Pato Branco, região sudoeste do Paraná (52° 41' W e 26° 07' S) (Figura 2 e 3). O solo utilizado foi um Latossolo Vermelho Aluminoférrico, muito argiloso (EMBRAPA, 2006), formado a partir de derramamento basáltico, apresentando as seguintes características (Tabela 3). O clima da região é subtropical úmido, Cfb, segundo classificação de Köppen, com precipitação média anual de 1.200 a 1.500 mm. O relevo é suave ondulado com declividade entre 4–7%, com clima caracterizado por verão fresco, com média do mês mais quente <22 °C e a do mês mais frio <18 °C, sem estação seca definida (CALEGARI, 2006).

Tabela 3 – Textura e composição mineralógica do Latossolo Vermelho Aluminoférrico utilizado no experimento (CALEGARI, 2006).

Horizonte	Textura ¹			Mineralogia ²						Oxalato ³		
	Argila	Silte	Areia	1:1 ⁴	2:1 ⁵	Fe ₂ O ₃	Maghemita	Hematita	Goethita	Gibbsita	Fe	Al
A (0–1 m)	720	140	140	680	132	140	130	510	360	50	55	22
Bw (1–2 m)	-	-	-	710	128	140	120	540	340	20	-	-

¹Calegari (2006); ²Costa (1996); ³Solo da camada 0–40cm; ⁴Caulinita e Halloisita; ⁵Vermiculita e/ou Montmorillonita.



Figura 2– Localização do experimento na Estação Experimental do IAPAR, na região Sudoeste do Paraná (CALEGARI, 2006).



Figura 3– Visão geral da localização do experimento instalado na Estação Experimental do IAPAR, região Sudoeste do Paraná. Fonte: Google Earth.

A área experimental foi coberta por Mata Atlântica até 1976, ano em que foi derrubada, dando lugar às culturas de verão: milho (*Zea mays* L.) e feijão (*Phaseolus vulgaris* L.), cultivadas sob sistema cultivo convencional (SCC). Durante 10 anos, em toda a área, o solo foi preparado com uma aração e duas gradagens leves, sempre antes de cada cultivo. A partir do inverno de 1986, a área foi dividida em três blocos com dois sistemas de manejo (sistema plantio direto (SPD) e SCC) e 36 parcelas, das quais, no presente trabalho foram utilizadas 24 parcelas.

No mesmo ano, o solo passou a ser cultivado com diferentes plantas de cobertura de inverno distribuindo-as entre os dois sistemas de manejo, SPD e SCC. As plantas de cobertura utilizadas foram: aveia preta (*Avena strigosa* Schreb), centeio (*Secale cereale* L.), ervilhaca comum (*Vicia sativa* L.), ervilhaca peluda (*Vicia villosa* Roth), nabo forrageiro

(*Raphanus sativus* L.), trigo (*Triticum aestivum* L.), tremoço azul (*Lupinus angustifolius* L.) e o pousio.

As plantas de cobertura de inverno foram implantadas em 13 dos 26 cultivos realizados (Tabela 4). As mesmas foram controladas no estágio de pleno florescimento através de rolo-faca (aveia preta, centeio, ervilhaca comum, ervilhaca peluda, nabo forrageiro, trigo, tremoço azul) ou pela aplicação de herbicidas (pousio), sendo que ocasionalmente, após o rolo-faca, o controle da vegetação era complementado com herbicida. As parcelas com trigo foram colhidas até 1995 (sete cultivos), e seus resíduos deixados na superfície do solo antes do preparo de solo para o cultivo de verão. Nos demais anos o trigo foi manejado como as demais plantas de cobertura. No verão, toda a área foi cultivada com soja (*Glycine max* L.) ou milho (Tabela 4).

Tabela 4 – Culturas estabelecidas sob SPD e SCC, no decorrer de 26 anos na área experimental sob um Latossolo Vermelho Aluminoférrico situado na região Sudoeste do Paraná (adaptado de CALEGARI, 2006).

Ano	Espécies de inverno	Culturas de verão
1986	Todas as espécies, cada uma em sua parcela	Milho
1987	Todas as espécies, cada uma em sua parcela	Milho
1988	Todas as espécies, cada uma em sua parcela	Milho
1989	Todas as espécies, cada uma em sua parcela	Soja
1990	Todas as espécies, cada uma em sua parcela	Soja
1991	Aveia preta em todas as parcelas (exceto pousio)	Soja
1992	Todas as espécies, cada uma em sua parcela	Milho
1993	Pousio em todas as parcelas	Soja
1994	Todas as espécies, cada uma em sua parcela	Milho
1995	Aveia preta em todas as parcelas (exceto pousio)	Soja
1996	Aveia preta em todas as parcelas (exceto pousio)	Milho
1997	Aveia preta + nabo em todas as parcelas (exceto pousio)	Soja
1998	Aveia preta em todas as parcelas (exceto pousio)	Soja
1999	Todas as espécies, cada uma em sua parcela	Milho
2000	Todas as espécies, cada uma em sua parcela	Soja
2001	Todas as espécies, cada uma em sua parcela	Soja
2002	Aveia preta + nabo em todas as parcelas (exceto pousio)	Soja
2003	Aveia preta + nabo em todas as parcelas (exceto pousio)	Milho
2004	Aveia preta + nabo em todas as parcelas (exceto pousio)	Soja
2005	Todas as espécies, cada uma em sua parcela	Soja
2006	Aveia preta em todas as parcelas (exceto pousio)	-
2007	Aveia preta + nabo em todas as parcelas (exceto pousio)	Soja
2008	Todas as espécies, cada uma em sua parcela	Milho
2009	Aveia preta em todas as parcelas (exceto pousio)	Soja
2010	Aveia preta + ervilhaca peluda em todas as parcelas (exceto pousio)	Milho
2011	Todas as espécies, cada uma em sua parcela	Milho

Todos os anos realizou-se uma adubação no experimento, sempre no período do verão, com as mesmas quantidades de fertilizantes aplicados em todos os tratamentos, sendo que o fósforo (P), potássio (K) e 1/3 do N foram aplicados, na linha, juntos com a semeadura, e o restante do N, 45 dias após, em cobertura, totalizando 1765 kg ha⁻¹ de P₂O₅, 900 kg ha⁻¹ de K₂O e 580 kg ha⁻¹ de N. Durante o período experimental foram oito aplicações de calcário dolomítico, em superfície, nas doses de: 1,0; 2,0; 3,0; 1,5; 2,0; 2,0; 2,0; 2,0 Mg ha⁻¹ de calcário em todas as parcelas, em 1989, 1992, 1995, 1999, 2001, 2006, 2009 e 2011, respectivamente. Avaliou-se a produção de matéria seca da parte aérea das plantas dos cultivos de verão e dos cultivos de inverno (Tabela 5).

Tabela 5 – Produção de matéria seca da parte aérea das plantas cultivadas durante 26 anos, sob SPD e SCC.

Tratamento de inverno	Produção de matéria seca da parte aérea (Mg ha ⁻¹)							
	Planta de cobertura de inverno		Resíduos das culturas de verão		Total		Média Anual	
	SPD	SCC	SPD	SCC	SPD	SCC	SPD	SCC
Aveia Preta	126,5	106,4	116,8	114,3	243,3	220,7	9,3	8,4
Centeio	111,3	100,7	116,0	111,0	229,3	211,7	8,8	8,1
Ervilhaca Comum	110,3	99,6	121,3	112,0	231,6	211,6	8,9	8,1
Ervilhaca Peluda	102,7	86,2	114,7	108,6	217,4	194,8	8,3	7,5
Nabo Forrageiro	105,4	86,9	120,7	117,4	226,1	204,3	8,7	7,8
Tremoço Azul	109,9	95,7	120,5	112,2	230,4	207,9	8,8	7,9
Trigo	99,5	88,4	110,0	104,8	209,5	193,2	8,0	7,4
Pousio	46,8	36,1	112,9	109,8	159,7	145,9	6,1	5,6

5.2 Coleta das amostras de solo

As amostras de solo foram coletadas em novembro de 2012. Em cada parcela (12 x 20 m) foi aberta uma trincheira de 0,5 m de largura por 0,5 m de comprimento por 1 m de profundidade com pá de corte, onde foi coletado o solo nas camadas de 0–5, 5–10, 10–20, 20–30, 30–40, 40–60, 60–80, 80–100 cm. Também foram coletadas amostras de solo sob mata nativa, em área contígua à área experimental. O solo foi seco em estufa com circulação forçada de ar a ±60°C, peneirado em malha de 2 mm e armazenado. Na mesma trincheira, em cada camada foram coletadas amostras de solo indeformado com auxílio de anéis (4,0 × 5,6 cm), para determinação posterior da densidade do solo.

5.3 Análise de solo

Nas amostras de solo coletadas, foram determinados os teores de C e N, por via seca, através analisador elementar (modelo Flash EA 1112, Thermo Finnigan). Para isso, as amostras de solo foram maceradas, até adquirir consistência homogênea, e colocadas em cápsula de estanho, onde a digestão do material foi feita em câmara de combustão em temperatura de aproximadamente 975°C. Os gases foram detectados por um sensor de termo condutividade e convertidos em porcentagem de C e N. Os estoques de C e N de cada camada foram calculados conforme metodologia proposta por Veldkamp (1994). A fórmula utilizada foi:

$$\text{Estoque de (C/N)} = \frac{\text{C/N} * \text{Ds} * e}{10}$$

Onde:

Estoque de (C/N) = estoque de C ou N em determinada profundidade (Mg ha⁻¹)

C/N = teor de C/N na profundidade amostrada (g kg⁻¹)

Ds = densidade do solo da profundidade (kg dm⁻³)

e = espessura da camada considerada (cm)

5.4 Análises estatísticas

A análise dos dados com um modelo trifatorial não foi possível, uma vez que estes não seguem uma distribuição normal quando são avaliadas todas as camadas conjuntamente, mesmo após serem aplicadas transformações do tipo log, potência, raiz quadrada, raiz cúbica, inversa, inversa da raiz quadrada e box-cox. Dessa forma, o modelo estatístico adotado foi um bifatorial com blocos casualizados, e parcelas subdivididas com três repetições. As culturas de inverno foram consideradas as parcelas principais e os sistemas de manejo de solo as subparcelas. O modelo utilizado foi o seguinte:

$$Y_{ijkl} = \mu + B_i + T_j + \text{error } a(i, j) + M_k + \text{error } b(i, k) + TM_{jk} + \text{error } c(i, j, k) + C_l + \text{error } d(i, l) + TC_{jl} + \text{error } e(i, j, l) + MC_{kl} + \text{error } f(i, k, l) + TMC_{jkl} + \text{error } g(i, j, k, l)$$

onde μ = media experimental; B = blocos ($i = 1, 2, 3$); T = tratamentos de inverno ($j = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$); M = manejo do solo ($k = 1, 2$); C = camada ($l = 1, 2, 3, 4, 5, 6, 7, 8$) e *erro* = erro experimental. Quando os efeitos dos tratamentos foram significativos a 5% de probabilidade pelo teste de F, as diferenças entre as médias dos tratamentos de inverno e dos sistemas de manejo de solo em cada camada foram comparadas pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). Além disso, em cada camada de solo, os dados da área de referência sob mata nativa ($n = 3$) foram comparados com aqueles do solo cultivado sob SPD ($n = 24$) e do solo cultivado sob SCC ($n = 24$), utilizando-se o teste de comparação de médias não-paramétrico de Mann-Whitney U .

6 RESULTADOS

Nenhuma das variáveis avaliadas (densidade, carbono (C), nitrogênio (N) e relação C/N) apresentou interação significativa entre o sistema de manejo de solo e os tratamentos de inverno (Tabela 6). Dessa forma, os resultados serão apresentados e discutidos separadamente para os efeitos do manejo de solo e tratamentos de inverno. Posteriormente, serão apresentadas e discutidas as diferenças entre o solo cultivado e o solo da mata nativa.

6.1 Efeito do sistema de manejo do solo

O teor de C foi maior no solo sob SPD, em relação ao solo sob SCC, somente nas camadas 0–5 e 5–10 cm. O teor de N foi maior no solo sob SPD em comparação ao SCC, apenas na camada superficial (0–5 cm). Já a relação carbono/nitrogênio (C/N) foi maior no solo da camada 0–5 cm sob SCC, em relação ao solo sob SPD. A densidade do solo foi maior no solo das camadas 20–30 e 30–40 cm no solo sob SCC comparativamente ao solo sob SPD (Tabela 7).

