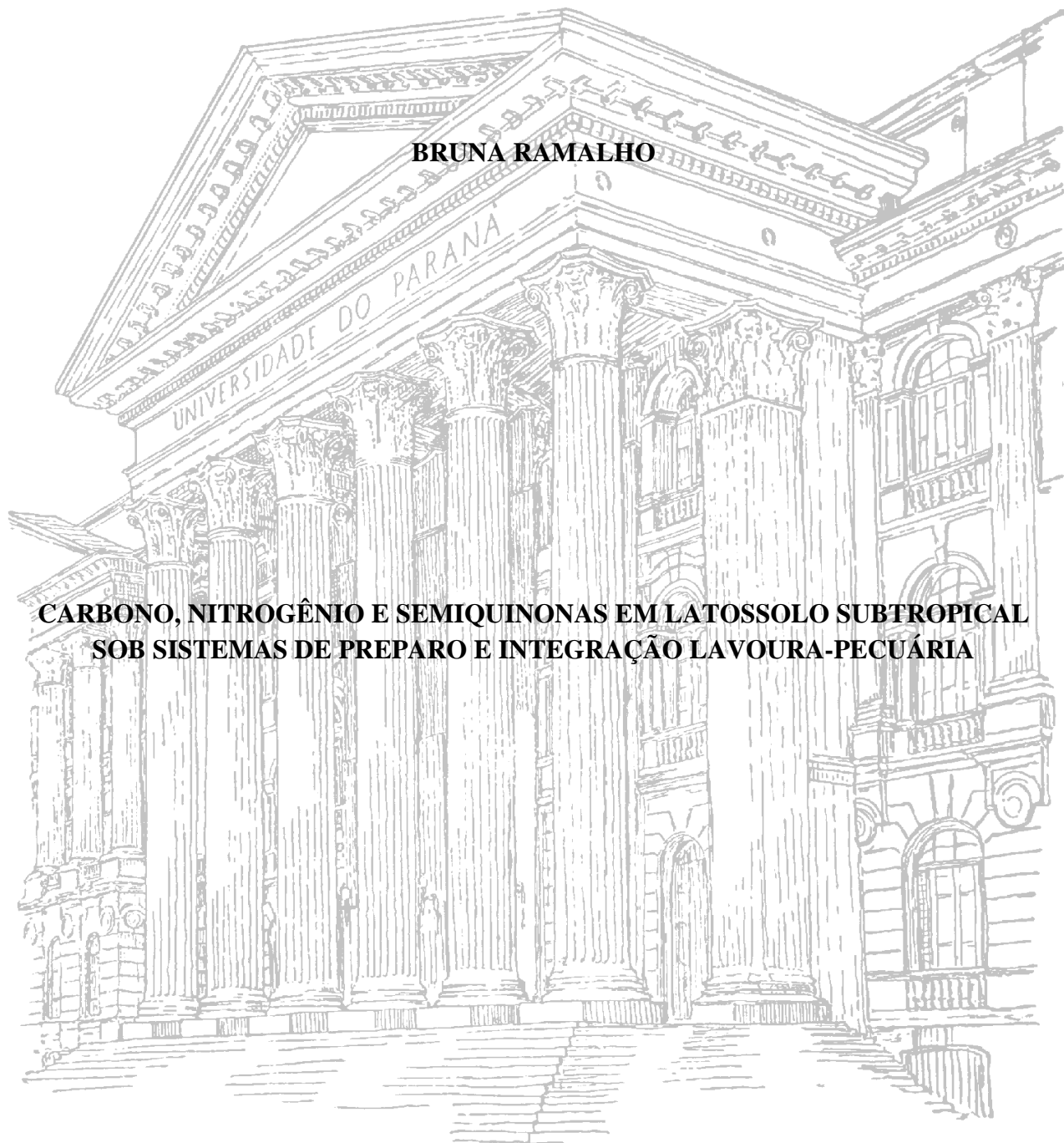


UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

BRUNA RAMALHO

**CARBONO, NITROGÊNIO E SEMIQUINONAS EM LATOSSOLO SUBTROPICAL
SOB SISTEMAS DE PREPARO E INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA**



CURITIBA

2016

UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIA DO SOLO

BRUNA RAMALHO

**CARBONO, NITROGÊNIO E SEMIQUINONAS EM LATOSSOLO SUBTROPICAL
SOB SISTEMAS DE PREPARO E INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Área de Concentração Solo e Ambiente, do Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Ciência do Solo.

Orientador: Prof. Dr. Jeferson Dieckow

Coorientadora: Dra. Josiléia Acordi Zanatta

Coorientador: Prof. Dr. Cimélio Bayer

CURITIBA

2016

R165 Ramalho, Bruna

Carbono, nitrogênio e semiquinonas em latossolo subtropical sob sistemas de preparo e integração lavoura-pecuária. Bruna Ramalho. – Curitiba : 2016.
xiv, 42 f. il.

Orientador: Jeferson Dieckow.

Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo.

1. Solos – Teor de carbono. 2. Solos – Teor de nitrogênio.
3. Plantio direto. I. Dieckow, Jeferson. II. Universidade Federal do Paraná. Setor de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo. III. Título.

CDU 631.417.4



PARECER

A Banca Examinadora designada para avaliar a defesa da Dissertação de Mestrado de BRUNA RAMALHO, intitulada: “**Carbono, nitrogênio e semiquinonas em Latossolo subtropical sob sistemas de preparo e integração lavoura-pecuária**”, do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo do Setor de Ciências Agrárias da Universidade Federal do Paraná, após análise do texto e arguição do candidato, emitem parecer pela “**APROVAÇÃO**” da referida Dissertação. A candidata atende assim um dos requisitos para a obtenção do título de **Mestre em Ciência do Solo - Área de Concentração Solo e Ambiente**.

Secretaria do Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, em Curitiba, 17 de fevereiro de 2016.

Prof. Dr. Jeferson Dieckow, Presidente

Dr. Gabriel Barth, Iº. Examinador

Drª Josiléia Acordi Zanatta, IIº. Examinador

Prof. Dr. Volnei Pauletti, IIIº. Examinador

“O saber se aprende com os mestres.

A sabedoria, só com o corriqueiro da vida.”

Cora Coralina

*“Decidi não esperar as oportunidades e sim, buscá-las.
Decidi ver cada dia como uma nova oportunidade de ser feliz.”*

Walt Disney

*Aos meus pais, Nilton Ramalho e Ester de Fátima R. Ramalho, e ao meu Eduardo
Strelow, pelo apoio, carinho e incentivo em todos os momentos.*

DEDICO

AGRADECIMENTOS

À Deus, por sua proteção e todas as bênçãos alcançadas até aqui;

À Universidade Federal do Paraná, minha universidade de coração, ao Programa de Pós Graduação em Ciência do solo pela oportunidade de concluir mais essa etapa profissional, e ao CNPq pela concessão da bolsa de estudos;

Ao professor Jeferson, pela orientação, sempre muito paciente e dedicado. Além de um orientador, um amigo. Seus ensinamentos ficarão para sempre guardados;

Aos meus coorientadores, Dra. Josiléia A. Zanatta, pelo apoio na realização desse trabalho, e ao Prof. Dr. Cimélio Bayer;

Ao professor Antônio Mangrich e a Estela Cardoso, pelo grande auxílio nas análises de EPR;

Aos professores Volnei Pauletti, Nerilde Favaretto, Fabiane Vezzani, Elen Alvarenga Silva, Karina Cavallieri e Marcelo de Lima, pelos conhecimentos transmitidos e exemplo de profissionalismo;

À Denise, secretária do programa de pós-graduação e uma grande amiga. Obrigada por sua prontidão em nos ajudar, seus conselhos e palavras de conforto quando mais precisamos;

À Fundação ABC, em especial ao pesquisador Dr. Gabriel Barth pela abertura das portas e concessão da área experimental;

À todos os funcionários do Departamento de Solos e Engenharia Agrícola da UFPR, em especial a Josi, a Maria e ao Hilbert, por toda ajuda na condução do experimento;

Aos meus “irmãos” de coração, Priscila, Reinaldo, Julia, Mariana e Caroline pelas conversas e risadas, por toda ajuda no trabalho e pelo companheirismo. Vocês são especiais!

Aos estagiários Bruno, Michael, Felipe e Mônica pelo auxílio no laboratório e no campo, vocês foram muito importantes para realização deste trabalho;

À todos os meus amigos, vocês tornam essa caminhada mais alegre. Em especial, as minhas eternas “véias” Devânia e Andressa, por serem minha família aqui em Curitiba;

Aos meus pais, Ester e Nilton, pelo carinho e apoio, por cada abraço ao reencontrá-los depois de uma semana longe. Meu irmão Lucas, por seu carinho, a minha adorada Vó Iria, por ser meu exemplo de vida, amor e proteção, e a toda minha família;

Ao meu Edu, meu parceiro e grande amor. Obrigada por sua confiança, seu apoio todo esse tempo longe de você. Eu consegui chegar até aqui, porque você esteve sempre ao meu lado. Eu lhe amarei sempre!

À todos vocês: meu muito obrigada!

LISTA DE FIGURAS

- Figura 1. Esquema do fracionamento físico granulométrico das amostras.9
- Figura 2. Densidade de um Latossolo Bruno sob lavoura em preparo convencional (LAV-PC), lavoura em plantio direto (LAV-PD), integração lavoura-pecuária em preparo convencional (ILP-PC) e integração lavoura-pecuária em plantio direto (ILP-PD). * ($p < 0.10$), *ns* não significativo (teste de Tukey). Castro-PR. 12
- Figura 3. Proporção do estoque total do solo para carbono (a) e nitrogênio (b) nas frações argila, silte e areia+MOP da camada de 0-5 cm de Latossolo Bruno sob lavoura em preparo convencional (LAV-PC), lavoura em plantio direto (LAV-PD), integração lavoura-pecuária em preparo convencional (ILP-PC) e integração lavoura-pecuária em plantio direto (ILP-PD). Castro-PR. 18
- Figura 4. Espectro de EPR do solo inteiro da camada de 0-5 cm de uma Latossolo Bruno sob lavoura em preparo convencional (LAV-PC), lavoura em plantio direto (LAV-PD), integração lavoura-pecuária em preparo convencional (ILP-PC) e integração lavoura-pecuária em plantio direto (ILP-PD) após tratamento com HF 10 %. Castro-PR. 22

LISTA DE TABELAS

- Tabela 1. Concentrações de carbono e nitrogênio de Latossolo Bruno sob lavoura (LAV) ou integração lavoura-pecuária (ILP) combinados com preparo convencional (PC) ou plantio direto (PD). Castro-PR. 13
- Tabela 2. Estoques de carbono e nitrogênio em 0-20 cm e 0-100 cm de Latossolo Bruno sob lavoura (LAV) ou integração lavoura-pecuária (ILP) combinados com preparo convencional (PC) ou plantio direto (PD). Castro-PR. 14
- Tabela 3. Taxa de sequestro de carbono e acúmulo de nitrogênio em 0-20 cm e 0-100 cm de Latossolo Bruno sob lavoura (LAV) ou integração lavoura-pecuária (ILP) combinados com preparo convencional (PC) ou plantio direto (PD). Castro-PR. 15
- Tabela 4. Proporção de massa recuperada, concentração de C e N, e relação C:N de frações físicas granulométricas da camada de 0-5 cm de Latossolo Bruno sob lavoura (LAV) ou integração lavoura-pecuária (ILP), combinados com preparo convencional (PC) ou plantio direto (PD). Castro-PR. 16
- Tabela 5. Estoques de carbono e nitrogênio no solo inteiro e nas frações areia+MOP, silte e argila, carbono lábil, índice de estoque de carbono (IEC), labilidade do carbono (LC), índice de labilidade do carbono (ILC) e índice de manejo do carbono (IMC) da camada de 0-5 cm de Latossolo Bruno sob lavoura (LAV) ou integração lavoura-pecuária (ILP), combinados com preparo convencional (PC) ou plantio direto (PD). Castro-PR. 17
- Tabela 6. Recuperação de carbono, nitrogênio e massa de amostra, e relação C:N após o tratamento com ácido fluorídrico a 10 % no solo inteiro e nas frações físicas areia+MOP, silte e argila da camada de 0-5 cm de Latossolo Bruno sob lavoura (LAV) ou integração lavoura-pecuária (ILP) combinados com preparo convencional (PC) ou plantio direto (PD). Castro-PR. 20
- Tabela 7. Largura da linha (ΔH) e concentração de radicais livres semiquinonas (spin g-1 C) do solo inteiro e das frações areia + MOP, silte e argila da camada de 0-5 cm de Latossolo

Bruno sob lavoura (LAV) ou integração lavoura-pecuária (ILP) combinados com preparo convencional (PC) ou plantio direto (PD). Castro-PR.	21
---	----

LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

C	Carbono
CC	Continuous crop
CMI	Crop-livestock integration
CT	Conventional tillage
EPR	Ressonância paramagnética eletrônica
IMC	Índice de manejo de carbono
ILP	Integração lavoura-pecuária
GEE	Gases de efeito estufa
LAV	Lavoura
MOM	Matéria orgânica associada aos minerais
MOP	Matéria orgânica particulada
MOS	Matéria orgânica do solo
N	Nitrogênio
NT	No-till
PC	Preparo convencional
PD	Plantio direto
POM	Particulate organic matter
PR	Preparo reduzido
RLS	Radicais livres semiquinonas
SOM	Soil organic matter
TFSA	Terra fina seca ao ar

LISTA DE SÍMBOLOS

ΔH	- altura da linha
Mg	- micrograma
G	- gauss
g kg ⁻¹	- gramas por quilograma
kg ha ⁻¹	- quilograma por hectare
kg dm ⁻³	- quilograma por decímetro cúbico
Mg ha ⁻¹	- megagrama por hectare
Mg ha ⁻¹ ano ⁻¹	- megagrama por hectare por ano
spins cm ⁻¹	- spins por centímetro
spins g ⁻¹	- spins por grama

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1 HIPÓTESES	4
1.2 OBJETIVOS	4
2. MATERIAL E MÉTODOS.....	5
2.1 ÁREA EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS.....	5
2.2 CARBONO E NITROGÊNIO DO SOLO.....	6
2.3 FRACIONAMENTO FÍSICO GRANULOMÉTRICO.....	7
2.4 ÍNDICE DE MANEJO DE CARBONO – IMC.....	8
2.5 RESSONÂNCIA PARAMAGNÉTICA ELETRÔNICA – EPR	10
2.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS.....	11
3. RESULTADOS	12
3.1 DENSIDADE DO SOLO, CONCENTRAÇÕES E ESTOQUES TOTAIS DE C E N .	12
3.2 CARBONO E NITROGÊNIO EM FRAÇÕES FÍSICAS E IMC.....	15
3.3 RADICAIS LIVRES SEMIQUINONAS	19
4. DISCUSSÕES	23
4.1 CARBONO E NITROGÊNIO TOTAIS DO SOLO	23
4.2 FRAÇÕES FÍSICAS E CARACTERIZAÇÃO DA MOS	26
5. CONCLUSÕES	30
6. LITERATURA CITADA.....	31
7. APÊNDICES	40

CARBONO, NITROGÊNIO E SEMIQUINONAS EM LATOSSOLO SUBTROPICAL SOB SISTEMAS DE PREPARO E INTEGRAÇÃO LAVOURA-PECUÁRIA¹

Autora: Bruna Ramalho

Orientador: Prof. Dr. Jeferson Dieckow

Coorientadora: Dra. Josiléia Acordi Zanatta

Coorientador: Prof. Dr. Cimélio Bayer

RESUMO

A integração lavoura-pecuária (ILP) vem ganhando importância como sistema de produção no Brasil e no mundo, mas informações sobre seus efeitos quantitativos e qualitativos ao carbono (C) e nitrogênio (N) do solo ainda são relativamente incipientes. Com o objetivo de avaliar o potencial de acúmulo de C e N pela ILP e o plantio direto (PD), e alterações que esses sistemas podem causar à qualidade da matéria orgânica do solo (MOS), conduziu-se esse trabalho em experimento de nove anos em um Latossolo Bruno subtropical (Castro-PR). Os tratamentos foram ILP com azevém (*Lolium multiflorum*) pastejado por gado de leite no inverno e com milho (*Zea mays*) para silagem no verão, em preparo convencional com uma aração e duas gradagens no inverno (ILP-PC) ou em plantio direto (ILP-PD); e sistema de lavoura contínua, onde azevém era somente para cobertura do solo, em preparo convencional (LAV-PC) ou em plantio direto (LAV-PD). Na camada de 0-20 cm, o PD aumentou os estoques de C tanto na lavoura quanto na ILP, a taxas de 0,26 e 0,52 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente; com mesma tendência para o N. Até 1 m de profundidade, o aumento do estoque de C de 199,3 Mg ha⁻¹ para 212,9 Mg ha⁻¹ com o PD foi significativo no sistema de lavoura, a uma taxa de 1,51 Mg C ha⁻¹ ano⁻¹, mas não houve aumento de estoque na ILP. Em relação à lavoura, a ILP não alterou os estoques de C nem de N em 0-20 cm, tanto no PC como no PD. Até 1 m de profundidade, o mesmo resultado ocorreu em PD, mas em PC os estoques de C e N foram maiores na ILP a taxas de sequestro de C de 1,14 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ e acúmulo de N de 0,08 Mg ha⁻¹ ano⁻¹. Os estoques de C e N em todas as frações físicas aumentaram significativamente no PD, comparado ao PC; mas não foram afetadas pelo ILP. A maior relação C:N nas frações areia + matéria orgânica particulada (MOP), silte e argila obtidas por fracionamento físico granulométrico, e a maior concentração de radicais livres semiquinonas (RLS) determinadas por ressonância paramagnética eletrônica (EPR®) ocorreram no PC, indicando maior grau de aromaticidade da MOS. Entre as frações físicas, silte apresentou maior relação C:N e concentração de RLS. Os resultados sugerem que o PD proporciona acúmulo de C e N no solo em relação ao PC, além de alterar quimicamente a matéria orgânica por reduzir a concentração de semiquinonas; mas por outro lado, a ILP em PD não evidenciou incremento de C e N em relação ao sistema de lavoura contínua, nem alterações qualitativas da matéria orgânica.

Palavras-chave: plantio direto, fracionamento físico granulométrico, ressonância paramagnética eletrônica.

¹ Dissertação de Mestrado em Ciência do Solo. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. (56 p.) Fevereiro, 2016.

CARBON, NITROGEN AND SEMIQUINONE IN SUBTROPICAL OXISOL UNDER TILLAGE SYSTEMS AND INTEGRATED CROP-LIVESTOCK²

Authoress: Bruna Ramalho

Advisor: Prof. Dr. Jeferson Dieckow

Co advisor: Dra. Josiléia Acordi Zanatta

Co advisor: Prof. Dr. Cimélio Bayer

ABSTRACT

The integrated crop-livestock (ICL) has become an important production system in Brazil and in the world, but information of its quantitative and qualitative effects on soil carbon (C) and nitrogen (N) are still scarce. Aiming at evaluating the potential of C and N accumulation by ICL and no-till (NT), and changes on soil organic matter (SOM) quality, we conducted a study in a nine-year experiment in a subtropical Oxisol (Castro-PR, Brazil). Treatments were ICL with ryegrass (*Lolium multiflorum*) grazed by dairy cattle in winter and maize (*Zea mays*) silage in the summer, in conventional tillage with plowing and disking in winter (ICL-CT) or no-till (ICL-NT); and continuous crop system where ryegrass served only as cover crop in conventional tillage (CC-CT) or no-till (CC-NT). At 0-20 cm, NT increased C stocks both in CC and in ICL, at rates of 0.26 and 0.52 Mg ha⁻¹ yr⁻¹, respectively; with the same trend for the N. Up to 1 m depth, increasing the C stock from 199.3 Mg ha⁻¹ to 212.9 Mg ha⁻¹ with NT was significant in CC system, at a rate 1.51 Mg C ha⁻¹ yr⁻¹; but no increase was observed with ICL. Compared to CC, ICL did not affect the C or N stocks in 0-20 cm, either in CT or NT. Up to 1 m depth, the same result occurred in NT, but in CT stocks of C and N were higher in the ICL, with C sequestration rates of 1.14 Mg ha⁻¹ yr⁻¹ and N accumulation 0.08 Mg ha⁻¹ yr⁻¹. C and N stocks in all physical fractions increased significantly in NT compared to the CT; but they were not affected by ICL. The highest C:N ratio in sand + particulate organic matter (POM), silt and clay fractions and the highest concentration of semiquinone free radicals (SFR) determined by electron paramagnetic resonance (EPR) occurred in CT, indicating a greater degree of aromaticity of SOM in this system. Among physical fractions, silt showed higher C:N ratio and concentration of SFR. Results suggest that NT provides accumulation of C and N in the soil in relation to the CT, in addition to chemically alteration of organic matter by reducing semiquinone concentration. On the other hand, ICL in NT showed no increase of C and N in relation to the continuous crop system or qualitative changes of organic matter.

Key-Words: no-till, grain size physical fractionation, electron paramagnetic resonance.

² Soil Science Master Dissertation. Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Setor de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Paraná. Curitiba. (56 p.) February, 2016.

1. INTRODUÇÃO

A busca por melhor entendimento do efeito de sistemas de manejo do solo na dinâmica e qualidade da matéria orgânica é um processo em contínua ascensão na Ciência do Solo. Os estoques de carbono (C) e nitrogênio (N) do solo são dependentes de um equilíbrio entre suas adições e perdas (Bayer et al., 2006a). Como a finalidade dos sistemas de manejo é manter ou aumentar esses estoques (Dieckow et al., 2005a) deve-se priorizar aqueles que promovam maiores adições e fixações de C e N no solo, favorecendo todos os componentes do ciclo terrestre.

Sistemas conservacionistas melhoram as condições edáficas para a maior permanência da matéria orgânica, minimização de perdas, e conseqüentemente incrementando C e N no solo (Bayer et al., 2006a; Six et al., 2002). A proteção física dos agregados proporcionada pelo plantio direto (PD) é considerada um dos principais mecanismos de estabilização da matéria orgânica do solo (MOS) em regiões subtropicais (Bayer et al., 2000; Dieckow et al., 2005a; Conceição et al., 2008). A proteção do C em solos de estrutura solta, como os Latossolos (Oades & Waters, 1991), é facilitada em condições de mínima mobilização do solo. Com o PD há um aumento da estabilidade de agregados e menor exposição da matéria orgânica aos processos oxidativos (Bayer et al., 2006a); enquanto o revolvimento do solo, característico do preparo convencional (PC), favorece a mineralização pela maior exposição da MOS à ação dos microrganismos decompositores (Ceretta, 1995). Ademais, o PD associado a outros manejos conservacionistas, como a integração lavoura-pecuária (ILP), pode tornar o solo um reservatório de C atmosférico, contribuindo na mitigação dos impactos dos gases de efeito estufa (GEE) sobre o clima (Tornquist et al., 2009).

O uso de sistemas integrados de produção é também uma alternativa para aumentar as adições de C e N. Conhecendo a importância das forrageiras em aportar C e N via raízes (Lal, 2002), a ILP possivelmente favorece o estoque desses elementos no solo (Piva, 2012). A ILP no subtropico brasileiro tem como característica básica a alternância, na mesma área, do cultivo de grãos no verão e a pastagem no inverno, principalmente com gramíneas para pastejo animal (Nicoloso et al., 2008). Nessas condições, para que as perdas não excedam as adições há necessidade de uso de rotações e frequência de pastejo apropriadas, isto é, uma lotação adequada de animais por área, e com a retirada do rebanho quando a pastagem chegar aos 20 cm de altura para se evitar o superpastejo. A ação das raízes na união das partículas e na exsudação de substâncias que atuam como agentes cimentantes fazem com que solos sob

pastagens possuam alta estabilidade de agregados (Salton, 2005). Loss et al. (2011) afirmam que, pela existência de palhada superficial juntamente com as raízes da forrageira, os principais benefícios do sistema ILP são a melhoria das propriedades edáficas, aumento nos teores de C e N e melhoria das condições de aeração e infiltração de água.

A ILP promove melhorias no solo, além de promover efeitos positivos sobre as condições ambientais e econômicas (Balbinot-Junior et al., 2009; Asmann et al., 2014). Assim, a junção de sistemas integrados de produção sob preparo conservacionista se torna uma alternativa promissora para acumular C e N no solo (Dieckow et al., 2005a; Asmann et al., 2014). As raízes abundantes das forrageiras promoverão a formação e estabilização dos agregados, que pela imobilização do solo estarão protegidos em macroagregados estáveis.

O C e o N necessitam em função da sua dinâmica, um longo período de tempo para que se tenham alterações em seu conteúdo e suas características químicas (Silva et al., 2011). Diante do exposto, Dieckow et al. (2005b) ressaltam que para avaliar alterações qualitativas e quantitativas da MOS se faz necessário o uso de métodos como o de fracionamento físico e análises de seus conteúdos de C e N, possibilitando assim, uma melhor compreensão do estado de conservação dos sistemas.

Christensen (1996) inferiu que a MOS pode ser fracionada segundo sua localização em matéria orgânica particulada (MOP), matéria orgânica associada aos minerais (MOM), matéria orgânica dissolvida e matéria orgânica inerte; ou ainda com base no seu grau de estabilidade, em lábil ou estável. A fração MOP é considerada a mais lábil, possui menor tempo de residência no solo e atua como fonte de nutrientes e energia. A MOM, devido suas fortes interações organo-minerais por corresponder às frações silte e argila, possui longo período de permanência no solo, e pode corresponder até 2/3 do carbono orgânico total (Nicoloso, 2005; Salton et al., 2005). Da mesma maneira como para os estoques totais, os acúmulos de C e N nas frações lábeis da MOS ocorrem devido à proteção física em macro e microagregados que impossibilitam o acesso de microrganismos (Bayer et al., 2004), sendo a fração MOP a mais sensível às práticas de manejo (Bayer et al., 2004; Conceição et al., 2005; Campos et al., 2011). Dependendo do sistema de preparo adotado, o C pode acumular em frações mais lábeis ou recalcitrantes da matéria orgânica, e isto pode influenciar diretamente as propriedades químicas, físicas e biológicas do solo (Bayer et al., 2004). O fracionamento físico permite a quantificação do estoque de C e N nas frações da MOS (Salton, 2005), possibilitando um melhor entendimento da dinâmica da matéria orgânica no sistema, e

segundo Souza et al. (2008), a adoção de práticas de manejo que promovam qualidade ambiental.