Comparando os dois sistemas de manejo, os estoques de C e N foram maiores no solo das camadas 0–5 e 5–10 cm sob SPD e maiores sob SCC no solo da camada 20–30 cm (Tabela 8). Contudo, avaliando os estoques de C e N acumulados, verifica-se que o solo sob SPD apresentou maiores estoques de C e N apenas até a profundidade de 20 cm. Abaixo de 20 cm, até um metro de profundidade, os estoques de C e N nos dois sistemas de manejo de solo não diferiram entre si.

6.2 Efeito dos tratamentos de inverno

A densidade do solo apresentou diferença entre os tratamentos de inverno somente no solo da camada 0–5 cm (Tabela 9). Para ambos os sistemas de manejo de solo (SPD e SCC), o cultivo de nabo forrageiro no inverno resultou em menor densidade do solo, enquanto que o pousio hibernal resultou no adensamento dessa mesma camada de solo.

Tanto no SPD quanto no SCC, os teores de C e N não apresentaram diferença entre os solos cultivados com plantas no período do inverno para nenhuma das camadas de solo avaliadas (Tabela 9).

Contudo, a ausência de cultivo de plantas de cobertura durante período do inverno resultou em menor teor de C e de N no solo das camadas 0–5 e 5–10 cm, tanto no SPD

quanto no SCC. Além disso, em ambos os sistemas de manejo de solo, a maior relação C/N para o solo da camada 0–5 cm foi observada no pousio hibernar, enquanto que, para os demais tratamentos, a relação C/N dessa camada de solo diminuiu na seguinte ordem: centeio = nabo forrageiro > aveia = trigo = ervilhaca peluda > ervilhaca comum > tremoço azul. As demais camadas de solo não apresentaram diferenças entre os tratamentos de inverno.

Os estoques de C e N do solo da camada 0–5 cm foram menores no solo cultivado com nabo forrageiro e no solo que permaneceu sob pousio hibernar, em ambos os sistemas (Tabela 10). Já na camada de 5–10 cm e na camada de 0–10 cm, o solo sob pousio hibernar apresentou menores estoques de C e N, comparativamente àqueles que foram cultivados com plantas de cobertura no inverno (Tabela 10).

6.3 Diferenças entre o solo cultivado e o solo da mata nativa

A densidade do solo da mata nativa foi menor do que no solo cultivado sob SPD e SCC até 60 cm de profundidade (Tabela 7). Já os teores de C e N foram maiores no solo da mata nativa apenas até 20 cm de profundidade, comparado com o solo cultivado (SPD e SCC). A relação C/N foi menor no solo da mata nativa até 10 cm de profundidade comparativamente ao solo cultivado sob ambos SPD e SCC. Por outro lado, a relação C/N do solo da mata nativa foi maior nas camadas 40–100 e 30–100 cm, comparativamente ao solo sob SPD e SCC, respectivamente.

Comparando os estoques de C e N por camada separadamente, é possível verificar que em várias situações o solo da mata nativa apresentou menor estoque que o solo cultivado sob SPD ou SCC (Tabela 8).

O solo cultivado (SPD e SCC) apresentou estoque de C acumulado semelhante ao solo da mata nativa em várias camadas. Além disso, o solo da mata nativa apresentou maior estoque de N acumulado até 10 cm, comparado com o solo sob SPD. Nas demais camadas avaliadas o estoque de N acumulado foi igual no solo sob os dois sistemas de manejo.

Tabela 6 – Significância dos efeitos dos fatores experimentais e suas interações na densidade do solo, e nos teores de C e N, como resultado da análise da variância (ANOVA).

Variável/ Causa de variação	Camada (cm)							
	0–5	5–10	10–20	20–30	30–40	40–60	60–80	80–100
<i>Densidade</i>								
Tratamento de inverno (I)	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Manejo de solo (M)	ns	ns	ns	*	*	ns	ns	ns
I*M	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
<i>Carbono</i>								
Tratamento de inverno (I)	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Manejo de solo (M)	**	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns
I*M	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
<i>Nitrogênio</i>								
Tratamento de inverno (I)	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Manejo de solo (M)	**	ns	ns	*	ns	ns	ns	ns
I*M	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
<i>Relação C/N</i>								
Tratamento de inverno (I)	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Manejo de solo (M)	**	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
I*M	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
<i>Estoque de carbono por camada</i>								
Tratamento de inverno (I)	*	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Manejo de solo (M)	**	*	ns	*	ns	ns	ns	ns
I*M	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
<i>Estoque de nitrogênio por camada</i>								
Tratamento de inverno (I)	*	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Manejo de solo (M)	***	*	ns	**	ns	ns	ns	ns
I*M	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Camada (cm)								
	0–5	0–10	0–20	0–30	0–40	0–60	0–80	0–100
<i>Estoque de carbono acumulado</i>								
Tratamento de inverno (I)	*	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Manejo de solo (M)	**	**	*	ns	ns	ns	ns	ns
I*M	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns
<i>Estoque de nitrogênio acumulado</i>								
Tratamento de inverno (I)	*	*	ns	ns	ns	ns	ns	ns
Manejo de solo (M)	***	*	*	ns	ns	ns	ns	ns
I*M	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns	ns

ns = não significativo, * = significativo a $P < 0,05$, ** = significativo a $P < 0,01$, *** = significativo a $P < 0,001$.

Tabela 7 – Densidade do solo, teores de C e N, e relação C/N no solo da mata e nos solos cultivados sob dois sistemas de manejo (SPD e SCC), após 26 anos.

Camada, cm	Manejo de solo*		Mata	P-value**	
	SPD	SCC		SPD	SCC
Densidade, g cm ⁻³					
0–5	1,06 ± 0,09 a	1,08 ± 0,10 a	0,69 ± 0,13	0,005	0,005
5–10	1,15 ± 0,09 a	1,09 ± 0,12 a	0,71 ± 0,02	0,005	0,005
10–20	1,14 ± 0,07 a	1,15 ± 0,09 a	0,79 ± 0,05	0,005	0,005
20–30	1,02 ± 0,10 b	1,16 ± 0,07 a	0,79 ± 0,08	0,011	0,005
30–40	1,00 ± 0,07 b	1,10 ± 0,11 a	0,81 ± 0,05	0,005	0,005
40–60	0,98 ± 0,08 a	1,04 ± 0,09 a	0,79 ± 0,06	0,009	0,005
60–80	1,01 ± 0,09 a	0,99 ± 0,09 a	0,95 ± 0,12	0,355	0,700
80–100	0,95 ± 0,08 a	0,99 ± 0,11 a	0,94 ± 0,03	0,643	0,440
Carbono, %					
0–5	3,73 ± 0,37 a	2,62 ± 0,17 b	5,97 ± 1,38	0,005	0,005
5–10	2,78 ± 0,28 a	2,59 ± 0,19 b	4,05 ± 0,97	0,005	0,005
10–20	2,44 ± 0,25 a	2,45 ± 0,22 a	2,78 ± 0,27	0,054	0,054
20–30	2,09 ± 0,57 a	2,22 ± 0,29 a	2,27 ± 0,08	0,105	0,487
30–40	1,87 ± 0,95 a	1,83 ± 0,31 a	2,03 ± 0,15	0,316	0,217
40–60	1,64 ± 0,18 a	1,58 ± 0,29 a	1,74 ± 0,90	0,190	0,090
60–80	1,43 ± 0,24 a	1,35 ± 0,33 a	1,52 ± 0,45	0,355	0,280
80–100	1,23 ± 0,22 a	1,23 ± 0,33 a	1,36 ± 0,22	0,217	0,355
Nitrogênio, %					
0–5	0,31 ± 0,04 a	0,19 ± 0,02 b	0,58 ± 0,16	0,005	0,005
5–10	0,21 ± 0,03 a	0,19 ± 0,02 a	0,37 ± 0,11	0,005	0,005
10–20	0,17 ± 0,02 a	0,18 ± 0,02 a	0,21 ± 0,03	0,037	0,037
20–30	0,14 ± 0,03 a	0,15 ± 0,03 a	0,15 ± 0,01	0,247	0,440
30–40	0,12 ± 0,02 a	0,12 ± 0,03 a	0,12 ± 0,01	0,939	0,817
40–60	0,10 ± 0,02 a	0,09 ± 0,02 a	0,09 ± 0,01	0,355	0,589
60–80	0,08 ± 0,01 a	0,08 ± 0,03 a	0,08 ± 0,04	0,817	0,817
80–100	0,07 ± 0,01 a	0,07 ± 0,02 a	0,06 ± 0,01	0,700	0,817
Relação C/N					
0–5	12,1 ± 0,51 b	13,8 ± 0,70 a	10,5 ± 0,53	0,005	0,005
5–10	13,1 ± 0,86 a	13,8 ± 0,78 a	11,2 ± 0,98	0,014	0,007
10–20	14,1 ± 1,19 a	13,9 ± 0,86 a	13,2 ± 1,11	0,165	0,190
20–30	15,2 ± 1,78 a	14,5 ± 1,16 a	15,4 ± 0,57	0,589	0,090
30–40	16,2 ± 6,50 a	15,6 ± 1,68 a	17,5 ± 0,74	0,09	0,045
40–60	17,1 ± 2,32 a	17,1 ± 2,16 a	19,1 ± 0,22	0,021	0,037
60–80	18,3 ± 2,66 a	18,0 ± 3,43 a	19,2 ± 2,81	0,045	0,045
80–100	18,8 ± 3,49 a	18,6 ± 3,71 a	21,7 ± 1,50	0,045	0,045

SPD, sistema plantio direto; SCC, sistema de cultivo convencional.

*Valores para cada sistema de manejo de solo em cada profundidade são a média geral de oito tratamentos de inverno ($n = 24$); médias seguidas pela mesma letra na linha, comparando sistemas de manejo de solo em cada camada, não são significativamente diferentes a $P < 0,05$ pelo teste de Tukey.

**Probabilidade de haver diferença entre o solo da mata e o solo cultivado sob SPD ou SCC pelo teste de Mann-Whitney U (valores em negrito são significativamente diferentes a $P < 0,05$).

Tabela 8 – Estoque de C e N no solo da mata e no solo cultivado sob dois sistemas de manejo (SPD e SCC), após 26 anos.

Camada, cm	Manejo de solo*		Mata	P-value**	
	SPD	SCC		SPD	SCC
Estoque de carbono (Mg ha ⁻¹)					
0–5	19,8 ± 2,1 a	14,2 ± 1,8 b	20,7 ± 2,1	0,817	0,007
5–10	15,9 ± 2,0 a	14,1 ± 1,9 b	14,3 ± 3,8	0,280	0,817
10–20	27,7 ± 3,1 a	28,1 ± 3,0 a	22,0 ± 2,9	0,017	0,014
20–30	21,4 ± 6,5 b	25,9 ± 4,1 a	17,9 ± 2,5	0,054	0,009
30–40	18,7 ± 9,9 a	20,1 ± 4,5 a	16,5 ± 1,1	0,045	0,045
40–60	32,3 ± 4,5 a	33,1 ± 7,3 a	27,5 ± 1,2	0,045	0,045
60–80	28,8 ± 5,4 a	26,3 ± 7,1 a	28,8 ± 12,4	0,700	0,758
80–100	23,6 ± 4,9 a	24,0 ± 6,9 a	25,6 ± 3,4	0,440	0,589
Estoque de carbono acumulado (Mg ha ⁻¹)					
0–5	19,8 ± 2,1 a	14,2 ± 1,9 b	20,7 ± 2,1	0,817	0,007
0–10	35,7 ± 3,1 a	28,3 ± 3,4 b	35,0 ± 5,5	0,487	0,037
0–20	63,4 ± 5,3 a	56,4 ± 5,8 b	57,0 ± 7,4	0,143	0,758
0–30	84,8 ± 10,5 a	82,2 ± 8,5 a	74,9 ± 9,9	0,123	0,247
0–40	103,5 ± 15,6 a	102,4 ± 11,8 a	91,4 ± 10,6	0,076	0,165
0–60	135,8 ± 18,1 a	135,5 ± 17,5 a	119,0 ± 10,6	0,055	0,090
0–80	164,6 ± 21,2 a	161,8 ± 23,6 a	147,8 ± 22,8	0,143	0,190
0–100	188,2 ± 21,7 a	185,8 ± 28,5 a	173,5 ± 25,2	0,280	0,247
Estoque de nitrogênio (Mg ha ⁻¹)					
0–5	1,6 ± 0,2 a	1,0 ± 0,2 b	2,0 ± 0,3	0,045	0,005
5–10	1,2 ± 0,2 a	1,0 ± 0,2 b	1,3 ± 0,4	0,758	0,217
10–20	2,0 ± 0,3 a	2,0 ± 0,3 a	1,7 ± 0,3	0,123	0,076
20–30	1,4 ± 0,3 b	1,8 ± 0,3 a	1,2 ± 0,1	0,045	0,011
30–40	1,2 ± 0,2 a	1,3 ± 0,4 a	0,9 ± 0,1	0,045	0,045
40–60	1,9 ± 0,4 a	2,0 ± 0,5 a	1,4 ± 0,1	0,037	0,021
60–80	1,6 ± 0,3 a	1,5 ± 0,6 a	1,4 ± 1,0	0,440	0,700
80–100	1,3 ± 0,3 a	1,3 ± 0,4 a	1,2 ± 0,2	0,589	0,440
Estoque de nitrogênio acumulado (Mg ha ⁻¹)					
0–5	1,6 ± 0,2 a	1,0 ± 0,2 b	2,0 ± 0,3	0,054	0,005
0–10	2,8 ± 0,3 a	2,0 ± 0,3 b	3,3 ± 0,7	0,355	0,007
0–20	4,8 ± 0,5 a	4,0 ± 0,5 b	5,0 ± 0,9	0,939	0,090
0–30	6,2 ± 0,7 a	5,8 ± 0,8 a	6,2 ± 1,1	0,537	1,000
0–40	7,4 ± 0,9 a	7,1 ± 1,0 a	7,1 ± 1,1	0,487	0,589
0–60	9,3 ± 1,1 a	9,1 ± 1,5 a	8,5 ± 1,1	0,217	0,355
0–80	10,8 ± 1,3 a	10,6 ± 1,9 a	9,9 ± 2,1	0,247	0,355
0–100	12,2 ± 1,5 a	11,9 ± 2,2 a	11,2 ± 2,3	0,316	0,440