Informações de frações da matéria orgânica permitem calcular o índice de manejo de carbono (IMC), proposto por Blair et al. (1995). Este índice considera um componente quantitativo, o estoque de C ou N, e outro qualitativo, a labilidade da MOS. O IMC foi proposto com base em frações químicas do solo, mas pode ser determinado com frações físicas também; e tem se mostrado eficiente em indicar a qualidade do sistema de manejo em promover ou não qualidade ao solo (Dieckow et al., 2005b; Vieira et al., 2007; Bayer et al., 2009; Campos et al., 2011; Conceição et al., 2014).

Conhecimento sobre o efeito do manejo do solo na MOS pode ser ampliado com a combinação do fracionamento físico às técnicas espectroscópicas, como a ressonância paramagnética eletrônica – EPR (Bayer, 1996). Segundo Martin-Neto et al. (1994) e Santos et al. (2011), a técnica EPR avalia a concentração de radicais livres semiquinonas (RLS) na amostra (spin g^{-1}), indicando o grau de aromaticidade e, por conseguinte, de humificação da MOS. Além disso, fornece parâmetros espectroscópicos como a largura da linha (ΔH) e fator g (fator giromagnético) do sinal de RLS (Martin-Neto et al., 1994; Cardoso, 2013). Esses parâmetros auxiliam a caracterização da MOS quanto ao seu grau de humificação, ou seja, presença de estruturas orgânicas condensadas estáveis no solo.

Informações sobre alterações qualitativas e quantitativas que o plantio direto promove à MOS são relativamente abundantes, mas informações sobre alterações que a integração lavoura-pecuária pode promover em condições subtropicais ainda são escassas. A importância da integração lavoura-pecuária associada ao plantio direto e seu potencial de expansão na economia agropecuária brasileira, justificam a realização de estudos como o presente que buscam contribuir para fechar lacunas de conhecimento em torno de alterações, benéficas ou não, que este sistema de produção eventualmente causa na MOS.

1.1 HIPÓTESES

- A integração lavoura-pecuária incrementa o estoque de carbono e nitrogênio no solo em relação à lavoura contínua devido ao pastejo, que aumenta a adição de fitomassa;
- Solo manejado sob plantio direto acumula mais carbono e nitrogênio em relação ao manejado sob preparo convencional, devido à proteção física da matéria orgânica em plantio direto;
- Solo sob integração lavoura-pecuária tem maior proporção de materiais lábeis quando comparado ao solo sob lavoura contínua, em razão da ação das pastagens no aporte de material vegetal;
- Solo manejado sob plantio direto possui maior proporção de materiais lábeis nas frações da matéria orgânica quando comparado ao preparo convencional, devido a maior manutenção de resíduos sobre o solo e a proteção física no interior dos agregados.

1.2 OBJETIVOS

- Avaliar o potencial da integração lavoura-pecuária em estocar carbono e nitrogênio no solo, comparado ao sistema lavoura contínua;
- Avaliar o potencial do plantio direto em estocar carbono e nitrogênio no solo, comparado a sistema de preparo convencional;
- Avaliar as alterações qualitativas na matéria orgânica do solo causadas pela integração lavoura-pecuária, em relação à lavoura contínua;
- Avaliar as alterações qualitativas na matéria orgânica do solo causadas pelo plantio direto, em relação ao preparo convencional.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 ÁREA EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS

O estudo foi conduzido num experimento de campo na Estação Experimental da Fundação ABC para Pesquisa e Divulgação Técnica Agropecuária, no município de Castro – PR, cujas coordenadas geográficas são 24° 47' 53'' S e 49° 57' 42'' O, com 996 m de altitude, sob relevo suave ondulado. A área experimental está inserida em uma região de clima subtropical úmido, classificado como Cfb (Köppen), com temperatura média mensal entre 13 °C no mês mais frio (julho) e 23 °C no mais quente (janeiro), e precipitação pluviométrica anual de 1400 mm (Caviglione et al., 2000). O solo foi classificado como LATOSSOLO BRUNO distrófico típico (Embrapa, Fundação ABC, 2001) com 404 g kg⁻¹ de areia, 121 g kg⁻¹ de silte e 475 g kg⁻¹ de argila na camada de 0-20 cm de profundidade, de textura argilosa.

Trata-se de um experimento de longa duração, implantado no inverno de 2005, e desse tempo em diante cultivado com a sucessão azevém (*Lolium multiflorum* Lam.) no inverno, e milho (*Zea mays* L.) para silagem no verão (Piva, 2012).

O experimento é constituído por três sistemas de uso e sete sistemas de preparo do solo distribuídos num delineamento de parcela subdividida em quatro repetições, onde o fator parcela é o sistema de uso e o fator subparcela o sistema de preparo do solo. No entanto, para este estudo foram selecionados somente dois sistemas de uso e dois sistemas de preparo do solo:

- Lavoura sob preparo convencional (LAV-PC); azevém para cobertura do solo, e uma operação com arado de discos e duas gradagens niveladoras no inverno.
- Lavoura sob plantio direto (LAV-PD); azevém para cobertura do solo sob plantio direto, dessecado com glifosato.
- Integração lavoura-pecuária sob preparo convencional (ILP-PC); azevém pastejado por gado de leite, e uma operação com arado de discos e duas gradagens niveladoras no inverno; altura do azevém 20 a 25 cm com carga animal para pastejo em três dias considerando a oferta de matéria seca para um consumo de 2,5 % do peso vivo, com três pastoreios por ano (junho, julho e agosto);
- Integração lavoura-pecuária sob plantio direto (ILP-PD); azevém pastejado por gado de leite, sob plantio direto; altura do azevém 20 a 25 cm com carga animal para

pastejo em três dias considerando a oferta de matéria seca para um consumo de 2,5 % do peso vivo, com três pastoreios por ano (junho, julho e agosto);

As adubações foram realizadas de acordo com a necessidade de cada cultura, independente do sistema. Para a cultura do milho foi realizado uma aplicação de 180 kg ha⁻¹ de nitrogênio total, 90 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 185 kg ha⁻¹ de K₂O. E para a cultura do azevém 200 kg ha⁻¹ de 10-20-20 na base, 120 + 60 kg ha⁻¹ de uréia e KCl no estágio de perfilhamento, e 120 kg ha⁻¹ de uréia após o corte, sendo realizados dois cortes durante o ciclo da cultura por safra. A reposição de K extraído pelo azevém e o milho foi variável por parcela.

2.2 CARBONO E NITROGÊNIO DO SOLO

Amostras de solo foram coletadas em abril de 2014, no 9º ano do experimento, em dois pontos por subparcela, nas camadas de 0-5, 5-10, 10-20, 20-30, 30-45, 45-60, 60-80 e 80-100 cm.

As camadas até 30 cm foram amostradas pelo método de escavação com espátula. Para delimitar o ponto de coleta foi cravado um gabarito de metal (40 cm × 25 cm x 5 cm de altura) no solo, e utilizado lâminas de metal para coletar com precisão as camadas de 0-5, 5-10, 10-20 e 20-30 cm. Cada camada de solo retirada foi integralmente pesada no campo com o auxílio de uma balança, e separado aproximadamente 500 g de solo para serem levados até a Universidade Federal do Paraná em Curitiba-PR para determinação de umidade, densidade e demais análises. Nessas camadas, o volume de solo foi obtido pela dimensão do gabarito (40 cm × 25 cm) multiplicado à profundidade da camada amostrada, assim, com os valores de volume e massa conhecidos foi possível calcular a densidade do solo.

As camadas de 30-45, 45-60, 60-80 e 80-100 cm de profundidade foram amostradas com a ajuda de um trado rosca, com duas perfurações por trincheira, delimitadas por um cilindro metálico (20 cm de altura e 20 cm de diâmetro). A profundidade de tradagem foi controlada a partir do gabarito de metal na superfície e de uma marcação realizada previamente no trado. Cada camada amostrada foi pesada em campo e retirada uma amostra de aproximadamente 500 g. O volume de solo nessas últimas camadas foi obtido multiplicando-se as dimensões do cilindro (20 x 20 cm) pela profundidade da camada. Com base no volume obtido foi calculada a densidade. Cada trincheira amostrada constitui uma duplicata.

As amostras de solo foram homogeneizadas em campo e levadas ao laboratório para serem secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira de 2 mm (terra fina seca ao ar - TFSA) (EMBRAPA, 1997). Uma sub-amostra de aproximadamente 20 g foi retirada e moída em gral de ágata até passar em peneira de 0,20 mm. A determinação do teor de C e N das amostras de solo foi feito por combustão seca em analisador elementar Vario EL III do laboratório de Biogeoquímica do Departamento de Solos e Engenharia Agrícola da UFPR. Os estoques de C e N até 1 (um) metro de profundidade foram calculados com base nos valores de concentração do C e N e na densidade, e posteriormente corrigidos pela massa equivalente do solo que considera massas iguais do solo entre os tratamentos, tendo o PC como referência (Sisti et al., 2004).

Para o cálculo da taxa de sequestro anual de C e acúmulo de N, foi utilizado o tratamento LAV-PC como referência para a lavoura, e ILP-PC como referência para a ILP, e a diferença nos estoques de C e N nos demais tratamentos comparados ao tratamento referência foi dividida pelo período em anos de implantação do experimento (9 anos).

2.3 FRACIONAMENTO FÍSICO GRANULOMÉTRICO

Para a etapa de dispersão das amostras foi realizado a agitação com esferas e sonicação, e a separação das frações físicas por peneiração e sedimentação gravitacional. O procedimento foi realizado nas amostras da camada de 0-5 cm, e está representado na Figura 1. Primeiramente, em um frasco de 100 mL foram colocados 20 g de solo, 80 mL de água e 7 esferas de poliacetal que foram agitadas por um período de 16 horas com o objetivo de romper os agregados $>53 \mu\text{m}$ sem comprometer a MOP. Em seguida, a suspensão foi passada em uma peneira de $53 \mu\text{m}$ e com o auxílio de um jato pulverizador de água foi separado a fração de tamanho areia + MOP, a qual foi levada para estufa para ser seca a $45 \text{ }^\circ\text{C}$. A suspensão que passou pela peneira de $53 \mu\text{m}$ correspondente a fração MOM, foi dividida em tubos de vidro de 200 mL e centrifugada a fim de concentrar a amostra. Ao sobrenadante por ainda conter partículas sólidas foi acrescentado cerca de 10 mL de CaCl_2 $0,5 \text{ mol L}^{-1}$, deixado em repouso por 12 horas, e após todo o material sólido foi reunido em um único tubo para ser levado ao aparelho de ultra som. O volume foi ajustado para 200 mL e a amostra submetida a uma energia de 900 J mL^{-1} para total dispersão de silte e argila, com testes previamente realizados. Após a sonicação, a amostra foi transferida para uma proveta de 1000 mL e para a separação das partículas de silte e argila a suspensão foi submetida a 8-9 ciclos de

sedimentação gravitacional, com o tempo de sedimentação calculado a partir da Lei de Stokes. A fração de tamanho argila foi sifonada, armazenada em galões de 5 L e ao final do ciclo de sedimentação transferida para um recipiente de 20 L de parede reta e lisa, a fim de se evitar o acúmulo de amostra em ranhuras; em seguida foi acrescentado cerca de 200 mL de CaCl_2 $0,5 \text{ mol L}^{-1}$ deixado em repouso por 12 horas, transferida para um béquer e levada para a estufa a $45 \text{ }^\circ\text{C}$. A fração de tamanho silte, sedimentada ao fundo da proveta, foi transferida para um béquer e levado a estufa a $45 \text{ }^\circ\text{C}$. Ao final do fracionamento físico granulométrico foram obtidas as seguintes frações físicas: matéria orgânica particulada (MOP) + fração areia ($>53 \text{ }\mu\text{m}$), fração silte ($53\text{-}2 \text{ }\mu\text{m}$) e fração argila ($<2 \text{ }\mu\text{m}$).

Após a secagem, as amostras foram moídas em gral de ágata, passadas em peneira de 0,20 mm, pesadas, e a determinação do teor de C e N orgânico feito por combustão seca em analisador elementar Vario EL III do laboratório de Biogeoquímica do Departamento de Solos e Engenharia Agrícola da UFPR.

Os estoques de C e N em Mg ha^{-1} em cada fração foram calculados com base nas porcentagens do elemento em cada fração, multiplicado ao estoque acumulado corrigido do solo inteiro (Mg ha^{-1}), dividido por 100.

2.4 ÍNDICE DE MANEJO DE CARBONO – IMC

Para o cálculo do índice de manejo de carbono (IMC), o tratamento LAV-PC foi considerado o tratamento referência, portanto, com $\text{IMC}=100$.

Primeiramente, foi calculado o índice de estoque de carbono (IEC) (equação 1).

$$IEC = \frac{\text{estC tratamento}}{\text{estC referência}} \quad \text{equação (1)}$$

Onde: estC tratamento = estoque de C do tratamento avaliado (Mg ha^{-1}); estC referência = estoque de C do tratamento referência (Mg ha^{-1}).

Em seguida, foi calculada a labilidade do carbono (LC) (equação 2), que possibilitou o cálculo do índice de labilidade do carbono (ILC) (equação 3).

$$LC = \frac{\text{estC lábil}}{\text{estC não lábil}} \quad \text{equação (2)}$$

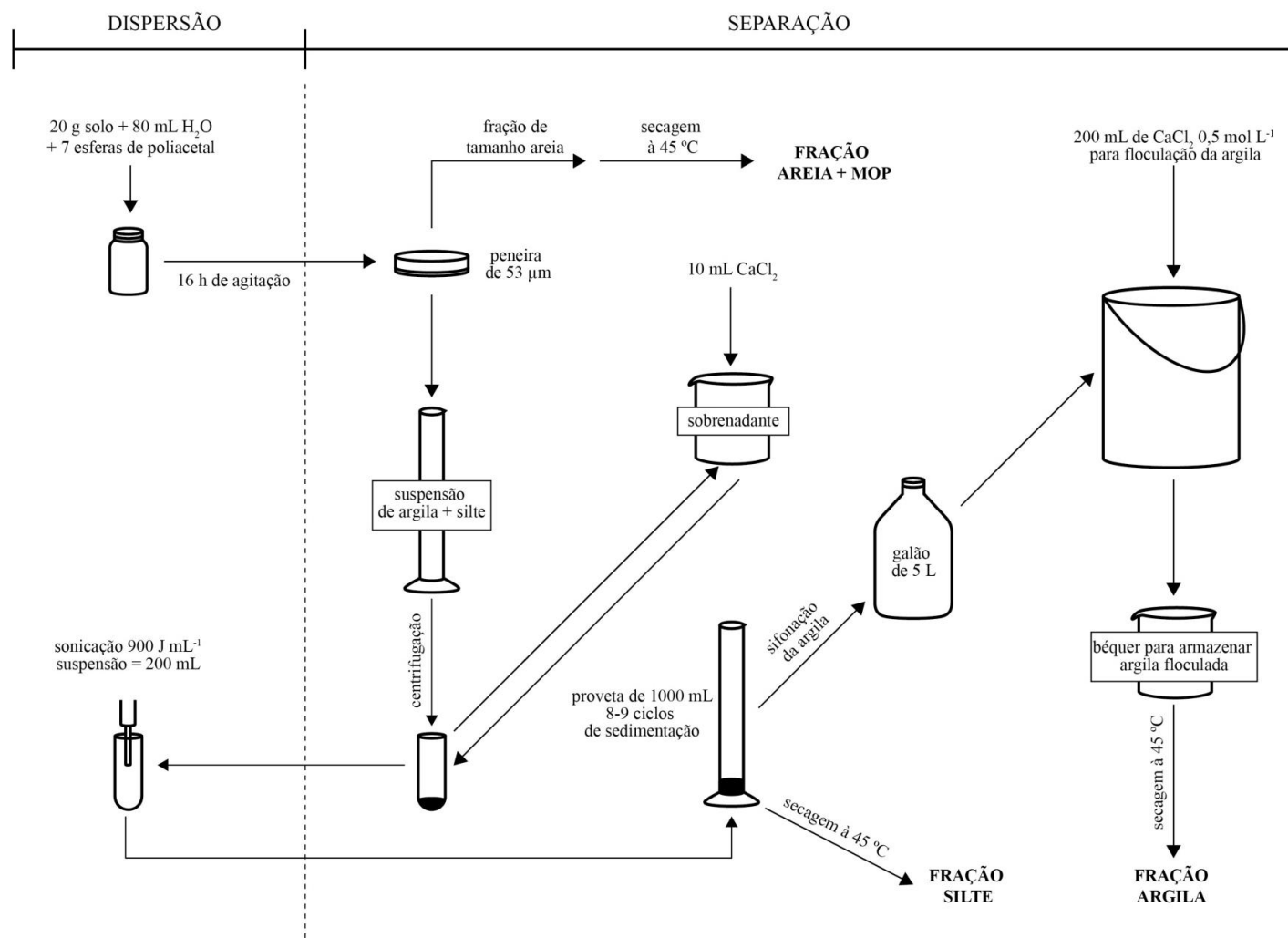


Figura 1. Esquema do fracionamento físico granulométrico das amostras.

Onde: estC lábil = estoque de C da fração areia + MOP (Mg ha^{-1}); estC não lábil = estoque de C da fração silte e da fração argila (Mg ha^{-1}).

$$ILC = \frac{\text{LC tratamento}}{\text{LC referência}} \quad \text{equação (3)}$$

Onde: LC tratamento = labilidade do C do solo no tratamento avaliado; LC referência = labilidade do C no solo no tratamento referência.

Por fim, a partir dos resultados de IEC e ILC foi possível calcular o IMC (equação 4).

$$\text{IMC} = \text{IEC} \times \text{ILC} \times 100 \quad \text{equação (4)}$$

2.5 RESSONÂNCIA PARAMAGNÉTICA ELETRÔNICA – EPR

Para a análise de EPR as amostras secas já moídas em peneira de 0,20 mm foram armazenadas em tubos de quartzo com diâmetro de 4 mm. Para obtenção dos espectros foi empregado o espectrômetro BRUKER ESP 300E operando em uma frequência de modulação de 100 kHz em banda-X (9,5 GHz), a uma temperatura ambiente ($\sim 300 \text{ K}$) do Laboratório de Projetos e Processos Ambientais da Universidade Federal do Paraná, em Curitiba (PR). Os dados de EPR foram trabalhados com o programa Win-EPR®.

Foram utilizados os espectros das amostras em varredura de campo magnético de 50 G e 5000 G de uma amostra padrão de quantidade determinada de radicais livres orgânicos, “Wich Pitch” com $1,04 \times 10^{13} \text{ spins cm}^{-1}$, assim, foi possível calcular o número de spins g^{-1} através de fórmulas matemáticas. Maiores detalhamentos sobre a metodologia são descritos por Cardoso (2013).

A altura do tubo de EPR foi transformada em massa, e o valor de spins em cm^{-1} convertido em spins g^{-1} . A largura da linha foi obtida utilizando os espectros de 50 G com auxílio do programa Win-EPR®. Para normalização dos dados, os valores de spin g^{-1} foram transformados em spin $\text{g}^{-1} \text{ C}$, através da sua divisão pela concentração de C na amostra.

Sabendo que Latossolos brasileiros são ricos em óxidos de ferro (Gonçalves et al., 2003; Reis et al., 2014), para que não houvesse interferência do Fe^{3+} , uma vez que esse é um metal paramagnético e que pode vir a sobrepor os sinais dos RLS (Bayer et al., 2000), as amostras foram previamente tratadas com ácido fluorídrico a 10 %, a fim de concentrar

apenas o material orgânico (Schmidt et al., 1997). A recuperação de C foi calculada através da fórmula:

$$g\ C\ da\ amostra = \frac{\text{massa após HF} \times \% C\ após\ HF}{100}$$

Onde: massa após HF = massa de C em g após o tratamento com HF 10 %; % C após HF = % de C obtido na análise elementar via combustão seca após o tratamento com HF 10 %. A partir dos valores de gramas de C nas amostras foi possível calcular a porcentagem de recuperação:

$$\text{recuperação de C} = \frac{\text{g C após HF}}{\text{g C na amostra}} \times 100$$

Onde: g C após HF = gramas de C após o tratamento com HF 10 %; g C na amostra = gramas de C na amostra inicial antes do tratamento com HF 10 %.

Para a recuperação do N foi empregado às mesmas equações apresentadas acima.

2.6 ANÁLISES ESTATÍSTICAS

A análise estatística tem como base o delineamento experimental em parcela subdividida, onde o fator parcela é o sistema de uso e fator subparcela o sistema de preparo do solo, em quatro repetições. Os resultados foram submetidos à análise de variância ANOVA. Médias entre tratamentos foram comparadas pelo Teste de Tukey ($p < 0,10$). As análises foram realizadas com o programa estatístico R (R Development Core Team, 2008), e o software de gráficos SigmaPlot 12.0 e Win-EPR®.

3. RESULTADOS

3.1 DENSIDADE DO SOLO, CONCENTRAÇÕES E ESTOQUES TOTAIS DE C E N

Houve um adensamento a 1,18 e 1,26 kg dm⁻³ na camada de 5-10 cm em todos os sistemas avaliados, seguido por diminuição da densidade em profundidade (Figura 2). As menores densidades na camada superficial (0,86 a 0,92 kg dm⁻³) ocorreram possivelmente pelo alívio causado pela ação mecânica de raízes e discos de semeadura.

O PC teve maiores densidades do solo nas camadas 30-45, 45-60 e 60-80 cm quando comparado ao PD (Figura 2), possivelmente devido ao efeito acumulativo de pressão causado pelo maior tráfego de máquinas nesse sistema. Nas demais camadas não houve diferença estatística entre os tratamentos, evidenciando que a ILP não alterou a densidade em relação a lavoura.

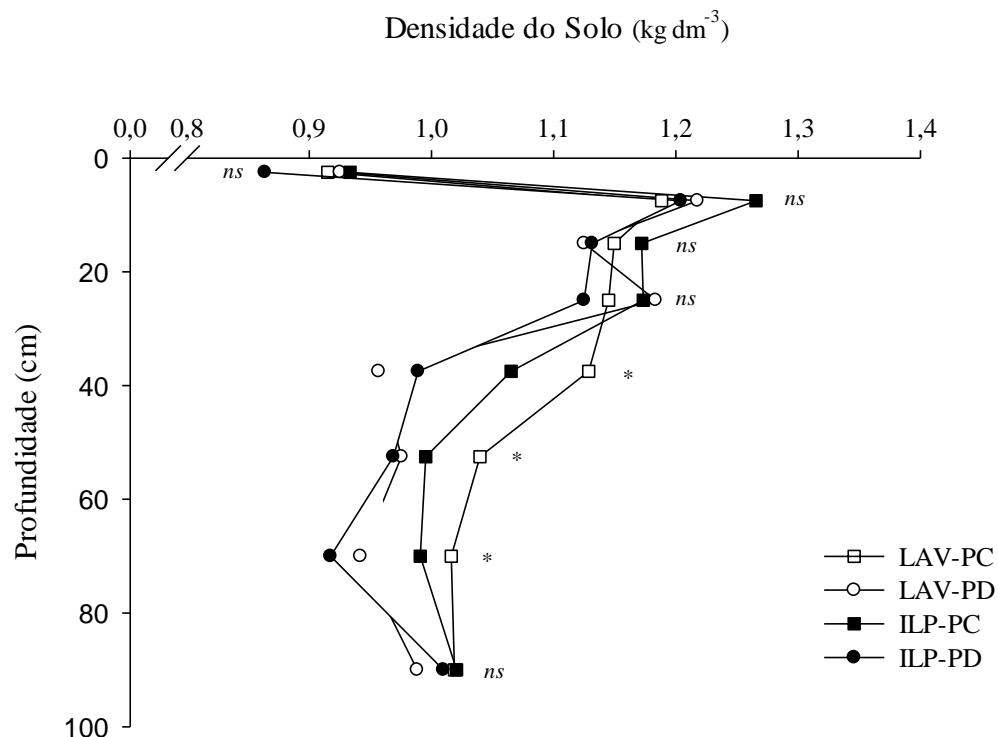


Figura 2. Densidade de um Latossolo Bruno sob lavoura em preparo convencional (LAV-PC), lavoura em plantio direto (LAV-PD), integração lavoura-pecuária em preparo convencional (ILP-PC) e integração lavoura-pecuária em plantio direto (ILP-PD). * ($p < 0,10$), *ns* não significativo (teste de Tukey). Castro-PR.

A concentração de C foi afetada por sistema de preparo do solo principalmente na camada de 0-5 cm, com um incremento pelo PD, tanto no sistema lavoura como na ILP (Tabela 1). A mesma tendência, embora menos expressiva, foi observada em 60-80 cm. Mas em 20-30 cm do solo sob ILP, foi o PC que apresentou maior concentração de C (Tabela 1). Quanto ao N, o PD também aumentou sua concentração em 0-5 cm, mas em 10-20 cm foi o PC que aumentou essa concentração, tanto em lavoura como em ILP (Tabela 1). Nas demais camadas, a tendência do resultado para N não foi muito clara.

Nos sistemas de uso do solo, de maneira geral tanto a concentração de C como a de N foram muito semelhantes entre lavoura e ILP (Tabela 1), e diferenças que ocorreram em algumas camadas não evidenciaram um padrão consistente de tendência para concluir se um ou outro sistema foi melhor.

Tabela 1. Concentrações de carbono e nitrogênio de Latossolo Bruno sob lavoura (LAV) ou integração lavoura-pecuária (ILP) combinados com preparo convencional (PC) ou plantio direto (PD). Castro-PR.