SPD, sistema plantio direto; SCC, sistema de cultivo convencional.

*Valores para cada sistema de manejo de solo em cada profundidade são a média geral de oito tratamentos de inverno ($n = 24$); médias seguidas pela mesma letra na linha, comparando sistemas de manejo de solo em cada camada, não são significativamente diferentes a $P < 0,05$ pelo teste de Tukey.

**Probabilidade de haver diferença entre o solo da mata e o solo cultivado sob SPD ou SCC pelo teste de Mann-Whitney U (valores em negrito são significativamente diferentes a $P < 0,05$).

Tabela 9– Densidade do solo, teores de C e N e relação C/N no solo afetado por diferentes tratamentos de inverno após 26 anos.

Camada cm	Tratamento de inverno							
	Aveia	Centeio	E. comum	E. peluda	Nabo	Tremoço	Trigo	Pousio
Densidade (g cm ⁻³)								
0–5	1,05 ± 0,07 ab	1,06 ± 0,06 ab	1,12 ± 0,08 ab	1,07 ± 0,11 ab	1,00 ± 0,12 b	1,02 ± 0,07 ab	1,09 ± 0,12 ab	1,15 ± 0,05 a
5–10	1,16 ± 0,05 a	1,13 ± 0,12 a	1,13 ± 0,15 a	1,17 ± 0,10 a	1,08 ± 0,13 b	1,11 ± 0,13 a	1,08 ± 0,08 a	1,08 ± 0,09 a
10–20	1,19 ± 0,03 a	1,12 ± 0,09 a	1,13 ± 0,07 a	1,12 ± 0,08 a	1,13 ± 0,08 a	1,14 ± 0,09 a	1,13 ± 0,08 a	1,18 ± 0,12 a
20–30	1,08 ± 0,12 a	1,05 ± 0,12 a	1,09 ± 0,15 a	1,15 ± 0,07 a	1,08 ± 0,14 a	1,07 ± 0,06 a	1,07 ± 0,12 a	1,14 ± 0,11 a
30–40	1,10 ± 0,13 a	1,07 ± 0,11 a	1,04 ± 0,10 a	1,04 ± 0,06 a	0,99 ± 0,09 a	1,03 ± 0,11 a	1,01 ± 0,09 a	1,10 ± 0,11 a
40–60	1,05 ± 0,04 a	0,99 ± 0,10 a	1,03 ± 0,11 a	0,99 ± 0,04 a	1,01 ± 0,05 a	0,98 ± 0,13 a	0,99 ± 0,09 a	1,06 ± 0,12 a
60–80	0,94 ± 0,03 a	0,94 ± 0,09 a	0,98 ± 0,06 a	1,07 ± 0,07 a	0,98 ± 0,12 a	1,00 ± 0,15 a	1,02 ± 0,04 a	1,03 ± 0,07 a
80–100	0,93 ± 0,07 a	0,95 ± 0,11 a	0,98 ± 0,08 a	0,99 ± 0,09 a	0,94 ± 0,09 a	0,94 ± 0,11 a	1,05 ± 0,13 a	1,00 ± 0,08 a
Carbono (%)								
0–5	3,2 ± 0,7 a	3,2 ± 0,8 a	3,1 ± 0,5 a	3,2 ± 0,6 a	3,3 ± 0,7 a	3,4 ± 0,8 a	3,2 ± 0,6 a	2,8 ± 0,4 b
5–10	2,7 ± 0,3 a	2,6 ± 0,3 a	2,7 ± 0,1 a	2,6 ± 0,3 a	2,8 ± 0,2 a	2,8 ± 0,3 a	2,8 ± 0,2 a	2,4 ± 0,1 b
10–20	2,4 ± 0,2 a	2,3 ± 0,2 a	2,4 ± 0,2 a	2,4 ± 0,2 a	2,6 ± 0,3 a	2,5 ± 0,3 a	2,6 ± 0,3 a	2,3 ± 0,1 a
20–30	2,1 ± 0,2 a	2,1 ± 0,2 a	2,3 ± 0,2 a	2,1 ± 0,3 a	2,2 ± 0,3 a	2,1 ± 0,4 a	2,2 ± 1,0 a	2,1 ± 0,2 a
30–40	1,8 ± 0,2 a	1,8 ± 0,2 a	2,0 ± 0,2 a	1,8 ± 0,2 a	1,8 ± 0,2 a	1,9 ± 0,5 a	1,9 ± 0,3 a	1,9 ± 0,2 a
40–60	1,7 ± 0,1 a	1,5 ± 0,2 a	1,7 ± 0,2 a	1,5 ± 0,1 a	1,5 ± 0,2 a	1,6 ± 0,3 a	1,7 ± 0,4 a	1,6 ± 0,2 a
60–80	1,4 ± 0,1 a	1,3 ± 0,2 a	1,5 ± 0,1 a	1,3 ± 0,1 a	1,4 ± 0,1 a	1,3 ± 0,5 a	1,5 ± 0,5 a	1,4 ± 0,2 a
80–100	1,3 ± 0,1 a	1,3 ± 0,3 a	1,2 ± 0,2 a	1,4 ± 0,1 a	1,2 ± 0,2 a	1,2 ± 0,4 a	1,1 ± 0,3 a	1,3 ± 0,4 a
Nitrogênio (%)								
0–5	0,25 ± 0,07 a	0,25 ± 0,09 a	0,25 ± 0,05 a	0,25 ± 0,07 a	0,26 ± 0,08 a	0,27 ± 0,08 a	0,26 ± 0,07 a	0,21 ± 0,04 b
5–10	0,20 ± 0,03 a	0,19 ± 0,03 a	0,21 ± 0,01 a	0,19 ± 0,03 a	0,21 ± 0,03 a	0,21 ± 0,03 a	0,22 ± 0,03 a	0,18 ± 0,01 b
10–20	0,17 ± 0,02 a	0,16 ± 0,02 a	0,18 ± 0,01 a	0,17 ± 0,02 a	0,18 ± 0,02 a	0,18 ± 0,02 a	0,19 ± 0,03 a	0,16 ± 0,01 a
20–30	0,15 ± 0,02 a	0,14 ± 0,02 a	0,16 ± 0,01 a	0,14 ± 0,04 a	0,15 ± 0,02 a	0,15 ± 0,04 a	0,15 ± 0,04 a	0,14 ± 0,02 a
30–40	0,11 ± 0,02 a	0,11 ± 0,02 a	0,13 ± 0,02 a	0,11 ± 0,03 a	0,11 ± 0,01 a	0,13 ± 0,04 a	0,12 ± 0,02 a	0,12 ± 0,03 a
40–60	0,10 ± 0,01 a	0,08 ± 0,02 a	0,11 ± 0,01 a	0,08 ± 0,01 a	0,09 ± 0,01 a	0,09 ± 0,02 a	0,10 ± 0,03 a	0,09 ± 0,02 a
60–80	0,09 ± 0,02 a	0,07 ± 0,02 a	0,08 ± 0,01 a	0,07 ± 0,01 a	0,08 ± 0,01 a	0,08 ± 0,03 a	0,08 ± 0,04 a	0,07 ± 0,01 a

80–100	0,07 ± 0,01 a	0,06 ± 0,01 a	0,08 ± 0,01 a	0,06 ± 0,02 a	0,07 ± 0,01 a	0,06 ± 0,02 a	0,07 ± 0,01 a	0,07 ± 0,03 a
Relação C/N								
0–5	12,8 ± 0,8 abc	13,2 ± 1,3 ab	12,5 ± 0,9 bc	13,0 ± 1,4 abc	13,2 ± 1,5 ab	12,4 ± 0,6 c	12,7 ± 1,01 abc	13,4 ± 0,8 a
5–10	13,4 ± 0,7 a	13,6 ± 1,1 a	13,1 ± 0,9 a	13,7 ± 0,8 a	13,4 ± 0,9 a	13,3 ± 1,2 a	13,2 ± 1,0 a	13,9 ± 0,6 a
10–20	14,0 ± 0,7 a	14,7 ± 1,1 a	13,3 ± 0,9 a	14,3 ± 0,9 a	13,8 ± 0,6 a	13,8 ± 0,7 a	14,1 ± 1,9 a	14,2 ± 0,9 a
20–30	14,8 ± 1,3 a	15,3 ± 1,1 a	14,1 ± 1,2 a	15,7 ± 1,9 a	14,6 ± 0,6 a	14,2 ± 1,2 a	15,1 ± 2,7 a	15,1 ± 1,6 a
30–40	15,6 ± 0,9 a	16,7 ± 1,9 a	15,2 ± 1,3 a	17,0 ± 2,2 a	15,7 ± 0,8 a	15,5 ± 13,1 a	15,8 ± 1,1 a	15,8 ± 2,2 a
40–60	16,1 ± 0,5 a	18,5 ± 2,9 a	16,6 ± 1,4 a	18,0 ± 1,8 a	16,4 ± 0,7 a	16,3 ± 2,7 a	16,4 ± 1,2 a	18,3 ± 3,7 a
60–80	17,3 ± 2,3 a	19,5 ± 4,8 a	18,7 ± 1,8 a	18,6 ± 3,1 a	17,2 ± 0,7 a	17,0 ± 3,0 a	18,0 ± 3,5 a	19,4 ± 3,2 a
80–100	17,8 ± 0,6 a	20,0 ± 4,1 a	18,3 ± 2,7 a	19,8 ± 4,7 a	17,3 ± 1,5 a	17,1 ± 2,4 a	18,5 ± 1,5 a	21,1 ± 6,2 a

Valores em cada camada em cada tratamento de inverno são a média geral de dois sistemas de manejo de solo ($n = 6$); médias seguidas pela mesma letra na linha, comparando tratamento de inverno em cada profundidade, não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey a $P < 0,05$.

Tabela 9 – Estoque de C e N no solo da mata e no solo cultivado afetado por diferentes tratamentos de inverno após 26 anos.