Camada (cm)	LAV		ILP	
	PC	PD	PC	PD
C (g kg⁻¹)				
0-5	30,0 Ba ¹	37,5 Aa	28,6 Ba	38,3 Aa
5-10	30,2 Aa	29,5 Aa	27,5 Ab	30,0 Aa
10-20	27,0 Aa	26,3 Aa	28,2 Aa	27,1 Aa
20-30	23,0 Aa	24,4 Aa	24,0 Aa	21,7 Bb
30-45	18,5 Ab	20,1 Aa	20,7 Aa	20,1 Aa
45-60	15,4 Aa	17,1 Aa	17,0 Aa	17,4 Aa
60-80	13,8 Ba	16,0 Aa	15,1 Ba	16,1 Aa
80-100	13,3 Aa	14,0 Aa	13,5 Aa	13,5 Aa
N (g kg⁻¹)				
0-5	2,18 Ba	2,96 Aa	1,94 Bb	3,00 Aa
5-10	2,16 Aa	2,20 Aa	2,00 Bb	2,24 Aa
10-20	1,87 Aa	1,78 Ba	2,00 Aa	1,83 Ba
20-30	1,43 Ba	1,50 Aa	1,54 Aa	1,36 Bb
30-45	1,08 Bb	1,18 Aa	1,23 Aa	1,17 Aa
45-60	0,85 Aa	0,96 Aa	0,97 Aa	0,99 Aa
60-80	0,73 Bb	0,87 Aa	0,81 Aa	0,83 Aa
80-100	0,69 Aa	0,74 Aa	0,72 Aa	0,71 Aa

¹ Letras maiúsculas na linha comparam os sistemas de preparo do solo, dentro do mesmo sistema de uso. Letras minúsculas na linha comparam os sistemas de uso do solo, dentro do mesmo sistema de preparo (teste de Tukey a 10 %).

Na camada de 0-20 cm, o PD elevou os estoques de C tanto em lavoura quanto em ILP (Tabela 2), a taxas de 0,26 e 0,52 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente (Tabela 3). A mesma tendência foi observada para N com taxas significativas de acúmulo. Quando se considerou até 1 m de profundidade, o aumento de 199,3 Mg ha⁻¹ para 212,9 Mg ha⁻¹ foi significativo no sistema de lavoura, a uma taxa de 1,51 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, porém na ILP não houve efeito do sistema de preparo, com taxas nulas de sequestro e acúmulo.

A ILP, em relação à lavoura, não alterou os estoques de C nem de N em 0-20 cm, tanto no PC como no PD (Tabela 2), conseqüentemente não alterando as taxas de sequestro e acúmulo (Tabela 3). Até 1 m de profundidade, o mesmo resultado ocorreu em PD, mas em PC os estoques de C e N foram maiores na ILP a taxas de sequestro de C de 1,13 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ e acúmulo de N de 0,08 Mg ha⁻¹ ano⁻¹.

Tabela 2. Estoques de carbono e nitrogênio em 0-20 cm e 0-100 cm de Latossolo Bruno sob lavoura (LAV) ou integração lavoura-pecuária (ILP) combinados com preparo convencional (PC) ou plantio direto (PD). Castro-PR.

Camada (cm)	LAV		ILP	
	PC	PD	PC	PD
C (Mg ha⁻¹)				
0-20	62,7 Ba ¹	65,0 Aa	61,7 Ba	66,2 Aa
0-100	199,3 Bb	212,9 Aa	209,5 Aa	209,5 Aa
N (Mg ha⁻¹)				
0-20	4,4 Ba	4,7 Aa	4,4 Ba	4,8 Aa
0-100	12,1 Bb	13,0 Aa	12,8 Aa	12,8 Aa

¹ Letras maiúsculas na linha comparam os diferentes sistemas de preparo do solo, dentro do mesmo sistema de uso. Letras minúsculas na linha comparam os diferentes sistemas de uso do solo, dentro do mesmo sistema de preparo (teste de Tukey a 10%).

Tabela 3. Taxa de sequestro de carbono e acúmulo de nitrogênio em 0-20 cm e 0-100 cm de Latossolo Bruno sob lavoura (LAV) ou integração lavoura-pecuária (ILP) combinados com preparo convencional (PC) ou plantio direto (PD). Castro-PR.

Camada (cm)	PD vs PC		ILP vs LAV	
	LAV ^a	ILP	PC ^b	PD
Sequestro de C (Mg ha⁻¹ ano⁻¹)				
0-20	0,26 ¹ *	0,52 *	-0,11 ² ns	0,13 ns
0-100	1,51 *	0,00 ns	1,13 *	-0,38 ns
Acúmulo de N (Mg ha⁻¹ ano⁻¹)				
0-20	0,03 *	0,04 *	0,00 ns	0,01 ns
0-100	0,10 *	0,00 ns	0,08 *	-0,02 ns

^a LAV-PC como tratamento referência; ^b ILP-PC como tratamento referência.

¹ Para o cálculo, quando analisado o efeito dos sistemas de preparo nos sistemas de uso do solo, o estoque da LAV-PD foi subtraído do estoque da LAV-PC, dividido pelo número de anos do experimento (9 anos). ² Quando analisado o efeito dos sistemas de uso nos sistemas de preparo do solo, o estoque da ILP-PC foi subtraído do estoque da LAV-PC, dividido pelo número de anos do experimento (9 anos).

*Significância nos estoques foi mantida nas taxas de sequestro de C e acúmulo de N ($p > 0.10$), *ns* não significativo (teste de Tukey).

3.2 CARBONO E NITROGÊNIO EM FRAÇÕES FÍSICAS E IMC

As maiores concentrações de C e N nas frações ocorreram no PD quando comparado ao PC (Tabela 4). A fração areia + MOP foi a que melhor expressou efeito do sistema conservacionista, com as concentrações nos sistemas sob PD de 19,04 g kg⁻¹ fração para a lavoura e 18,18 g kg⁻¹ fração para a ILP, comparadas aos 10,80 e 10,57 g kg⁻¹ fração na LAV-PC e ILP-PC, respectivamente. Contudo, o uso não influenciou as concentrações de C e N, com teores semelhantes para ILP e lavoura em todas as frações.

A relação C:N para todos os tratamentos segue uma sequência onde silte > areia + MOP > argila (Tabela 4). O PC apresentou as maiores relações C:N na fração silte, quando comparado ao PD. As diferenças na relação C:N entre ILP e lavoura foram inconsistentes.

Tabela 4. Proporção de massa recuperada, concentração de C e N, e relação C:N de frações físicas granulométricas da camada de 0-5 cm de Latossolo Bruno sob lavoura (LAV) ou integração lavoura-pecuária (ILP), combinados com preparo convencional (PC) ou plantio direto (PD). Castro-PR.

	fração ¹	% massa total	carbono	nitrogênio	relação C:N
			g kg ⁻¹ fração		
LAV-PC	areia+MOP	41,4	10,80	0,80	13,5
	silte	20,3	33,62	1,96	17,1
	argila	34,7	44,20	3,39	13,0
	total	96,3	30,02	2,18	
LAV-PD	areia+MOP	42,7	19,04	1,45	13,0
	silte	20,7	41,32	2,72	15,2
	argila	31,5	50,99	4,27	11,9
	total	94,9	37,49	2,96	
ILP-PC	areia+MOP	40,6	10,57	0,87	12,5
	silte	21,3	34,77	2,18	16,1
	argila	33,4	44,24	3,58	12,4
	total	95,4	28,56	1,94	
ILP-PD	areia+MOP	41,2	18,18	1,36	13,3
	silte	21,4	40,39	2,61	15,5
	argila	32,4	51,51	4,27	12,0
	total	95,0	38,28	3,00	

¹ areia+MOP (2 a 0,05 mm); silte (0,05 a 0,002 mm); argila (<0,002 mm).

Os estoques de C e N em todas as frações tiveram efeito significativo do sistema de preparo, sendo maiores no PD que no PC (Tabela 5); não foram afetadas pelo uso, refletindo tendência que ocorreu com os estoques totais do solo.

Os maiores estoques de C e N ocorreram na fração argila, por sua elevada capacidade de interação com a MOS e por representar maior proporção de massa do solo (Figura 3), seguido de silte > areia + MOP para o C; e silte = areia + MOP para o N (Tabela 5).

Apenas os sistemas LAV-PD e ILP-PD apresentaram IMC maior que o da referência, com 205 e 191, respectivamente (Tabela 5); indicando que o PD é um manejo de melhor qualidade se comparado ao PC. Sistemas de uso do solo, se lavoura ou ILP, não alteraram o IMC. O ILC em função das suas maiores variações foi o parâmetro que melhor detectou alterações na MOS devido os diferentes manejos adotados (Tabela 5).

Tabela 5. Estoques de carbono e nitrogênio no solo inteiro e nas frações areia+MOP, silte e argila, carbono lábil, índice de estoque de carbono (IEC), labilidade do carbono (LC), índice de labilidade do carbono (ILC) e índice de manejo do carbono (IMC) da camada de 0-5 cm de Latossolo Bruno sob lavoura (LAV) ou integração lavoura-pecuária (ILP), combinados com preparo convencional (PC) ou plantio direto (PD). Castro-PR.

	Total	MOP	Silte	Argila					
	-----Carbono (Mg ha ⁻¹)-----				C lábil ^a	IEC ^b	LC ^c	ILC ^d	IMC ^e
PC-LAV	13,7 Ba ¹	2,1 Ba	3,1 Ba	7,0 Ba	2,1	1,00	0,20	1,00	100
PD-LAV	17,0 Aa	3,7 Aa	3,9 Aa	7,3 Aa	3,7	1,25	0,33	1,64	205
PC-ILP	13,0 Ba	1,7 Ba	3,0 Ba	6,1 Ba	1,7	0,95	0,20	0,96	93
PD-ILP	17,5 Aa	3,5 Aa	4,0 Aa	7,6 Aa	3,5	1,28	0,29	1,49	191
	-----Nitrogênio (Mg ha ⁻¹)-----								
PC-LAV	1,0 Ba	0,2 Ba	0,2 Ba	0,5 Ba					
PD-LAV	1,3 Aa	0,3 Aa	0,3 Aa	0,6 Aa					
PC-ILP	0,9 Ba	0,2 Ba	0,2 Ba	0,5 Ba					
PD-ILP	1,4 Aa	0,3 Aa	0,3 Aa	0,6 Aa					

¹ Letras maiúsculas na coluna comparam os diferentes sistemas de preparo do solo, dentro do mesmo sistema de uso. Letras minúsculas na coluna comparam os diferentes sistemas de uso do solo, dentro do mesmo sistema de preparo (teste de Tukey a 10%).

^a C lábil = C MOP; ^b IEC = C total do tratamento / C total do tratamento referência; ^c LC = C lábil / C não-lábil (silte+argila); ^d ILC = LC tratamento / LC do tratamento referência; ^e IMC = IECxILCx100.

Tanto para o C como para o N, as maiores proporções do estoque total se encontram na fração MOM, que corresponde às frações silte + argila. Para C, essa proporção variou de 66 a 74 %, e para o N 65 a 82 % (Figura 3).

A proporção de C e N na fração areia + MOP foi maior nos sistemas sob PD, mostrando a responsividade dessa fração ao sistema de preparo do solo adotado; sem efeitos do sistema de uso.

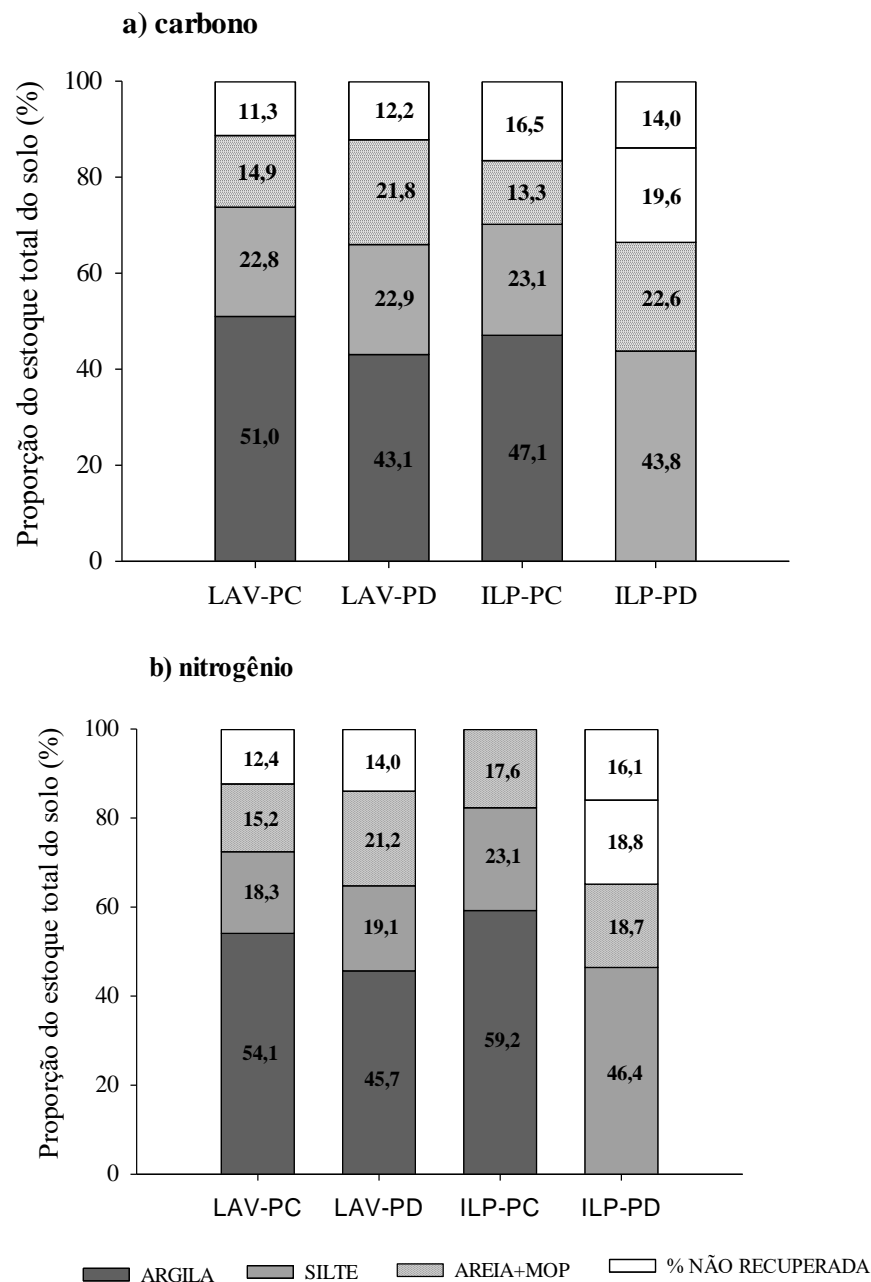


Figura 3. Proporção do estoque total do solo para carbono (a) e nitrogênio (b) nas frações argila, silte e areia+MOP da camada de 0-5 cm de Latossolo Bruno sob lavoura em preparo convencional (LAV-PC), lavoura em plantio direto (LAV-PD), integração lavoura-pecuária em preparo convencional (ILP-PC) e integração lavoura-pecuária em plantio direto (ILP-PD). Castro-PR.

A recuperação da massa de amostra de solo após o fracionamento físico variou de 94,9 a 96,3 % (Tabela 4), embora não fosse 100 %, são consideradas boas recuperações. A porção não recuperada foi possivelmente perdida nos processos de pesagem, lavagem e secagem.

A recuperação de C pós-tratamento com o HF variou de 36 a 68 %, e de N de 38 a 72 %, não havendo recuperações seletivas (Tabela 6), por isso, as relações C:N são comparáveis com a inicial e a final. Essa mesma tendência foi observada por Gonçalves et al. (2003) em Latossolo do Rio Grande do Sul. Essas perdas de massas sugerem que parte do material orgânico também foi atacado durante o tratamento com HF 10 %. A recuperação de C e N foram maiores na fração areia + MOP, intermediárias no silte e menores na argila (Tabela 6).

Em média no solo inteiro diminui 4,4 %, na areia + MOP aumentou 11,7 %, no silte aumentou 2,7 % e na argila diminui 8,1 % da relação C:N após o tratamento com HF 10 %, o que seriam valores considerados aceitáveis para efeito de tratamento (Tabela 6). A fração areia + MOP e silte apresentaram valores de Δ (delta) positivos, indicando que houve um aumento das relações C:N após o tratamento com HF. Já na fração argila, a relação C:N diminui com o procedimento (Tabela 6).

3.3 RADICAIS LIVRES SEMIQUINONAS

Independente do sistema de uso ou preparo do solo, a concentração de RLS foi maior na fração silte, intermediária na fração areia + MOP e menor na fração argila (Tabela 7).

A largura da linha do RLS também informa o grau de humificação da amostra; quanto menor a largura da linha maior o grau (Bayer et al., 2003). Os resultados de largura da linha mostram uma variação de 4,04 a 5,08 (Tabela 7). Nas frações solo inteiro, areia + MOP e argila, os sistemas PD apresentam maiores larguras de linha, com diferença apenas na fração silte para os tratamentos sob lavoura, onde o LAV-PC (5,076) foi maior comparado ao LAV-PD (4,729). Na fração silte o valor g foi em torno de 2,003, contrário do encontrado nas demais frações com valor g de 2,004, indicando sua proximidade a átomos de carbono.

O menor valor de ΔH e a maior concentração de spin g^{-1} C em PC, indicam que a amostra se encontra com um maior grau de humificação, isto é, com maior presença de compostos aromáticos que atuam em sua estabilização no solo (Martin-Neto et al., 1998; Bayer et al., 2003; Cardoso, 2013). Nos sistemas manejados sob PD (LAV-PD e ILP-PD) houve as menores densidades de semiquinonas (Tabela 7), indicando que estes estão sofrendo poucas alterações quanto à humificação em sua estrutura.

A ILP não alterou as concentrações de RLS, ou seja, não estando esse sistema de manejo afetando a estrutura da matéria orgânica.

Tabela 6. Recuperação de carbono, nitrogênio e massa de amostra, e relação C:N após o tratamento com ácido fluorídrico a 10 % no solo inteiro e nas frações físicas areia+MOP, silte e argila da camada de 0-5 cm de Latossolo Bruno sob lavoura (LAV) ou integração lavoura-pecuária (ILP) combinados com preparo convencional (PC) ou plantio direto (PD). Castro-PR.

	recuperação (%)			relação C:N		Δ (%)
	C	N	massa amostra	inicial ^a	após tratamento	
solo inteiro						
LAV-PC	56,8	58,9	5,2	13,8	13,3	-3,5
LAV-PD	68,5	72,1	7,4	12,7	12,0	-5,0
ILP-PC	57,9	60,6	5,1	13,5	12,9	-4,5
ILP-PD	67,7	71,1	6,6	12,8	12,2	-4,8
Média	62,7	65,7	6,1	13,2	12,6	-4,4
areia + MOP						
LAV-PC	45,4	38,2	2,0	13,6	16,1	18,7
LAV-PD	66,1	63,0	3,0	13,1	13,7	5,0
ILP-PC	66,8	57,2	2,4	13,0	15,1	16,8
ILP-PD	65,1	61,3	3,6	13,3	14,2	6,3
Média	60,9	54,9	2,7	13,2	14,8	11,7
silte						
LAV-PC	50,9	48,4	6,1	17,1	18,0	5,1
LAV-PD	57,6	56,5	7,8	15,2	15,5	2,0
ILP-PC	48,9	47,3	6,0	16,4	16,9	3,4
ILP-PD	50,9	50,9	6,7	15,4	15,5	0,1
Média	52,1	50,8	6,7	16,0	16,5	2,7
argila						
LAV-PC	43,3	47,9	8,0	13,0	11,8	-9,6
LAV-PD	50,6	53,3	9,8	11,6	11,0	-5,2
ILP-PC	36,8	40,6	7,0	12,6	11,5	-9,4
ILP-PD	46,3	50,3	9,3	12,1	11,1	-8,0
Média	44,2	48,1	8,5	12,3	11,3	-8,1

^a - antes do tratamento com HF 10 %.

Tabela 7. Largura da linha (ΔH) e concentração de radicais livres semiquinonas (spin g⁻¹ C) do solo inteiro e das frações areia + MOP, silte e argila da camada de 0-5 cm de Latossolo Bruno sob lavoura (LAV) ou integração lavoura-pecuária (ILP) combinados com preparo convencional (PC) ou plantio direto (PD). Castro-PR.

Fração	tratamento	g	ΔH	spin g ⁻¹ C
solo inteiro	LAV-PC	2,004	4,605	13,54 x 10 ¹⁷
	LAV-PD	2,004	4,798	9,02 x 10 ¹⁷
	ILP-PC	2,004	4,509	12,23 x 10 ¹⁷
	ILP-PD	2,004	4,767	9,99 x 10 ¹⁷
areia+MOP	LAV-PC	2,004	4,166	8,29 x 10 ¹⁷
	LAV-PD	2,004	4,290	6,76 x 10 ¹⁷
	ILP-PC	2,004	4,632	5,68 x 10 ¹⁷
	ILP-PD	2,004	4,958	5,01 x 10 ¹⁷
silte	LAV-PC	2,003	5,076	14,23 x 10 ¹⁷
	LAV-PD	2,003	4,729	10,15 x 10 ¹⁷
	ILP-PC	2,003	4,048	11,77 x 10 ¹⁷
	ILP-PD	2,003	4,482	11,30 x 10 ¹⁷
argila	LAV-PC	2,004	4,894	5,70 x 10 ¹⁷
	LAV-PD	2,004	4,964	5,23 x 10 ¹⁷
	ILP-PC	2,004	4,092	5,45 x 10 ¹⁷
	ILP-PD	2,004	4,897	4,98 x 10 ¹⁷

Após realização de um corte no eixo do campo magnético, pode-se observar com maior perceptibilidade o pico de RLS em torno de 3520 G no espectro de EPR (Figura 4). Todas as frações apresentaram picos de semiquinonas (Apêndice 1), porém, estes aconteceram em diferentes concentrações.

O sinal de EPR do radical semiquinona somente foi detectado em virtude do tratamento com HF 10%, que permitiu baixos teores de Fe total na amostra.

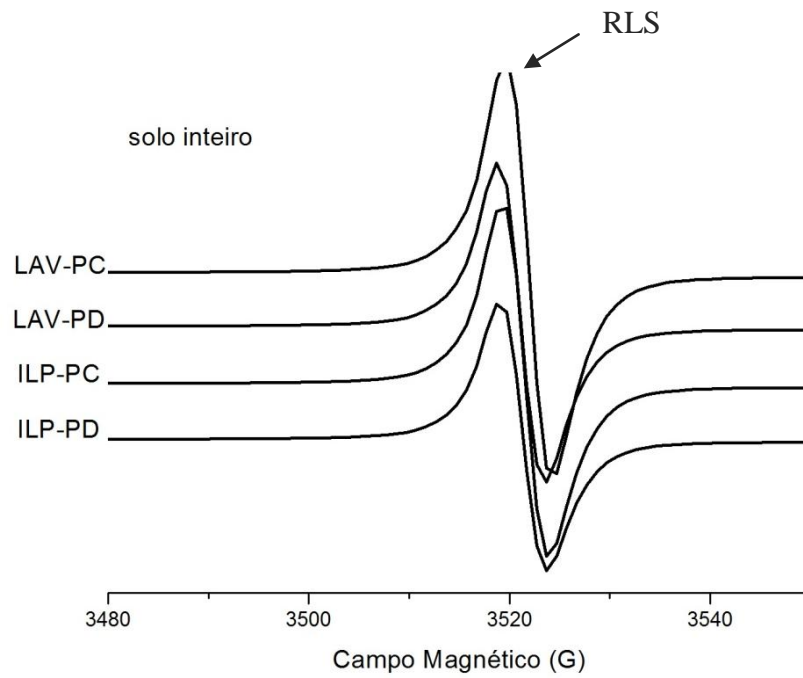


Figura 4. Espectro de EPR do solo inteiro da camada de 0-5 cm de uma Latossolo Bruno sob lavoura em preparo convencional (LAV-PC), lavoura em plantio direto (LAV-PD), integração lavoura-pecuária em preparo convencional (ILP-PC) e integração lavoura-pecuária em plantio direto (ILP-PD) após tratamento com HF 10 %. Castro-PR.

4. DISCUSSÕES

4.1 CARBONO E NITROGÊNIO TOTAIS DO SOLO

As maiores concentrações de C e N em superfície (0-5 cm) no plantio direto (Tabela 1) estão associadas possivelmente à proteção física pelos agregados, que são preservados por não haver revolvimento do solo. Por outro lado, a mobilização de preparo do solo rompe os agregados que protegem fisicamente a MOS (Loss et al., 2011; Bayer et al., 2004), expondo-a a ambiente mais oxidativo e diminuindo as concentrações e conteúdos de C e N em PC.

A ILP teve pouca influência nas concentrações de C (Tabela 1), possivelmente pelo solo se tratar de um Latossolo e por isso possuir teores originalmente altos de C. Piva et al. (2012), aos três anos e meio de implantação da ILP no experimento deste mesmo estudo, não encontraram contribuições significativas desse sistema sob PD aos estoques de C e N em 1 m de profundidade quando comparado a sistemas contínuos de lavoura. Segundo os autores, isso pode estar relacionado ao curto período experimental. Porém, após nove anos a ILP sob PD ainda continua não tendo efeito sobre os estoques em 0-100 cm. Tais resultados concordam com os de Fernández et al. (2011), ao comparar lavoura contínua e ILP sob PD na Argentina, as concentrações de C (20,41 e 21,71 g kg⁻¹, respectivamente) e as condições físicas do solo tiveram poucas diferenças entre os manejos, indicando que não houve efeito residual da pastagem. Tonucci et al. (2011), salientam que alterações nos conteúdos de C ocorrem em longo prazo, e para que um sistema de manejo específico tenha efeito pode-se levar um extenso período de tempo.

O fato da ILP em 1 m de profundidade não apresentar efeito do PD (Tabela 1), pode estar relacionado à inversão de leiva que ocorre em PC no final da camada arável do solo, o que explica as maiores concentrações de C em 20-30 cm, e N em 10-20 cm nesses sistemas manejados convencionalmente. Embora não significativo em grande parte das camadas abaixo de 20 cm, o tratamento ILP-PC teve uma tendência de maiores concentrações de N comparado à LAV-PC (Tabela 1), possivelmente aliado ao fato da aplicação de duas adubações de corte no azevém nesse sistema pastejado quando comparado à lavoura.