Camada cm	Tratamento de inverno							
	Aveia	Centeio	E. comum	E. peluda	Nabo	Tremoço	Trigo	Pousio
Estoque de carbono (Mg ha ⁻¹)								
0–5	16,6 ± 3,6 ab	17,3 ± 4,9 a	17,5 ± 2,9 a	17,2 ± 3,7 a	16,2 ± 1,9 b	17,3 ± 5,0 a	17,4 ± 3,6 a	16,3 ± 2,2 b
5–10	15,5 ± 1,9 a	14,4 ± 1,6 a	15,3 ± 2,4 a	15,6 ± 2,6 a	15,1 ± 2,6 a	15,6 ± 2,4 a	14,4 ± 1,6 a	13,2 ± 1,4 b
10–20	28,2 ± 2,3 a	26,1 ± 2,8 a	27,7 ± 3,2 a	27,0 ± 3,8 a	28,9 ± 3,4 a	28,5 ± 1,9 a	29,2 ± 4,2 a	27,4 ± 2,6 a
20–30	23,2 ± 4,1 a	21,7 ± 3,3 a	24,9 ± 4,8 a	24,9 ± 5,0 a	23,4 ± 4,9 a	22,9 ± 5,0 a	28,3 ± 11,8 a	24,4 ± 3,7 a
30–40	19,6 ± 2,9 a	19,1 ± 4,1 a	20,6 ± 4,0 a	19,3 ± 3,1 a	17,8 ± 1,0 a	19,3 ± 5,5 a	19,0 ± 4,8 a	20,4 ± 4,5 a
40–60	35,3 ± 1,8 a	29,9 ± 4,2 a	35,5 ± 4,5 a	30,0 ± 2,4 a	31,1 ± 4,7 a	30,3 ± 5,8 a	33,8 ± 9,5 a	34,9 ± 8,8 a
60–80	26,8 ± 3,1 a	24,7 ± 5,4 a	29,9 ± 3,5 a	28,6 ± 2,2 a	26,6 ± 4,2 a	24,6 ± 8,4 a	30,3 ± 10,4 a	29,1 ± 5,5 a
80–100	24,2 ± 3,0 a	20,9 ± 6,5 a	27,9 ± 4,3 a	23,9 ± 2,0 a	22,4 ± 5,1 a	19,8 ± 7,5 a	26,0 ± 5,5a	22,8 ± 9,3 a
Estoque de carbono acumulado (Mg ha ⁻¹)								
0–5	16,6 ± 3,7 ab	17,3 ± 4,9 a	17,5 ± 2,9 a	17,2 ± 3,7 a	16,2 ± 1,9 b	17,3 ± 5,1 a	17,4 ± 3,6 a	16,3 ± 2,2 ab
0–10	36,7 ± 5,4 a	36,0 ± 5,6 a	36,5 ± 4,5 a	32,8 ± 5,8 a	31,3 ± 3,8 a	32,9 ± 6,9 a	32,9 ± 3,7 a	29,5 ± 3,3 b
0–20	69,4 ± 7,3a	67,0 ± 4,9 a	69,3 ± 7,2 a	59,9 ± 8,9 a	60,3 ± 5,2 a	61,4 ± 8,3 a	62,1 ± 6,3 a	56,9 ± 3,9 a
0–30	83,2 ± 7,0 a	80,8 ± 4,8 a	85,8 ± 8,2 a	84,7 ± 12,3 a	83,7 ± 7,6 a	84,3 ± 10,2 a	85,9 ± 16,9 a	81,3 ± 3,9 a
0–40	97,9 ± 8,7 a	95,6 ± 7,2 a	100,5 ± 11,6 a	104,0 ± 15,1 a	101,4 ± 8,4 a	103,6 ± 22,8 a	104,7 ± 20,2 a	101,6 ± 7,9 a
0–60	141,7 ± 9,3 a	133,9 ± 10,9 a	146,1 ± 14,9 a	134,1 ± 16,8 a	132,6 ± 12,4 a	133,9 ± 25,6 a	138,7 ± 26,8 a	136,7 ± 16,6 a
0–80	164,7 ± 11,4 a	156,2 ± 15,9 a	173,0 ± 18,1 a	162,6 ± 16,9 a	159,2 ± 14,5 a	158,5 ± 31,5 a	169,0 ± 34,9 a	165,8 ± 21,3 a
0–100	188,8 ± 12,9 a	178,9 ± 17,1 a	199,7 ± 22,1 a	186,5 ± 15,5 a	181,6 ± 18,8 a	178,6 ± 36,0 a	195,0 ± 33,6 a	188,6 ± 30,1 a
Estoque de nitrogênio (Mg ha ⁻¹)								
0–5	1,3 ± 0,4 ab	1,3 ± 0,5 a	1,4 ± 0,3 a	1,4 ± 0,4 a	1,3 ± 0,3 b	1,4 ± 0,5 a	1,4 ± 0,4 a	1,2 ± 0,2 b
5–10	1,2 ± 0,2 a	1,1 ± 0,2 a	1,2 ± 0,2 a	1,2 ± 0,3 a	1,1 ± 0,2 a	1,2 ± 0,2 a	1,2 ± 0,2 a	0,9 ± 0,1 b
10–20	2,0 ± 0,2 a	1,8 ± 0,2 a	2,1 ± 0,2 a	1,9 ± 0,4 a	2,1 ± 0,3 a	2,1 ± 0,2 a	2,1 ± 0,3 a	1,9 ± 0,3 a
20–30	1,6 ± 0,4 a	1,4 ± 0,2 a	1,8 ± 0,3 a	1,6 ± 0,5 a	1,6 ± 0,3 a	1,6 ± 0,4 a	1,6 ± 0,5 a	1,6 ± 0,3 a
30–40	1,3 ± 0,2 a	1,2 ± 0,4 a	1,4 ± 0,3 a	1,2 ± 0,3 a	1,1 ± 0,04 a	1,4 ± 0,5 a	1,2 ± 0,4 a	1,3 ± 0,4 a

40–60	2,2 ± 0,1 a	1,7 ± 0,4 a	2,2 ± 0,4 a	1,6 ± 0,3 a	1,9 ± 0,3 a	1,8 ± 0,5 a	2,1 ± 0,6 a	1,9 ± 0,6 a
60–80	1,6 ± 0,3 a	1,3 ± 0,4 a	1,6 ± 0,3 a	1,5 ± 0,3 a	1,6 ± 0,3 a	1,5 ± 0,5 a	1,7 ± 0,9 a	1,5 ± 0,4 a
80–100	1,4 ± 0,2 a	1,1 ± 0,2 a	1,6 ± 0,3 a	1,2 ± 0,3 a	1,3 ± 0,3 a	1,1 ± 0,4 a	1,4 ± 0,2 a	1,2 ± 0,6 a
Estoque de nitrogênio acumulado (Mg ha ⁻¹)								
0–5	1,3 ± 0,4 ab	1,3 ± 0,5 a	1,4 ± 0,3 a	1,4 ± 0,4 a	1,3 ± 0,3 b	1,4 ± 0,5 a	1,4 ± 0,4 a	1,2 ± 0,2 b
0–10	2,5 ± 0,6 a	2,4 ± 0,6 a	2,6 ± 0,5 a	2,5 ± 0,6 a	2,4 ± 0,4 a	2,6 ± 0,7 a	2,5 ± 0,4 a	2,2 ± 0,3 b
0–20	4,5 ± 0,8 a	4,2 ± 0,6 a	4,7 ± 0,7 a	4,4 ± 0,8 a	4,5 ± 0,6 a	4,7 ± 0,8 a	4,6 ± 0,5 a	4,1 ± 0,4 a
0–30	6,1 ± 0,8 a	5,6 ± 0,4 a	6,4 ± 0,7 a	6,1 ± 1,2 a	6,1 ± 0,6 a	6,3 ± 0,9 a	6,3 ± 0,6 a	5,8 ± 0,4 a
0–40	7,4 ± 0,9 a	6,8 ± 0,5 a	7,8 ± 0,9 a	7,2 ± 1,4 a	7,2 ± 0,6 a	7,7 ± 1,4 a	7,4 ± 0,8 a	7,1 ± 0,8 a
0–60	9,5 ± 0,9 a	8,4 ± 0,8 a	9,9 ± 1,3 a	8,9 ± 1,6 a	9,1 ± 0,9 a	9,5 ± 1,7 a	9,5 ± 1,1 a	9,1 ± 1,4 a
0–80	11,2 ± 1,2 a	9,8 ± 1,2 a	11,6 ± 1,5 a	10,3 ± 1,8 a	10,7 ± 1,1 a	11,0 ± 2,2 a	11,2 ± 1,8 a	10,6 ± 1,8 a
0–100	12,5 ± 1,3 a	10,8 ± 1,3 a	13,2 ± 1,6 a	11,5 ± 1,9 a	11,9 ± 1,3 a	12,1 ± 2,5 a	12,6 ± 1,8 a	11,7 ± 2,4 a

Valores em cada camada em cada tratamento de inverno são a média geral de dois sistemas de manejo de solo ($n = 6$); médias seguidas pela mesma letra na linha, comparando tratamento de inverno em cada profundidade, não são significativamente diferentes pelo teste de Tukey a $P < 0,05$

7 DISCUSSÃO

7.1 Efeito do sistema de manejo do solo

O uso do arado e da grade para o preparo anual do solo sob SCC, por longo período de tempo (26 anos) proporcionou aumento na densidade nas camadas subsuperficiais (20–30 e 30–40 cm), em relação ao SPD. Em análise realizada após 19 anos de implantação do experimento, Calegari (2006) já havia constatado que o solo da subsuperfície apresentava maior densidade (10–20 e 20–30 cm) sob SCC, em relação ao SPD. Tiecher et al. (2012) constataram, em amostras coletadas aos 23 anos de experimento, maior valor de densidade do solo na camada 5–10 cm sob SPD, em relação ao SCC. Desse modo, nas três avaliações realizadas até o presente momento (19, 23 e 26 anos) há tendência de maior adensamento do solo da camada (5–10 cm) no SPD e do solo da camada (10–40 cm) no SCC.

Esses resultados corroboram com aqueles obtidos por Derpsch et al. (1986), que após sete anos de experimentação em um Latossolo, observaram maior densidade sob SCC na camada de 20–30 cm. Outros autores, como Stone e Silveira (2001), trabalhando com um Latossolo Vermelho, também verificaram camadas compactadas abaixo de 30 cm no SCC. De acordo com Reichert et al. (2007), no SCC, isso é devido ao constante revolvimento para o preparo do solo. Já no SPD, o maior teor de C das camadas superficiais contribui para a redução da densidade (FERNANDES et al., 1983).

Após 26 anos, o menor revolvimento do solo e a maior deposição de resíduos culturais sobre a superfície resultaram em maior teor de C nas camadas superficiais (0–5 e 5–10 cm) no solo sob SPD, comparativamente ao SCC. De acordo com Franzluebbbers et al. (1996) isso é devido a que, no SPD, apenas uma parte dos resíduos orgânicos ficam em contato direto com a superfície, reduzindo assim a sua taxa de decomposição e consequentemente aumentando o teor de C. Esse resultado é similar àquele obtido por Conceição et al. (2013) em um experimento com 18 anos de condução, em um Acrisol (WRB), empregando diferentes sistemas de manejo e diferentes plantas de cobertura, os autores encontraram maior teor de C na camada 0–5 cm sob SPD, quando comparado ao solo sob SCC. Nesse sentido, outros autores também verificaram aumento no teor de C quando realizaram análise aos 23 anos de cultivo do solo, e o teor de C encontrado na camada 0–5 cm foi $1,22 \text{ g C kg}^{-1}$, após 10 anos (34 anos) esse valor foi de $1,49 \text{ g C kg}^{-1}$, para a mesma camada (FRAZÃO et al., 2014). Além disso, outros fatores podem contribuir

para o aumento do teor de C tanto no SPD quanto no SCC, um deles é o teor de argila, visto que, o solo é classificado como muito argiloso e isso reduz a taxa de decomposição da MOS.

O sistema de manejo de solo também influenciou o teor de N na camada superficial (0–5 cm), que se mostrou superior no solo sob SPD. No solo manejado sob SPD, a permanência dos resíduos culturais (hibernais e comerciais) sobre a superfície e o não revolvimento contribuíram para o aumento do teor de N da camada superficial. Já no solo sob SCC, o revolvimento ocasionado pelo preparo facilita a lixiviação de N, diluindo o teor no perfil do solo. Para as demais camadas os dois sistemas de manejo não diferiram estatisticamente. Isso pode estar relacionado ao elevado teor de argila presente no solo, o que contribui para o aumento da proteção física do N através da formação de agregados (SÁ et al., 2001). Nesse sentido, Alam et al. (2014) trabalhando em um Aeric Albaquept (USDA) com quatro diferentes tipos de manejo de solo verificaram que o SPD, comparado aos demais manejos, acumulou maior teor de N na camada superficial. Outros autores também obtiveram resultado semelhante, quando verificaram maior teor de N na camada superficial (0–5 cm) no solo sob SPD em comparação ao SCC com mais de 15 anos de adoção do SPD (JANTALIA et al., 2003).