A tendência do ocorrido com as concentrações de C e N foi verificada também com os estoques totais superiores em PD na camada de 0-20 cm, tanto para a lavoura como para a ILP; e até 1 m de profundidade na lavoura (Tabela 2). Da mesma maneira, a mínima mobilização do solo permitiu maior estocagem desses elementos pela proteção física dos

agregados. O PD mostrou ser um sistema eficiente em estocar C e N no solo em condições de lavoura. O não efeito do PD em 0-100 cm de profundidade na ILP (Tabela 2) pode ser explicado pela preferência animal de pastejo nessas condições. No campo foi possível observar que as áreas a serem primeiro pastejadas pelo gado eram as de PD, indicada pela menor massa de matéria seca do azevém ($5,1 \text{ kg ha}^{-1}$), ao final dos nove anos de experimento, quando comparado aos sistemas sob PC ($5,6 \text{ kg ha}^{-1}$). Assim, a contribuição significativa da ILP em PC está relacionada à maior concentração de nutrientes mantidos nesse sistema com o pastejo minimizado. E da mesma forma como para as concentrações, os maiores estoques de N na ILP-PC comparado à LAV-PC em função da maior entrada de adubo mineral.

Os estoques significativos na ILP em 0-100 cm sob PC (Tabela 2) remetem a uma condição incomum observada a campo, onde geralmente sistemas integrados são realizados em grande parte sob PD. Portanto, deve-se considerar que embora os estoques sob PD não fossem significativos, estes foram mantidos, não negando a inclusão dos sistemas integrados. O manejo adequado da intensidade de pastejo possivelmente foi também um contribuinte em preservar os estoques de C e N quando comparado aos tratamentos não pastejados (lavoura contínua). Esses dados vão ao encontro de resultados obtidos por Nicoloso et al. (2008), que consideram um pastejo moderado aquele feito numa altura de 20 a 40 cm, permitindo acréscimos nos conteúdos totais de C e N em ILP.

Uma alternativa para aumentar os estoques de N deste solo seria a introdução de leguminosas na sucessão de culturas aveia-milho deste experimento. Esta sucessão pode não ter favorecido incrementos satisfatórios nos estoques de C e N. A diversidade de culturas aumenta a complexidade do sistema, contribuindo positivamente para a capacidade produtiva do solo. A associação de culturas de cobertura em rotação com leguminosas, associada à adubação nitrogenada, atua sinergicamente no aumento de N no solo, e consequentemente, de C (Lovato et al., 2004). A introdução de culturas de cobertura com leguminosas amplia a geração de biomassa e concomitante a isso, os acúmulos de C e N. Para as regiões de clima subtropical, o consórcio de gramíneas com leguminosas pode ser uma boa opção para adicionar de C e N no solo, como demonstrado por Bayer et al. (2011) através de um consórcio de aveia preta e ervilhaca no inverno.

Embora as taxas de sequestro de C e acúmulo de N fossem determinadas principalmente pela adoção do PD (Tabela 3), a inclusão do pastejo (ILP) contribuiu para a retenção desses elementos quando em condição de PC; uma vez que, em PD o superpastejo pode ter afetado negativamente as taxas de sequestro de C. D'Andrea et al. (2004), afirmam

que a pastagem da ILP contribui para o sequestro de C atmosférico devido o sistema radicular abundante e desenvolvido das forrageiras. A biomassa abaixo da superfície do solo pode chegar a ser igual ou maior do que em áreas sem pastejo, segundo López-Mársico et al. (2015); e esta é resultado da produção e vida útil de raízes (Garcia-Pausas et al., 2011). O efeito da desfolha pelo pastejo na biomassa final é comumente inferior à proporção de biomassa viva removida, por um efeito positivo de recrescimento compensatório, em razão da desfolha parcial ou total das forrageiras compensarem a remoção de biomassa (Ferraro & Oosterheld, 2002); contribuindo assim para a biomassa acima e abaixo da superfície do solo. Além do efeito do pastejo, as raízes da cultura do milho podem estar contribuindo para as taxas de sequestro de C e N após sua senescência pela remoção de toda a parte área para a produção de silagem.

Em solos brasileiros subtropicais, Bayer et al. (2006b) obtiveram taxa de sequestro de C de $0,48 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ em solos sob PD para a camada de 0-20 cm. O fato de se encontrar valores abaixo da taxa média indicada para a região do estudo (Tabela 3) pode estar associada às características do solo. Em Latossolo a maior parte do C e N ocorre em frações estabilizadas por interação organo-mineral, e que de acordo com Dieckow et al. (2005a) pode vir a se tornar um processo resistente de retenção do C. Campos et al. (2011) ao compararem em Latossolo Vermelho subtropical sistemas de rotação de culturas (R0=trigo/soja; R1=trigo/soja/aveia preta/soja e R2=aveia preta/soja/aveia preta+ervilhaca/milho/nabo forrageiro/trigo/soja) sob PD e PC assumindo o R0 como linha de base, verificaram taxas de sequestro de C de $0,29$ a $0,51 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ no PD, e $0,12$ a $0,31 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ em PC para o R1 e R2, respectivamente. Os autores concluíram que por se tratar de um Latossolo subtropical de alta estabilidade, o principal fator de acúmulo foi o sistema de cultivo diversificado, e não o preparo do solo.

Muitos estudos sobre C no solo medem estoques até 20 ou 30 cm de profundidade. Porém, Boddey et al. (2010) demonstram a importância de se coletar até 1 m de profundidade e os efeitos significativos e positivos que essa amostragem possui. No Rio Grande do Sul, em um Argissolo, Dieckow et al. (2005a) encontraram para o PD uma taxa de absorção média de C de $1,42 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ até 107,5 cm de profundidade, comparado ao PC. Em Latossolo tropical de Dourados-MS, a ILP sob PD sequestrou $0,91 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ até 1 m de profundidade (Zanatta & Salton, 2010).

As comparações de dados de sequestro de C entre estudos são difíceis, pois pesquisadores fazem uso de diferentes sistemas de referência, desde tipos de preparos

convencionais (número de gradagens, práticas culturais aplicadas, etc), quanto ao uso do solo, no caso de campo nativo como linha de base.

A sucessão milho/azevém se mostrou eficiente nos acúmulos de N com até 0,04 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ na camada de 0-20 cm e de 0,10 Mg ha⁻¹ ano⁻¹ até 1 m de profundidade (Tabela 3). Albuquerque (2015) constatou para o sucessão alfafa/milho sob PD acúmulos de N nas camada de 0-20 cm e 0-100 cm de 0,03 e 0,06 Mg ha⁻¹ ano⁻¹, respectivamente. Para o autor, essas taxas foram consideradas baixas devido à ausência de leguminosas e a exportação de N na cultura do azevém.

4.2 FRAÇÕES FÍSICAS E CARACTERIZAÇÃO DA MOS

Embora o aporte de material vegetal seja equivalente entre os sistemas de manejo, pois segundo Six et al. (1999), a adição de C é similar em PD e PC; o PC apresentou maior relação C:N na fração silte, comparado ao PD (Tabela 4). Dieckow et al. (2005c) encontraram em sua pesquisa presença de material carbonizado na fração silte; o que remete a hipótese que possivelmente no presente estudo, a maior C:N do silte seja decorrente da presença dessas partículas de carvão, que está diretamente ligada a sua maior aromaticidade por EPR. Devido seu tamanho intermediário (0,05 a 0,002 mm) as partículas de carvão possivelmente se acumulam nesta fração; as quais podem ter sido derivadas de processos de queima antes da conversão para área agrícola. A menor C:N na fração argila, corrobora com o fato de esta ser uma fração com alto grau de humificação e com sua constituição oriunda de origem microbiana (Dieckow, 2003).

Assim como nos estoques totais de C, o estoque de C nas frações granulométricas (MOP e MOM) foi maior em PD que em PC (Tabela 5), e sem efeito do sistema de uso. O não revolvimento do solo permitiu a oclusão do C no solo inteiro, e também em suas frações físicas. Os resultados vão de encontro com os de Bayer et al. (2004), que após seis anos de experimento em um Latossolo Vermelho no Cerrado com o objetivo de verificar o efeito do PD sobre quatro diferentes sistemas de culturas, observaram aumentos somente no estoque total e na MOP, atribuindo o não efeito do PD sobre a MOM ao curto período experimental. Ainda segundo os autores, a principal contribuição do PD na MOP foi quanto à proteção física dos agregados, além da preservação do resíduo vegetal sobre o solo, auxiliando na amenização das temperaturas.

A MOM atingiu proporções de até 74 % do estoque total de C e 82 % do estoque total de N (Figura 3), decorrente de sua forte atuação junto a MOS. De acordo com Nicoloso (2005) e Salton et al. (2005), até 80 % do carbono orgânico total pode estar contido na MOM. Isto porque a argila e o silte por possuírem granulometria finas possuem uma alta capacidade de interação com a matéria orgânica, explica Winck et al. (2014).

As maiores variações nas proporções dos estoques totais de C e N da fração areia + MOP nos sistemas sob PD (Figura 3) demonstram a importância dessa fração em expressar efeitos de mudança no manejo do solo. Bayer et al. (2004) constataram que frações mais lábeis da matéria orgânica como a MOP, são as que apresentam maior sensibilidade ao manejo. Visto que a MOP é composta por restos de plantas e fungos (Gregorich & Janzen, 2006), os resíduos depositados sobre o solo no PD e a rizosfera abundante das forrageiras, contribuem expressivamente para a formação dessa fração como fonte de nutrientes e energia. Em havendo perturbação no sistema os impactos incidirão diretamente sobre essa fração, o que explica o fato do PC possuir menor proporção do estoque total na fração areia + MOP. Loss et al. (2011) ressaltam que as variações na MOP na camada de 0-5 cm dependem de adições de material vegetal, e para que os teores sejam mantidos essas adições devem ser permanentes, contribuindo diretamente para a formação de agregados, com uma relação linear entre estes. Além da quantidade de resíduo, deve-se levar em conta a qualidade do mesmo, pois resíduos mais lignificados contribuirão para aumentos da MOP. As variações na proporção do estoque total de C e N nas frações físicas não foram alteradas pela ILP comparada à lavoura contínua. Portanto, foram observadas alterações somente entre os sistemas de preparo do solo.

As maiores amplitudes de valores do ILC, quando comparado ao IEC (Tabela 5), se devem ao manejo aplicado na área. Os sistemas sob PD pela manutenção de resíduos sobre o solo e por protegerem fisicamente os macro e microagregados, proporcionaram maiores quantidades de C lábil, resultando em maiores índices de labilidade do C. Alterações qualitativas na matéria orgânica são melhores observadas no PD que no PC. Nicoloso (2005), ao avaliar o IMC em diferentes frequências de pastejo sob Argissolo Vermelho-Amarelo no Rio Grande do Sul observou maiores variações também no ILC. Esses resultados discordam do encontrado por Loss et al. (2011) com sistemas de culturas em Argissolo Vermelho-Amarelo no Rio de Janeiro, onde os autores obtiveram maiores variações no IEC. A maior variação de um parâmetro utilizado no cálculo do IMC melhor identifica as mudanças causadas por práticas de manejo na qualidade da MOS. Sendo assim, sistemas que possuem

maiores valores de IEC e ILC, conseqüentemente IMC, são considerados melhores controladores da dinâmica da MOS comparado àqueles menores (Dieckow et al., 2005a; Conceição et al., 2014); fato que explica maiores IMC nos sistemas conservacionistas (LAV-PD e ILP-PD, com IMC de 205 e 191 respectivamente) (Tabela 5). Essa dinâmica do C diz respeito, segundo Torn et al. (2009), aos processos que causam a estabilização e desestabilização da MOS.

Maior IMC em PD foi observado também por Campos et al. (2011) em sistemas de monocultura (IMC=140), rotação de inverno (IMC=151) e rotação intensiva (IMC=158) em Latossolo subtropical, comparado ao PC (100, 144 e 130 respectivamente). Diversos autores já concluíram que o IMC pode ser um bom indicativo da qualidade que o sistema proporciona em relação à dinâmica da MOS (Blair et al., 1995; Dieckow et al., 2005a; Nicoloso, 2005; Campos et al., 2011; Loss et al., 2011; Silva et al., 2011; Conceição et al., 2014). Portanto, pode-se dizer que o PD tem maior qualidade que o PC. E o fato do sistema ILP-PC apresentar IMC de 93 não indica que este está promovendo um impacto negativo na qualidade do solo, mas sim que esse sistema possui menos qualidade quando comparado ao ILP-PD, por exemplo.

De maneira geral, as maiores concentrações de RLS ($\text{spin g}^{-1} \text{ C}$) ocorreram no PC (Tabela 7), novamente com efeito apenas do sistema de preparo do solo; e não da ILP. Sistemas de manejo onde se tem intenso revolvimento do solo possuem compostos mais aromáticos em sua estrutura, isto é, apresentam maior grau de aromaticidade. Sistema conservacionista como o PD, em função da manutenção de resíduos de plantas resulta em solos menos humificados, com menor atuação da recalcitrância química. Carbardella & Elliot (1992) esclarecem que materiais vegetais recém-depositados sobre o solo, em início de deterioração, têm uma propensão de apresentar um menor grau de humificação aqueles em estágio avançado de degradação. Os dados coincidem com os resultados de Bayer et al (2003) onde ao comparar PD, PC e preparo reduzido (PR) em Cambissolo Húmico no Rio Grande do Sul, os autores também constataram maiores concentrações de RLS no PC ($18,33 \times 10^{17}$ spins $\text{g}^{-1} \text{ C}$) quando comparado ao PD ($15,85 \times 10^{17}$ spins $\text{g}^{-1} \text{ C}$).