O estágio de decomposição dos resíduos culturais influenciou a relação C/N do solo sob SCC, a qual apresentou o maior valor na camada superficial (0–5 cm) quando comparado com o SPD. No início da decomposição dos resíduos vegetais, a relação C/N do solo tende a ser mais baixa devido a maior quantidade de C e N na fração lábil. O aumento da relação C/N é acelerado pelo revolvimento do solo, favorecendo o ataque microbiano às frações mais lábeis de C e N, de modo que permanecem no solo as frações de C protegidas física e quimicamente. De acordo com Sá (1999), a relação C/N será maior, quanto mais avançado estiver o estágio de degradação do solo, sendo influenciada pelo teor de MOS. Nesse sentido, Ostrowska et al. (2015), afirmam que a relação C/N é um indicador do processo de transformação da MOS, o qual é influenciado pelas condições climáticas, qualidade do solo, biomassa microbiana e pela cobertura vegetal. Dessa forma, pode-se inferir que o sistema de manejo adotado influenciou a relação C/N do solo, a qual foi maior no solo manejado sob SCC.

O menor revolvimento e a maior deposição de resíduos orgânicos culturais sobre a superfície do solo proporcionaram os maiores estoques de C e N nas camadas superficiais (0–5 e 5–10 cm) no solo sob SPD quando comparado com o SCC. Porém, a inversão da camada arável, consequência dos dois preparos anuais do solo, proporcionou aumento dos estoques de C e N na camada 20–30 cm no solo sob SCC comparado com o SPD, o que é de

conhecimento geral na literatura nacional e internacional (JANTALIA et al., 2007; BAKER et al., 2007; FERNANDES e FERNANDES, 2008; NASCIMENTO et al., 2009; FREIXO et al., 2002; DE BONA et al., 2006).

Dessa forma, sempre que forem comparados os dois sistemas de manejo, o solo sob SPD apresentará os maiores valores de estoques de C e N acumulado até certa profundidade e abaixo dela haverá uma camada de solo que acumula mais C no SCC. No entanto, à medida que passa o tempo de condução do experimento comparativo, há tendência de que o teor de C no SPD se iguale ou até supere o do SCC em todo perfil do solo, o que é governado pela taxa de adição de resíduos vegetais depositados sobre a superfície do solo e pelas características físico-químicas do solo, em especial a quantidade e tipo de colóides inorgânicos.

Como consequência, o solo sob SPD também apresentou os maiores valores de estoques de C e N acumulado, até a camada 20 cm. Abaixo de 20 cm os dois sistemas de manejo não diferiram. Isso pode estar relacionado ao elevado teor de argila do solo visto, que este foi classificado como muito argiloso; isso dificultaria tanto o ataque dos microrganismos à MOS, quanto e a lixiviação do C, pela incorporação dos resíduos sob SCC. Em condições ambientais semelhantes, solos com maior teor de argila apresentam maior teor de C, isso se deve à proteção coloidal da MOS, pois ela tem a capacidade de formar diferentes tipos de ligações com a argila (SILVA e MENDONÇA, 2007). Nesse sentido, Zinn et al. (2002) afirmam que o C que está interagindo com as partículas de menor tamanho, em especial a argila, apresenta menor taxa de decomposição, resultando em pequenas mudanças no conteúdo de C. Dessa forma, o C presente no solo, em camadas mais profundas, onde não há interferência antrópica é de mais difícil decomposição pelos microrganismos. Assim, quando os estoques de C e N são avaliados a uma profundidade maior, os valores se equiparam nos dois sistemas de manejo (SPD e SCC).

Com base nisso, pode-se inferir que o sistema de manejo adotado influenciou nos estoques de C e N no solo sob SCC, confirmando que o revolvimento do solo acelera a oxidação da MOS em camadas superficiais, mas proporciona aumento nos estoques em camadas mais profunda, o que se deve principalmente à inversão da camada arável. No entanto, quando os estoques de C e N são calculados até 1 m de profundidade, as diferenças entre o SPD e SCC desaparecem abaixo de 20 cm.

7.2 Efeito dos tratamentos de inverno

Durante os 26 anos de cultivo do solo do presente experimento, a introdução de 13 cultivos de inverno com nabo forrageiro proporcionou diminuição da densidade do solo. A distribuição do seu sistema radicular possibilita o rompimento de camadas compactadas do solo (CALEGARI, 2006). Essas informações se confirmam por Calegari e Pavan (1995) que verificaram melhorias nos atributos físicos, como por exemplo, na agregação do solo quando introduziram plantas de cobertura em rotação com milho, dentre elas o nabo forrageiro, em ambos os sistemas de manejo (SPD e SCC), em comparação ao pousio. Blanco-Canqui e Lal (2007) trabalhando com um Aeric Epiaqualfs (Soil Taxonomy), após 10 anos de implantação do experimento sob SPD, verificaram que a deposição de resíduos de trigo no solo proporcionou redução da densidade nas camadas superficiais.

Em contrapartida a ausência desses resíduos orgânicos sobre a superfície do solo que permaneceu descoberto durante o período hibernal (ou coberto apenas com plantas espontâneas), resultou em maior densidade, quando comparado ao solo cultivado com plantas hibernais. No pousio não há formação do manto orgânico que serve de proteção contra a pressão do tráfego das máquinas, o que resulta no adensamento do solo (STONE e SILVEIRA 2001) fazendo com que, quando comparado o com o solo cultivado com plantas hibernais o pousio apresente a maior densidade. Nesse sentido, Argenton et al. (2005), avaliando diferentes plantas de cobertura intercalares ao milho, verificaram que a introdução da mucuna (*Mucuna pruriens* L.) como planta de cobertura proporcionou redução da densidade do solo, quando comparada com o sistema de milho solteiro. Dessa forma, pode-se verificar que no solo cultivado com plantas hibernais (além das plantas comerciais) as quantidades de resíduos devolvidos ao mesmo foram superiores quando comparado ao pousio, o que proporcionou uma melhor cobertura e por um período de tempo maior, ajudando a minimizar os impactos do tráfego de máquinas, refletindo em uma menor densidade.

Independente de ser ou não revolvido com arações e gradagens, o solo, quando cultivado com plantas hibernais, acumulou maior teor de C e N nas camadas superficiais (0–5 e 5–10 cm), o que no pousio não aconteceu. Em trabalho realizado com sete tratamentos (diferentes plantas de cobertura), sob SCC e SPD, Nascente et al. (2013) verificaram que apenas a cultura do milheto (*Pennisetum glaucum*), dentre as culturas estudadas, aumentou o teor C no solo, sob SPD, efeito esse que pôde ser observado apenas na camada superficial. Já, Tivet et al. (2013) verificaram que, após a mudança do uso da terra, a perda do C foi minimizada pela adoção do SPD. No entanto, a magnitude de recuperação do teor de C foi dependente da quantidade de resíduo vegetal que entrava no sistema via planta de cobertura.

Nesse sentido, Bayer et al. (2004), trabalhando em um Latossolo, com dois sistemas de manejo de solo e quatro rotações de culturas, encontraram maior teor de C no solo sob SPD em comparação ao solo sob SCC. Porém, esse valor foi dependente da cultura utilizada e somente a rotação envolvendo nabo forrageiro e milho apresentou aumento no estoque de C no SPD, em relação ao SCC.

O solo cultivado com nabo forrageiro e sob pousio tiveram os menores estoques de C e N nessa camada: o primeiro, provavelmente por apresentar uma das menores produções de matéria seca anual dentre as demais plantas de cobertura (CASALI, 2012) e o segundo, por permanecer descoberto durante o período hibernal. Porém, mesmo apresentando uma das menores produções de matéria seca, dentre as culturas de inverno, o solo cultivado com nabo forrageiro e o solo que permaneceu sob pousio hibernal apresentaram aumento na produção de matéria seca (cultura de inverno e de verão) durante os 26 anos de condução do experimento. Aos 19 anos de adoção dos sistemas de manejo (SPD e SCC), o solo cultivado com nabo forrageiro apresentou aproximadamente $149,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ de matéria seca e sob pousio $109,9 \text{ Mg ha}^{-1}$ de matéria seca (CALEGARI, 2006). No presente trabalho, após sete anos, a produção de matéria seca gira em torno de $215,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ e de $152,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ para o solo cultivado com nabo forrageiro e solo sob pousio, respectivamente. Outros autores também compararam diferentes tratamentos (plantas de cobertura e o pousio) e verificaram que o tratamento que incluía leguminosa na rotação proporcionou maior estoque de C quando comparado com o pousio, após três e 15 anos de adoção do experimento (HUBBARD et al., 2013; MAZZONCINI et al., 2011) respectivamente. Embora os tratamentos não tenham apresentado diferenças significativas no estoque de C nas camadas subsuperficiais, Reicosky et al. (1995) reforçam que o acúmulo de resíduos orgânicos sobre o solo promove efeitos importantes em relação à atividade microbiana, à ciclagem de nutrientes, ao armazenamento de água e à agregação das partículas.

Os resultados se repetem quando foram calculados os estoques de C e N acumulado, confirmando que a baixa produção de matéria seca dentre as plantas de cobertura estudadas, ou a ausência delas interferiram nos estoques de C e N. Esses dados estão de acordo com os de outros autores, os quais verificaram em experimentos conduzidos em condições de clima subtropical que a utilização de plantas de cobertura de solo com alta produção de resíduos, incluindo leguminosas, aumentou os estoques de C e N do solo (BAYER et al., 2000). Após 17 anos de experimento em um Argissolo Vermelho sob SPD empregando rotação de culturas, incluindo leguminosas, Diekow et al. (2005a) observaram um incremento de 28% no estoque de C na camada 0–17,5 cm. Outros autores afirmam que, quanto maior o tempo

de adoção do SPD, maior é o teor de C na matéria orgânica leve, devido aos resíduos orgânicos adicionados ao solo com diferentes relações C/N (GUARESCHI et al., 2012). Nesse sentido, Sisti et al. (2004) trabalhando em um Latossolo com três diferentes sistemas de rotação de culturas (soja e milho no verão e trigo, ervilhaca peluda e aveia preta no inverno), encontraram maior estoque de C nos sistemas de rotação que incluíam a ervilhaca, e maior estoque de N nas duas rotações que incluíam trigo/soja-ervilhaca peluda/milho e trigo/soja-aveia branca/soja-ervilhaca/milho, sob SPD em relação ao SCC.

Com base nisso, pode-se observar que a quantidade de resíduos depositada no solo interferiu nos estoques, visto que o pousio e o tratamento com nabo forrageiro apresentaram a menor e uma das menores produções de matéria seca, respectivamente, independente do tipo de manejo adotado, refletindo em um menor estoque de C e N dentre as culturas avaliadas.

A baixa produção de matéria seca anual e/ou a ausência de entradas de C e N proporcionaram ao solo, que permaneceu sob pousio hiberna, maior relação C/N, na camada superficial (0–5 cm). De acordo com alguns autores, a relação C/N é um parâmetro utilizado nos modelos para previsão da disponibilidade de N no solo durante a decomposição dos resíduos culturais (NICOLARDOT et al., 2001). Os resíduos vegetais com valores de relação C/N entre 25 e 30 apresentam equilíbrio entre os processos de mineralização e imobilização (ALLISON, 1966). Nesse sentido, Doneda et al. (2012) verificaram que a velocidade de decomposição e de liberação de N foi inversamente proporcional à relação C/N dos resíduos. De acordo com Silva e Mendonça (2007), quando a MOS apresentar relação C/N menor que 30 a mineralização estará prevalecendo sobre a imobilização, liberando os nutrientes para a solução do solo. Diekow (2003) verificou em seu trabalho uma tendência ao aumento da relação C/N em profundidade, a qual também foi observada no presente estudo. Isso pode estar relacionado com a origem da MOS presente nas camadas subsuperficiais do solo, pois grande parte dela advém do sistema radicular das plantas, o qual possui uma maior relação lignina/nitrogênio do que a parte aérea da planta, aumentando assim a relação C/N do solo (BALESDENT e BALABANE, 1996). A partir disso, pode-se inferir que, em todos os tratamentos com plantas hibernais do presente estudo, a mineralização está superando a imobilização, o que proporciona maior disponibilidade de N durante a decomposição dos resíduos culturais depositados ao solo.

7.3 Diferenças entre o solo cultivado e o solo da mata nativa

A transformação do ambiente natural (Mata Atlântica) em sistema agrícola aumentou a densidade do solo até 60 cm de profundidade (Tabelas 7), o que revela a dificuldade de manter a estrutura física natural do solo quando é realizado cultivo mecanizado. O tráfego de máquinas para os tratamentos culturais, a colheita e, no caso do SCC, o preparo do solo são fatores primordiais para a compactação do solo. Além disso, o menor teor de MOS contribuiu para a diminuição da macroporosidade e, conseqüentemente, para o aumento da densidade. Estes resultados estão de acordo com os obtidos Rosa et al. (2003) e Argenton et al. (2005), ambos, trabalhando em um Latossolo, verificaram maiores valores de densidade no solo cultivado quando comparado ao solo da mata nativa até 40 cm de profundidade. Nesse sentido, Cunha et al. (2011), trabalhando em um Latossolo Vermelho distrófico, verificaram que as variações de densidade podem ser explicadas em parte pelo teor de MOS. Esses autores observaram que, após a conversão do solo, que inicialmente encontrava-se sob vegetação de Cerrado, para a produção agrícola, ocorreu redução no teor de MOS com alteração na densidade do solo, independente do sistema de manejo avaliado. Isso demonstra que o uso do solo para fins agrícolas promove alterações nas propriedades físicas, independente do sistema de manejo de solo adotado (SPD e SCC), alterando a densidade do solo.

A substituição da mata nativa por sistemas agrícolas acarretou diminuição do teor de C no solo sob SCC, apenas na camada de 0–10 cm, quando comparado com a mata nativa. Nesse sentido, Islam e Weil (2000) trabalhando em um Typic Paleustults (Soil Taxonomy), verificaram que a substituição da mata nativa por sistemas agrícolas reduziu os teores de C e N. Sá et al. (2014) afirmam que a redução do teor de C no solo sob SCC em comparação a mata nativa é resultado do uso do arado para o preparo do solo. Os mesmos autores verificaram, após a conversão da mata nativa para o sistema agrícola (SCC), uma redução de aproximadamente 38% no teor de C, nos primeiros 20 cm, após 29 anos de adoção do SCC. Outros autores verificaram redução de 25% no estoque de C, nas camadas superficiais, quando o solo da mata nativa passou a ser usado no cultivo agrícola (SHARMA et al., 2014). Uma das principais razões para que a mata nativa apresente os maiores teores de C e N em comparação aos sistemas de cultivo é a grande quantidade de resíduos orgânicos (folhas, galhos e casca das árvores) que ficam depositados na superfície do solo e a não perturbação do sistema (SIQUEIRA NETO et al., 2009), mantendo a superfície do solo sempre coberta. O cultivo do solo, independentemente do tipo de manejo adotado (SCC ou SPD), alterou a quantidade de C e N do solo, mostrando que o solo, quando submetido a

algum grau de perturbação (por menor que este seja), sofre redução nos seus teores de C e N, porém, com o passar dos anos, esses teores podem ser recuperados.

Além disso, o constante revolvimento do solo para o preparo, o qual influenciou a decomposição dos resíduos vegetais depositados sobre a superfície, proporcionou aumento na relação C/N nas camadas superficiais (0–5 e 5–10 cm) do solo cultivado em relação à mata nativa. Esse aumento na relação C/N pode estar associado à proteção física e/ou química do C, devido ao alto teor de argila do solo. De acordo com Bayer (1996) as frações de C protegidas química e fisicamente são constituídas por materiais orgânicos ligados a fração mineral. Outros autores afirmam que a proteção química deve-se à interação da MOS com a fração mineral do solo, enquanto que a proteção física ocorre devido a permanência do C dentro dos microagregados, dificultando o ataque microbiano (BAYER, 1996; SILVA e MENDONÇA, 2007). Nesse sentido, Kleber et al. (2007) afirmam que materiais proteicos formam complexos organominerais, os quais podem se adsorver irreversivelmente nas superfícies dos minerais do solo, dificultando o ataque microbiano. Diekow (2005a) verificou que, nas camadas superficiais, o solo do campo nativo apresentou maior relação C/N do que o solo dos sistemas de culturas e que essa relação ia diminuindo nas camadas mais profundas. Segundo esse autor, isso pode estar associado a dois fatores: a preservação seletiva do N em relação ao C e a maior relação C/N da matéria orgânica particulada no campo nativo em relação àquela dos sistemas de culturas. Baseado nisso, pode-se verificar que o sistema de manejo adotado influenciou a relação C/N do solo, confirmando que o revolvimento do solo acelera a decomposição dos resíduos vegetais, permanecendo assim, as frações de C e N protegidas.

Embora a mata nativa tenha apresentado os maiores teores de C e N, os quais foram contrabalanceados pelos menores valores de densidade do solo, a mesma apresentou os menores estoques de C e N por camada e acumulado, quando comparado com o solo sob SPD e SCC. Nesse sentido, trabalho realizado por Guareschi et al. (2012), em um Latossolo sob SPD com diferentes tempos de adoção, confirmou maior estoque de C na camada 0–20 cm no Cerrado, quando comparado ao solo sob SPD com três anos de adoção e não encontraram diferença significativa no solo sob SPD com 15 e 20 anos de adoção, comparativamente ao Cerrado. Nos primeiros 20 anos de adoção do SPD no Cerrado, o estoque de C aumentou em torno de 6 a 8% nos primeiros 30 cm de profundidade, quando comparado o solo sob SPD com o Cerrado (MAIA et al., 2010). Após 26 anos de cultivo do solo sob SPD e SCC, os dados atuais de estoque de C são comparados com os do início do experimento em 1986 (CALEGARI et al., 2008) na camada 0–20 cm, e observou-se um

aumento de 45,29 Mg ha⁻¹ para 63,4 Mg ha⁻¹ e 56,4 Mg ha⁻¹ para 66,4 Mg ha⁻¹ de C armazenado, respectivamente para o solo sob SPD e SCC. Com base nisso, pode-se inferir que, quando submetido ao cultivo agrícola, o solo sofre alterações, as quais são dependentes do tipo de manejo adotado e do emprego ou não de diferentes plantas de cobertura. Assim, um bom manejo do solo e emprego de sucessão de culturas fazem com que possam ser recuperados de forma lenta e gradual os teores de C e N do solo.

8 CONCLUSÕES

A adoção do SPD, como prática recomendada pela Ciência do Solo, está recuperando o estoque original de C e N, com taxas superiores ao SCC, no solo da camada superficial (0–20 cm).

A permanência do solo sem cultivo durante o período hibernar, independentemente do sistema de manejo do solo adotado (SPD e SCC), levou aos menores estoques de C e N no solo das camadas superficiais.

Não houve diferença entre os estoques de C e N quando foram consideradas profundidades iguais ou superiores a 30 cm.

9 REFERÊNCIAS

AITA, C.; GIACOMINI, S. J. Plantas de cobertura de solo em sistemas agrícolas. In: ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; AITA, C.; BODDEY, R. M.; JANTALIA, C.P.; CAMARGO, F.A.O., eds. **Manejo de sistemas agrícolas: impacto no sequestro de C e nas emissões de gases de efeito estufa**. Porto Alegre, Genesis, p. 59-79, 2006.

ALAM, M. K.; ISLAM, M. M.; SALAHIN, N.; HASANUZZAMAN, M. 2014. Effect of Tillage Practices on Soil Properties and Crop Productivity in Wheat-Mungbean-Rice Cropping System under Subtropical Climatic Conditions. **The Scientific World Journal**. p.15, 2014.

ALBUQUERQUE, M. A. **Estoques de carbono e nitrogênio e emissões de gases de efeito estufa em Latossolo Vermelho sob sistemas de culturas em plantio direto**. 2012. 105p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 2012.

ALLISON, F. E. The fate of nitrogen applied to soils. **Advances in Agronomy**. v. 18, p. 219-258, 1966.

ALVAREZ, C.; ALVAREZ, C. R.; COSTANTINI, A.; BASANTA, M. Carbon and nitrogen sequestration in soils under different management in the semi-arid Pampa (Argentina). **Soil & Tillage Research**, v. 142, p. 25-31, 2014.

ANDRADE, A. P.; MAFRA, A. L.; BALDO, G. R.; PICCOLLA, C. D.; BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J. A. Physical properties of a humic cambisol under tillage and cropping systems after 12 years. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 219-226, 2010.

ARGENTA, G.; SILVA, P. R. F.; FLECK, N. G.; BORTOLINI, C. G.; NEVES, R.; AGOSTINETTO, D. Efeitos do manejo mecânico e químico da aveia preta no milho em sucessão e no controle do capim papua. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 36, p. 851-860, 2001.

ARGENTON, J.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; WILDNER, L. P. Comportamento de atributos relacionados com a forma da estrutura de Latossolo Vermelho sob sistemas de preparo e plantas de cobertura. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, p. 425-435, 2005.

BAKER, J. M.; OCHSNER, T. E.; VENTEREA, R. T.; GRIFFIS, T. J. Tillage and soil carbon sequestration-what do we really know? **Agriculture Ecosystem & Environment**, v.118, p.1-5, 2007.

BALESDENT, J.; BALABANE, M. Major contribution of roots to soil carbon storage inferred from maize cultivated soils. **Soil Biology and Biochemistry**, v. 28, p. 1261-1263, 1996.

BAYER, C. **Dinâmica da matéria orgânica em sistemas de manejo de solos**. 1996, 240p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 1996.

BAYER, C.; DIEKOW, J. **Sequestro de C em solos sob plantio direto no Brasil: Taxas e aspectos metodológicos**. Foz do Iguaçu, PR: 2005. Notas.

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**, v.39, p. 677-683, 2004.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO, F. A. O. (Ed.) **Fundamentos da matéria orgânica do solo – ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. Ed. Porto Alegre: Metrópole, p. 7-18, 2008.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J.; MARTIN-NETO, L. Efeito de sistemas de preparo e de cultura na dinâmica da matéria orgânica e na mitigação das emissões de CO₂. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p. 599-607, 2000.

BAYER, C.; SPAGNOLLO, E.; WILDNER, L. P.; ERNANI, P. R.; ALBURQUEQUE, J. A. Incremento de carbono e nitrogênio num Latossolo pelo uso de plantas estivais para cobertura do solo. **Ciência Rural**, v.33, p.469-475, 2003.

BLANCO-CANQUI, H.; LAL, L. Soil structure and organic carbon relationships following 10 years of wheat straw management in no-till. **Soil & Tillage Research**, v. 95, p. 240-254, 2007.

BLANCO-CANQUI, H.; LAL, R. No-tillage and soil-profile carbon sequestration: Na on-farm assessment. **Soil science society of America Journal**, v. 72, p. 693-701, 2008.

CALEGARI, A.; HARGROVE, W. L.; RHEINHEIMER, D. S.; RALISCH, R.; TESSIER, D.; TOURDONNET, S.; GUIMARIES, 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**, v. 100, p. 1013-1019, 2008.

CALEGARI, A. **Sequestro de carbono, atributos físicos e químicos em diferentes sistemas de manejo em um Latossolo argiloso do sul do Brasil**. 2007. 191p. Tese (Doutorado em Agronomia) – Programa de Pós-Graduação em Agronomia. Universidade de Londrina. Londrina, 2006.

CALEGARI, A.; MONDARDO, A.; BULISANI, E. A.; WILDNER, L. P.; COSTA, M. B. C.; ALCÂNTARA, P. B.; MIYASAKA, S.; AMADO, T. J. C. **Adubação verde no Sul do Brasil**. Rio de Janeiro: AS-PTA, 346p, 1993.

CALEGARI, A.; PAVAN, M. A. Efeitos da rotação de milho com adubos verdes de inverno na agregação do solo. **Arquivos Biologia Tecnologia**, v. 38, p. 45-53, 1995.

CAMPOS, B. C.; AMADO, T. J. C.; BAYER, C.; NICOLOSO, R. S.; FIORIN, J. E. Carbon stock and its compartments in a Subtropical oxisol under long-term tillage and crop rotation systems. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 805-817, 2011.

CARVALHO, J. L. N.; CERRI, C. E. P.; FEIGL, B. J.; PICCOLO, M. C.; GODINHO, V. P.; CERRI, C. C. Carbon sequestration in agricultural soils in the Cerrado region of the Brazilian Amazon. **Soil & Tillage Research**, v. 103, p. 342-349. 2009.

CASALI, C. A. **Sistemas de culturas sob diferentes manejos por longa duração alteram as formas de fósforo do solo?** 2012. 149p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. Universidade Federal de Santa Maria. Santa Maria, 2012.

CASÃO JUNIOR, R.; ARAÚJO, A. G.; LLANILLO, R. F. **No-till agriculture in Southern Brazil**. Londrina, IAPAR/FAO, 2012. 77p.

CASTRO FILHO, C. **Effects of liming on characteristics of a Brazilian Oxisol at three levels of organic matter as related to erosion**. 1988. 261p. (Tese PhD in Soil Science) – Ohio State University, Columbus, Ohio, USA, 1988.

CERRI, C. C.; BERNOUX, M.; FEIGL, B. J.; PICCOLO, M. **Ciclo de Carbono na Amazônia e Mudanças Globais**. Anais do 2º Encontro Brasileiro Sobre Substâncias Húmicas. São Carlos, 1997.

CHERR, C. M.; SCHOLBERG, J. M. S.; MCSORLEY, R. Green manure approaches to crop production: a synthesis. **Agronomy Journal**, v. 98, p. 302-319, 2006.

CHRISTENSEN, B. T. Physical fractionation of soil and organic matter in primary particle size and density separates. **Advances in Soil Sciences**, v. 20, p. 1-90, 1992.

CONCEIÇÃO, P. C.; DIECKOW, J.; BAYER, C. Combined role of no-tillage and cropping systems in soil carbon stocks and stabilization, **Soil & Tillage Research**. v. 129, p. 40-47, 2013.

CONCEIÇÃO, P. C.; BOENI, M.; DIECKOW, J.; BAYER, C. MIELNICZUK, J. Fracionamento densimétrico com politungstato de sódio no estudo da proteção física da matéria orgânica em solos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p.541-549, 2008.

COSTA, A. C. S. **Iron oxide mineralogy of soils derived from volcanic rocks in the Paraná River Basin, Brazil**. 1996. 243p. Tese. (Soil Science PhD) – The Ohio State, 1996.

COSTA, F. S.; BAYER, C.; ALBUQUERQUE J. A.; FONTOURA, S. M. V. Aumento da matéria orgânica num Latossolo Bruno em plantio direto. **Ciência Rural**, v. 34, p. 587-589, 2004.

COSTA, F. S.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C. FONTOURA, S. M. V.; WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas de plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do solo**, v. 27, p. 527-535, 2003.

COSTA, F. S.; BAYER, C.; ZANATTA, J. A.; MIELNICZUK, J. Estoque de carbono orgânico no solo e emissões de dióxido de carbono influenciadas por sistemas de manejo no sul do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 323-332, 2008.

CRUZ, C. R.; PAULETTO, E. A.; FLORES, C. A.; E SILVA, J. B. Atributos físicos e carbono orgânico de um Argissolo Vermelho sob sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 1105-1112, 2003.

CUNHA, E. Q.; STONE, L. F; MOREIRA, J. A. A.; FERREIRA, E. P. B. DIDONET, A. D.; LEANDRO, W. M. Sistemas de preparo do solo e culturas de cobertura na produção orgânica de feijão e milho. I – Atributos físicos do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p.589-602, 2011.

DE BONA, F. D.; BAYER, C.; BERGAMASCHI, H.; DIECKOW, J. Carbono orgânico no solo em sistemas irrigados por aspersão sob plantio direto e preparo convencional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, p. 911-920, 2006.

DERPSCH, R. **Rotação de culturas, plantio direto e convencional**. São Paulo, Ciba Geigy, p.10, 1986.

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

DIEKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H.; BAYER, C.; DICK, D. P.; KÖGEL-KNABNER, I. Soil C and N stocks as affected by cropping systems and nitrogen fertilization in a Southern Brazil Acrisol managed under no-tillage for 17 years. **Soil Tillage & Research**, v. 81, p. 87-95, 2005a.

DONEDA, A.; AITA, C.; GIACOMINI, S. J.; MIOLA, E. C. C.; GIACOMINI, D. A.; SCHIRMANN, J.; GONZATTO, R. Fitomassa e decomposição de resíduos de plantas de cobertura puras e consorciadas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 1714-1723, 2012.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA – EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. Rio de Janeiro, 2006.

ESSINGTON, M. E. Soil and water chemistry : an integrative approach. CRC Press, Boca Raton, Florida, 534 p, 2003.

EUSTERHUES, K.; RUMPEL, C.; KÖGEL-KNABNER, I. Stabilization of soil organic matter isolated by oxidative degradation. **Organic Geochemistry**, Oxford, v. 36, p. 1567-1575, 2005.

FERNANDES, B.; GALLOWAY, H. M.; BRONSON, R. D.; MANNERING, J. V. Efeito de três sistemas de preparo do solo na densidade aparente, na porosidade total e na distribuição dos poros, em dois solos (Typic Argiaquoll e Typic Hapludalf). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.7, p. 329-333, 1983.

FERNANDES, F. A.; FERNANDES, A. H. B. M. **Cálculo dos estoques de carbono do solo sob diferentes condições de manejo**. Corumbá: Embrapa Pantanal, dez. 2008. (Embrapa Pantanal. Comunicado Técnico, 69). Disponível em: <http://www.cpap.embrapa.br/publicacoes/download.php?arq_pdf=COT69>. Acesso em: 27 fev. 2009.

FERREIRA, A. O.; MORAES SÁ, J. C.; HARMS, M. G.; MIARA, S.; BRIEDIS, C.; NETTO, C.Q.; SANTOS, J.B.; CANALLI, L.B. Carbon balance and crop residue management in dynamic equilibrium under a no-till system in campos gerais. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 1583-1590, 2012.

FONSECA, G. C.; CARNEIRO, M. A. C.; COSTA, A. R. DA; OLIVEIRA, G. C.; BALBINO, L. C. Atributos físicos, químicos e biológicos de um Latossolo Vermelho Distrófico de Cerrado sob duas rotações de cultura. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v. 37, p. 22-30, 2007.

FONTAINE, S.; BAROT, S.; BARRÉ, P.; DSIOUI, N.; MARY, B.; RUMPEL, C. Stability of carbon in depth soil layers controlled by fresh carbon supply. **Nature**, v. 450, p. 277-281, 2007.

FRANZLUEBBERS, A. J.; ARSHAD, M. A. Soil organic matter pools with conventional and zero tillage in a cold, semiarid climate. **Soil & Tillage Research**, v. 39, p. 1-11, 1996.

FRANZLUEBBERS, J. A.; HONS, F. M.; ZUBERER, D. A. Tillage and crop effects on seasonal dynamics of soil CO₂ evolution, water content, temperature, and bulk density. **Applied Soil Ecology**, v. 2, p. 95-109, 1995.

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

FRAZÃO, L. A.; PAUSTIAN, K.; CERRI, C. E. P.; CERRI, C. C. Soil carbon stocks under oil palm plantations in Bahia State, Brazil. **Biomass and bioenergy**, v. 62, p. 1-7, 2014.

FRAZÃO, L. A.; SANTANA, I. K. S.; CAMPOS, D. V. B.; FEIGL, B. J.; CERRI, C. C. Estoques de carbono e nitrogênio e fração leve da matéria orgânica em Neossolo Quartzarênico sob uso agrícola. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, p. 1198-1204, 2010.

FREIXO, A. A.; MACHADO, P. L. O. A.; SANTOS, H. P.; SILVA, C. A.; FADIGAS, F. S. Soil organic carbon and fractions of a Rhodic Ferrasol under the influence of tillage and crop rotation systems in southern Brazil. **Soil & Tillage Research**, v. 64, p. 221-230, 2002.

GIACOMINI, S. J. **Consortiação de plantas de cobertura no outono/inverno e fornecimento de nitrogênio ao milho em sistema plantio direto**. 2001. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 124 p. 2001.

GIACOMINI, S. J.; AITA, C.; VENDRUSCOLO, E. R. O.; CUBILLA, M.; NICOLOSO, R. S.; FRIES, M. R. Matéria seca, relação C/N e acúmulo de nitrogênio, fósforo e potássio em misturas de plantas de cobertura de solo. **Revista Brasileira Ciência Solo**, v. 27, p. 325-334, 2003.

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

GUARESCHI, R. F.; PEREIRA, M. G.; PERIN, A. Deposição de Resíduos Vegetais, Matéria Orgânica Leve, Estoques de Carbono e Nitrogênio e Fósforo remanescente sob diferentes sistemas de manejo no Cerrado Goiano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 909-920, 2012.

HARGROVE, W. L.; REID, J. T.; TOUCHTON, J. T.; GALLAHER, R. N. Influence of tillage practices on the fertility status of an acid soil double-cropped soybean production. **Agronomy Journal**, v. 74, p. 674-684, 1982.

HICKMANN, C.; COSTA, L. M. Estoque de carbono no solo e agregados em Argissolo sob diferentes manejos de longa duração. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.16, p.1055-1061, 2012.

HUBBARD, R. K.; STRICKLAND, T. C.; PHATAK, S. Effects of cover crop systems on soil physical properties and carbon/nitrogen relationships in the coastal plain of southeastern USA. **Soil & Tillage Research**, v. 126, p. 276-283, 2013.

HUSSAIN, I.; OLSON, K. R.; EBELHAR, S. A. Long-Term Tillage Effects on Soil Chemical Properties and Organic Matter Fractions. **Soil Science Society of America Journal**, v. 63 p. 1335-1341, 1999.

INÁCIO, E. S. B. **Distribuição vertical de carbono orgânico em Latossolo sob diferentes usos**. 2009. 102p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. Universidade Federal de Lavras. Lavras, 2009.

ISLAM, K. R.; WEIL, R. R. Land use effects on soil quality in a tropical forest ecosystem of Bangladesh. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v.79, p. 9-19, 2000.

ISMAIL, I.; BLEVINS, R. L.; FRYE, W. W. Long term no tillage effects on soil properties and continuous corn yields. **Soil Science Society of America Journal**, v. 58, p. 193-198, 1994.

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

JANTALIA, C. P.; SANTOS, H. P. dos; DENARDIN, J. E.; KOCHHANN, R.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Influência de rotações de culturas no estoque de carbono e nitrogênio do solo sob plantio direto e preparo convencional. **Agronomia**, v.37, p. 91-97, 2003.

JANZEN, H. H. The soil carbon dilemma: shall we hoard it or use it? **Soil Biology and Biochemistry**, Elmsford, v. 38, p. 419-424, 2006.

JOBBÁGY, E. G.; JACKSON, R. B. The vertical distribution of soil carbon and its relation to climate and vegetation. **Ecological Applications**, v. 10, p. 423-436, 2000.

KAHLE, P.; MÖLLER, J.; BAUM, C.; GURGEL, A. Tillage-induced changes in the distribution of soil organic matter and the soil aggregate stability under a former short rotation coppice. **Soil & Tillage Research**, v. 133, p. 49-53, 2013.

KALBITZ, K.; KAISER, K. Contribution of dissolved organic matter to carbon storage in forest mineral soils. **Journal Plant Nutrient Soil Science**. v. 171, p. 52-60, 2008.

KARLEN, D. L.; BERRY, E. C.; COLVIN, T. S. Twelve-year tillage and crop rotation effects on yields and soil chemical properties in Northeast Iowa. **Commun. Soil Science Plant Analysis**, v. 22, p.1985-2003, 1991.

KLEBER, M. E JOHNSON, M. G. Chapter 3 – Advances in Understanding the Molecular Structure of Soil Organic Matter: Implications for Interactions in the Environment. **Advances in Agronomy**, v. 106, p. 77-142, 2010.

KLEBER, M.; SOLLINS, P.; SUTTON, R. A conceptual model of organo-mineral interactions in soils: self-assembly of organic molecular fragments into zonal structures on mineral surfaces. **Biogeochemistry**, v. 85, p. 9–24, 2007.

KRISTENSEN, H. L.; DEBOSZ, K; McCARTY, G. W. Short-term effects of tillage on mineralization of nitrogen and carbon in soil. **Soil Biology & Biochemistry**, v. 35, p. 979-986, 2003.

KRAMBERGER, B.; GSELMANA, A.; JANZEKOVIC, M.; KALIGARIC, M.; BRACKOA, B. Effects of cover crops on soil mineral nitrogen and on the yield and nitrogen content of maize. **European Journal of Agronomy**, v. 31, p. 103-109, 2009.

KRULL, E. S.; BALDOCK, J. A.; SKJEMSTAD, J. O. Importance of mechanisms and processes of the stabilization of soil organic matter for Modeling carbon turnover. **Functional Plant Biology**, v. 30, p. 207-222, 2003.

LAL, R. Soil carbon dynamic in cropland and rangeland. **Environmental Pollution**, v. 116, p. 353-362, 2002.

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

LEITE, L. F. C.; GALVÃO, S. R. S.; HOLANDA NETO, M. R.; ARAÚJO, F. S.; IWATA, B. F. Atributos químicos e estoques de carbono em Latossolo sob plantio direto no Cerrado do Piauí. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.14, p.1273-1280, 2010.

LIU, E.; TECLEMARIAM, S. G.; YAN, C.; YU J.; GU, R.; LIU, S.; HE, W.; LIU, Q. Long-term effects of no-tillage management practice on soil organic carbon and its fractions in the northern China. **Geoderma**, v. 213, p. 379-384, 2014.

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

MACKAY, A. D.; KLADIVKO, E. J.; BARBER, S. A.; GRIFFITH, D. R. Phosphorus and potassium uptake by corn in conservation tillage systems. **Soil Science Society of America Journal**, v. 51, p. 970-974, 1987.

MAIA, S. M. F.; OGLE, S. M.; CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P. Changes in soil organic carbon storage under different agricultural management systems in the Southwest Amazon Region of Brazil. **Soil & Tillage Research**, v. 106, p. 177-184, 2010.

MANN, L.; TOLBERT, V.; CUSHMAN, J. Potential environmental effects of corn (*Zea mays* L.) stove removal with emphasis on soil organic matter and erosion. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 89, p. 149-166. 2002.

MAZZONCINI, M.; SAPKOTA, T. B.; BÀRBERI P.; ANTICHI, D.; RISALITI, R. Long-term effect of tillage, nitrogen fertilization and cover crops on soil organic carbon and total nitrogen content. **Soil & Tillage Research**, v.114, p. 165-174, 2011.

NASCENTE, A. S.; LI, Y. C. CRUSCIOL, C. A. C. Cover crops and no-till effects on physical fractions of soil organic matter. **Soil & Tillage Research**, 130, v. 52-57, 2013.

NASCIMENTO, P. C.; BAYER, C.; NETTO, L. F. S.; VIAN, A. C.; VIEIRO, F.; MACEDO, V. R. M.; MARCOLIN, E. Sistemas de manejo e a matéria orgânica de solo de várzea com cultivo de arroz. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1821-1827, 2009.

NELSON, D. W.; SOMMERS, L. E. Total carbon, organic carbon, and organic matter. In: BLACK, C. A., ed. Methods of soil analysis. Part 3. Chemical methods. Madison, **Soil Science of America and American Society of Agronomy**, p. 961-1010, 1996.

NICOLARDOT, B.; RECOUS, S.; MARY, B. Simulation of C and N mineralization during crop residue decomposition: a simple dynamic model based on the C/N ratio of the residues. **Plant and soil**, v. 228, p. 83-103, 2001.

NUNES, R. S.; LOPES, A. A. C; SOUSA, D. M. G.; MENDES, I. C. Sistemas de manejo e os estoques de carbono e nitrogênio em Latossolo de Cerrado com a sucessão soja-milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 35, p. 1407-1419, 2011.

OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; CURI, N.; RESCK, D. V. S. Compressibilidade de um Latossolo Vermelho argiloso de acordo com a tensão de água no solo, uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 773-781, 2003.

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

OSTROWSKA, A; POREBSKA, G. Assessment of the C/N ratio as an indicator of the decomposability of organic matter in forest soils. **Ecological Indicators**, v. 49, p. 104-109, 2015.

PAUL, B. K.; VANLAUWE, B.; AYUKE, F.; GASSNER, A.; HOOGMOED, M.; HURISSO, T. T.; KOALA, S.; LELEI, D.; NDABAMENYE, T.; SIX, J.; PULLEMAN, M. M. Medium-term impact of tillage and residue management on soil aggregate stability, soil carbon and crop productivity. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 164, p.14-22, 2013.

PEDRA, W. N.; PEDROTTI, A.; SILVA, T. O.; MACEDO, F. L.; GONZAGA, M. I. S. Estoques de carbono e nitrogênio sob diferentes condições de manejo de um Argissolo Vermelho Amarelo, cultivado com milho doce nos tabuleiros costeiros de Sergipe. **Semina: Ciências Agrárias**, v. 33, p. 2075-2090, 2012.

RANGEL, O. J. P.; SILVA, C. A.; GUIMARÃES, P. T. G.; MELO, L. C. A.; OLIVEIRA JUNIOR, A. C. Carbono orgânico e nitrogênio total do solo e suas relações com os espaçamentos de plantio de cafeeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, p. 2051-2059, 2008.

REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; REINERT, D. J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. **Tópicos Ciência do Solo**, v. 5, p. 49-134, 2007.

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. **Journal Soil Water Conservation**. v. 50, p. 253-261, 1995.

RHEINHEIMER, D. S.; KAMINSKI, J.; LUPATINI, G. C.; SANTOS, E. J. S. Modificações em atributos químicos de solo arenoso sob sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, p. 713-721, 1998.

ROCHA, F. A.; MARTINEZ, M. A.; MATOS, A. T.; CANTARUTTI, R. B.; SILVA, J. O. Modelo numérico do transporte de nitrogênio no solo. Parte II: Reações biológicas durante a lixiviação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental** v.12, p.54-61, 2008.

ROSA, M. E. C.; OLSZEWSKI, N.; MENDONÇA, E. S.; COSTA, L. M.; CORREIA, J. R. Formas de carbono em Latossolo Vermelho eutroférico sob plantio direto no sistema biogeográfico do Cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 911-923, 2003.

ROSCOE, R.; BUURMAN, P. Tillage effects on soil organic matter in density fractions of a Cerrado Oxisol. **Soil and Tillage Research**, v.70, p.107-119, 2003.

RUMPEL, C.; KÖGEL-KNABNER, I.; BRUHN, F. Vertical distribution, age, and chemical composition of organic carbon in two forest soils of different pedogenes. **Organic Geochemistry**, v. 33, p. 1131-1142, 2002.

SÁ, J. C. M. Manejo da fertilidade do solo no sistema plantio direto. In: SIQUEIRA, J. O.; MOREIRA, F. M. S.; LOPES, A. S.; GUILHERME, L. R. G.; FAQUIM, V.; FURTINI

NETO, A. E.; CARVALHO, J. G. Editores. **Interrelação fertilidade, biologia do solo e nutrição de plantas.** – Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Lavras. p. 267-319, 1999.

SÁ, J. C. M.; CERRI, C. C.; DICK, W. A.; LAL, R.; VENZKE FILHO, S. P.; PICCOLO, M. C.; FEIGL, B. J. Organic matter dynamics and carbon sequestration rates for a tillage chronosequence in a Brazilian oxisol. **Soil Science Society of American Journal**, v.65, p.1486-1499, 2001.

SÁ, J. C. M.; TIVET, F.; LAL, R.; BRIEDIS, C.; HARTMAN, D. C.; SANTOS, J. Z.; SANTOS, J. B. Long-term tillage systems impacts on soil C dynamics, soil resilience and agronomic productivity of a Brazilian Oxisol. **Soil & Tillage Research**, v. 136, p. 38–50, 2014.

SCHÖNING, I.; TOTSCHKE, K. U.; KÖGEL-KNABNER, I. Small scale spatial variability of organic carbon stocks in litter and solum of a forested Luvisol. **Geoderma**, v. 136, p. 631-642, 2006.

SILVA, A. A.; ARGENTA, G.; SANGOI, L.; STRIEDER, M. L.; SILVA, A. A. Estratégias de manejo de coberturas de solo no inverno para cultivo do milho em sucessão no sistema semeadura direta. **Ciência Rural**, v. 36, p.1011-1020, 2006.

SILVA, C. A.; MACHADO, P. L. O. A. Sequestro e Emissão de Carbono em Ecossistemas Agrícolas: Estratégias para o Aumento dos Estoques de Matéria Orgânica em Solos Tropicais. EMBRAPA. **Documento n. 19**, 2000.

SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. S. Matéria Orgânica do Solo. Coord. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. Editores. **Fertilidade do Solo** – Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa-MG, p. 275 – 375, 2007.

SILVA, J. E.; RESCK, D. V. S.; CORAZZA, E. J.; VIVALDI, L. Carbon storage in clay Oxisol cultivated pastures in the “Cerrado” region, Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 103, p. 357-363, 2004.

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

SISTI, C. P. J.; SANTOS, H. P.; KOHHANN, R.; ALVES, B. J. R.; URQUIAGA, S.; BODDEY, R. M. Change in carbon and nitrogen stocks in soil under 13 years of

conventional or zero tillage in southern Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 76, p. 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 and soil**, v. 241, p. 155-176, 2002.

SLEUTEL, S.; NEVES, S.; HOFMAN, G. Estimates of carbon stock changes in Belgian cropland. **Soil Use and Management**, v. 19, p. 166-171, 2003.

SPOSITO, G. The chemistry of soils. New York: Oxford University Press, 234p, 1989.

SOMBRERO, A.; BENITO, A. Carbon accumulation in soil. Ten-year study of conservation tillage and crop rotation in a semi-arid area of Castile-Leon, Spain. **Soil & Tillage Research**, v. 107, p. 64-70, 2010.

SOUZA, W. J. O. ; MELO, W. J. Matéria orgânica em um latossolo submetido a diferentes sistemas de produção de milho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, p. 1113-1122, 2003.

SHARMA, V.; HUSSAIN, S.; SHARMA, K. R.; ARYA, V. M. Labile carbon pools and soil organic carbon stocks in the foothill Himalayas under different land use systems. **Geoderma**, v. 232-234, p. 81-87, 2014.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. Efeitos do sistema de preparo e da rotação de culturas na porosidade e densidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 395-401, 2001.

TIECHER, T.; RHEINHEIMER, D. S.; CALEGARI, A. Soil organic phosphorus forms under different soil management systems and winter crops, in a long term experiment. **Soil & Tillage Research**, v. 124, p. 57-67, 2012.

TIVET, F.; SÁ, J. C. M.; LAL, R.; BORSZOWSKI, P. R.; BRIEDIS, C.; SANTOS, J. B.; SÁ, M. F. M.; HARTMAN, D. C.; EURICH, G.; FARIAS, A.; BOUZINAC, S.; SÉGUY, L.; Soil organic carbon fraction losses upon continuous plow-based tillage and its restoration by diverse biomass-C inputs under no-till in sub-tropical and tropical regions of Brazil. **Geoderma**, v. 209-210, p. 214-225, 2013.

THOMSEN, I. K.; OLESEN, J. E.; SCHJØNNING, P.; JENSEN, B.; CHRISTENSEN, B. T. Net mineralization of soil N and ¹⁵N-ryegrass residue in differently textured soils of similar mineralogical composition. **Soil Biology & Biochemistry**, v.33, p.277-285, 2000.

TRINSOUTROT, I.; RECOUS, S.; BENTZ, B.; LINÈRES, M.; CHÈNEBY, D.; ICOLARDOT, B. Biochemical quality of crop residues and carbon and nitrogen mineralization kinetic under nonlimiting nitrogen conditions. **Soil Science Society of American Journal**, v.64, p.918-926, 2000.

USSIRI, D. A. N.; LAL, R. Long-term tillage effects on soil carbon storage and carbon dioxide emissions in continuous corn cropping system from an alfisol in Ohio. **Soil & Tillage Research**, v. 104, p. 39-47, 2009.

VELDKAMP, E. Organic Carbon Turnover in Three Tropical Soils under Pasture after Deforestation. **Soil Science Society of America Journal**, v.58, p.175-180, 1994.

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

WILDNER, L. P. **Adubação verde, cobertura e recuperação do solo em sistemas diversificados de produção**. CPPP / EMPASC, Chapecó. 1990 (relatório final de projeto – PNP Manejo e Conservação do solo) – EMBRAPA.

ZAMUNER, E. C.; PICONE, L. I.; ECHEVERRIA, H. E. Organic and inorganic phosphorus in Mollisol soil under different tillage practices, **Soil and Tillage Research**, v. 99, p. 131–138, 2008.

ZANATTA, J. A.; BAYER, C.; DIECKOW, J.; VIEIRA, F. C. B.; MIELNICZUK, J. Soil organic carbon accumulation and carbon costs related to tillage, cropping systems and nitrogen fertilization in a subtropical Acrisol. **Soil & Tillage Research**, v. 94, p. 510-519, 2007.

ZINN, Y. L.; LAL, R.; RESCK, D. V. S. Changes in soil organic carbon stocks under agriculture in Brazil. **Soil & Tillage Research**, v.84, p.28-40, 2005.

ZINN, Y. L.; RESCK, D. V. S.; SILVA, J. E. Soil organic carbon as affected by afforestation with Eucalyptus and Pinus in the Cerrado region of Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 166, p. 285-294, 2002.