A maior concentração de RLS na fração silte (Tabela 7), que está coerente com a maior relação C:N desta fração (Tabela 4), se lança a hipótese que isso seja material particulado de carvão que está contribuindo; demonstrando que esta fração apresenta um avançado grau de humificação da MOS. Este mesmo comportamento foi verificado por Bayer et al. (2003). Saab et al. (2003) ao realizar o EPR em Gleissolo concluíram a fração silte (2-20

μm) como a mais estável comparada as demais frações. De acordo com esses autores, a recalcitrância do C na fração de tamanho silte é maior que na fração argila pela sua maior resistência à ação de microrganismos decompositores. Além de que, a fração silte por possui partículas de pequenos diâmetros agregadas por substâncias cimentantes, dificilmente irá se romper com o manejo da área. O maior grau de aromaticidade do silte em PC se dá pela precedência na decomposição de materiais mais lábeis (Favoretto, 2007). Concomitante, as fortes interações organo-minerais da argila tornam essa fração estável às alterações no grau de aromaticidade da matéria orgânica. Provavelmente, a maior concentração de semiquinonas no silte, é reflexo da maior concentração de fenóis em sua estrutura. Uma distribuição seletiva de material lignificado resultante do mecanismo de recalcitrância pode ter ocorrido nesta fração.

Pérez et al. (2004) e Cardoso (2013), relatam que valores de g próximos a 2,003 expressam que os RLS provavelmente estão localizados sobre os átomos de carbono associados aos anéis aromáticos da MOS. Pode-se observar que apenas a fração silte mostrou o fator g próximo a 2,003 (Tabela 7), indicando o maior grau de aromaticidade dessa fração. O solo inteiro, fração areia + MOP e argila apresentam valores de g próximos a 2,004, mais próximos a átomos de oxigênio. Embora as linhas estreitas (Apêndice 1), nota-se presença de RLS em todas as frações físicas do solo.

5. CONCLUSÕES

Latossolo Bruno subtropical manejado sob plantio direto possui potencial de acumular carbono e nitrogênio em relação ao preparado convencionalmente; a taxas anuais que podem chegar a $1,51 \text{ Mg C ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ e $0,10 \text{ Mg N ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ até 1m de profundidade, como observado no sistema lavoura deste estudo. A mínima mobilização do solo expressou efeito positivo nos estoques de C e N das frações areia + MOP, silte e argila. As maiores concentrações de radicais livres semiquinonas foram encontradas na fração silte e nos tratamentos sob PC, indicando maior grau de aromaticidade para essas condições.

A integração lavoura-pecuária, por sua vez, não incrementou estoques de C e N no solo sob PD, mas também não diminuiu; o que não deixa de ser um resultado interessante, face a uma série de vantagens produtivas deste sistema. Além disso, a integração também não alterou as características químicas da matéria orgânica do solo, dado neste estudo pela concentração de radicais livres semiquinonas.

6. LITERATURA CITADA

ASSMANN, J.M.; ANGHINONI, I.; MARTINS, A.P.; COSTA, S.E.V.G.A.; CECAGNO, D.; CARLOS, F.S. & CARVALHO, P.C.F. Soil carbon and nitrogen stocks and fractions in a long-term integrated crop-livestock system under no-tillage in southern Brazil. *Agriculture, Ecosystems and Environment*, 190:52-59, 2014.

ALBUQUERQUE, M. A.; DIECKOW, J.; SORDI, A.; PIVA, J.T.; BAYER, C.; MOLIN, R.; PERGHER, M. & RIBEIRO-JUNIOR, P.J. Carbon and nitrogen in a Ferralsol under zero-tillage rotations based on cover, cash or hay crops. *Soil Use and Management*, 31:1-9, 2015.

BALBINOT-JUNIOR, A.A., MORAES, A., VEIGA, M., PELISSARI, A. & DIECKOW, J. Integração lavoura-pecuária: intensificação de uso de áreas agrícolas. *Ciência Rural*, 39:1925–1933, 2009.

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

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J. & CERETTA, C.A. Effect of no-till cropping systems on soil organic matter in a sandy clay loam Acrisol from Southern Brazil monitored by electron spin resonance and nuclear magnetic resonance. *Soil and Tillage Research*, 53:95-104, 2000.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L. & SAAB, S.C. Diminuição da humificação da matéria orgânica de um Cambissolo Húmico em plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 27:537-544, 2003.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J. & PAVINATO, A. Armazenamento de carbono em frações lábeis da matéria orgânica de um Latossolo Vermelho sob plantio direto. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 39:677-683, 2004.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; DIECKOW, J. & AMADO, T.J.C. C and N stocks and the role of molecular recalcitrance and organomineral interaction in stabilizing soil organic matter in a subtropical Acrisol managed under no-tillage. *Geoderma*, 133:258-268, 2006a.

BAYER, C.; MARTIN-NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A. & DIECKOW, J. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soils under no-till. *Soil & Tillage Research*, 86:237-245, 2006b.

BAYER, C.; DIECKOW, J.; AMADO, T.J.C.; ELTZ, F.L.F. & VIEIRA, F.C.B. Cover crop effects increasing carbon storage in a subtropical no-till sandy Acrisol. *Soil Science and Plant Analysis*, 4:1499-1511, 2009.

BAYER, C.; AMADO, T.J.C.; TORNQUIST, C.G.; CERRI, C.E.P.; DIECKOW, J.; ZANATTA, J.A. & NICOLOSO, R.S. Estabilização do carbono no solo e mitigação das emissões de gases de efeito estufa na agricultura conservacionista. In: KLAUBERG FILHO, O.; MAFRA, A.L. & GATIBONI, L.C., eds. *Tópicos em ciência do solo*. Viçosa, Minas Gerais, 2011. p.55-118.

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

BLAIR, G. J.; LEFROY, R. D. B. & LISLE, L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and the development of a carbon management index for agricultural systems. *Australian Journal of Agricultural Research*, 46:1459- 1460, 1995.

CAMBARDELLA, C.A. & ELLIOTT, E.T. Particulate soil organic matter changes across a grassland cultivation sequence. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 56:777-783, 1992.

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*, 35:805-817, 2011.

CARDOSO, E.M.C. Caracterização espectroscópica de substâncias húmicas de solos condicionados com subprodutos do xisto. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2013.

CAVIGLIONE, J. H.; KIIHL, L. R. B.; CARAMORI, P. H.; OLIVEIRA, D. Cartas climáticas do Paraná. Londrina: IAPAR, 2000. CD.

CERETTA, C.A. Fracionamento de N orgânico, substâncias húmicas e caracterização de ácidos húmicos de solo em sistemas de cultura sob plantio direto. 1995. 127 p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 1995.

CHRISTENSEN, B.T. Carbon in primary and secondary organomineral complexes. In: CARTER, M.R. & STEWART, B.A., eds. Structure and organic matter storage in agricultural soils. Boca Raton, CRC Press, 1996. p.97-165.

CONCEIÇÃO, P.C.; BOENI, M.; DIECKOW, J.; BAYER, C. & MIELNICZUK, J. Fracionamento densimétrico com politungstato de sódio em estudos de proteção física da matéria orgânica do solo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32:541-549, 2008.

CONCEIÇÃO, P.C.; AMADO, T.J.C.; MIELNICZUK, J. & SPAGNOLLO, E. Qualidade do solo em sistemas de manejo avaliada pela dinâmica da matéria orgânica e atributos relacionados. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 29:777-788, 2005.

CONCEIÇÃO, P.C.; BAYER, C.; DIECKOW, J. & SANTOS, D.C. Fracionamento físico da matéria orgânica e índice de manejo de carbono de um Argissolo submetido a sistemas conservacionistas de manejo. *Ciência Rural*, 44:794-800, 2014.

DIECKOW, J. Estoque e qualidade da matéria orgânica do solo em função de sistemas de culturas e adubação nitrogenada no sistema plantio direto. 2003. 164p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2003.

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

DIECKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H.; BAYER, C.; DICK, D. & KOGEL-KNABNER, I. Carbon and nitrogen stocks in physical fractions of a subtropical Acrisol as influenced by long-term no-till cropping systems and N fertilisation. *Plant and Soil*, 268:319-328, 2005b.

DIECKOW, J.; MIELNICZUK, J.; KNICKER, H.; BAYER, C.; DICK, D. P. & KOGEL-KNABNER, I. Composition of organic matter in a subtropical Acrisol as influenced by land use, cropping and N fertilization, assessed by CPMAS ¹³C NMR spectroscopy. *European Journal of Soil Science*, 56:705-715, 2005c.

D'ANDRÉA, A.F.; SILVA, M.L.N.; CURI, N. & GUILHERME, L.R.G. Estoque de carbono e nitrogênio e formas de nitrogênio mineral em um solo submetido a diferentes sistemas de manejo. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 39:179-186, 2004.

EMBRAPA, EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Manual de métodos de análise de solos. 2.ed. Rio de Janeiro, Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Embrapa Solos), 1997. 212p.

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA: EMBRAPA/Fundação ABC. Mapa do Levantamento semidetalhado de solos: Município de Castro. Castro, 2001.

FAVORETO, C. M. Caracterização da matéria orgânica humificada de um Latossolo Vermelho distrófico através da espectroscopia de fluorescência induzida por laser. 2007. 96p. Tese (Doutorado) - Universidade Estadual de Ponta Grossa, Ponta Grossa. 2007.

FERRARO, D.O & OESTERHELD, M. Effect of defoliation on Grass growth. A quantitative review. *Oikos*, 98:125-133, 2002.

FERNÁNDEZ, P.L; ALVAREZ, C.R. & TABOADA, M.A. Assessment of topsoil properties in integrated crop-livestock and continuous cropping systems under zero tillage. *Soil Research*, 49:143-151, 2011.

GARCIA-PAUSAS, J.; CASALS, P.; ROMANYÀ, J.; VALLECILLO, S. & SEBASTIÀ, M.T. Seasonal patterns of belowground biomass and productivity in mountain grasslands in the Pyrenees. *Plant Soil*, 340:315-326, 2011.

GOLÇALVES, C.N.; DALMOLIN, R.S.D.; DICK, D.P.; KNICHER, H.; KLAMT, E. & KOGEL-KNABNER, I. The effect of 10% HF treatment on the resolution of CPMAS ¹³C NMR spectra and on the quality of organic matter in Ferralsols. *Geoderma* 116:373-392, 2003.

GREGORICH, E. G.; BEARE, M. H.; MCKIM, U. F. & SKJEMSTAD, J. O. Chemical and biological characteristics of physically uncomplexed organic matter. *Soil Science Society of America Journal*, Madison, 70:975-985, 2006.

LAL, R. Soil carbon dynamics in cropland and rangeland. *Environmental Pollution*, 116:353-362, 2002.

LÓPEZ-MÁRSICO, L.; ALTESOR, A.; OYARZABAL, M.; BALDASSINI, P. & PARUELO, J.M. Grazing increases below-ground biomass and net primary production in a temperate grassland. *Plant Soil*, 392:155-162, 2015.

LOSS, A.; PEREIRA, M.G.; GIÁCOMO, S.G.; PERIN, A. & ANJOS, L.H.C. Agregação, carbono e nitrogênio em agregados do solo sob plantio direto com integração lavoura-pecuária. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 46:1269-1276, 2011.

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

MARTIN-NETO, L.; ANDRIULO, A.E. & TRAGHETTA, D.G. Effects of cultivation on ESR spectra of organic matter from soil size fractions of a Mollisol. *Soil Science*, 157:365-372, 1994.

MARTIN-NETO, L.; ROSELL, R. & SPOSITO, G. Correlation of spectroscopic indicators of humification with mean annual rainfall along a temperate grassland climosequence. *Geoderma*, 81:305-311, 1998.

NICOLOSO, R.S. Dinâmica da matéria orgânica do solo em áreas de integração lavoura-pecuária sob sistema plantio direto. 2005. 149 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria. 2005.

NICOLOSO, R.S.; LOVATO, T.; AMADO, T.J.C.; BAYER, C. & LANZAVONA, M.E. Balanço do carbono orgânico no solo sob integração lavoura-pecuária no Sul do Brasil. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 32:2425-2433, 2008.

OADES, J.M., & A.G. WATERS. Aggregate hierarchy in soils. *Australian Journal of Soil Research*, 29:815–828, 1991.

PÉREZ, M.G.; MARTIN-NETO, L.; SAAB, S.C.; NOVOTNY, E.H.; MILORI, D.M.B.P.; BAGNATO, V.S.; COLNAGO, L.A.; MELO, W.J. & KNICKER, H. Characterization of humic acids from a Brazilian Oxisol under different tillage systems by EPR, ¹³C NMR, FTIR and fluorescence spectroscopy. *Geoderma*, 18:181-190, 2004.

PIVA, J.T. Fluxo de gases de efeito estufa e estoque de carbono do solo em sistemas integrados de produção no sub trópico brasileiro. 2012. 96p. Tese (Doutorado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2012.

PIVA, J.T.; DIECKOW, D.; BAYER, C.; ZANATTA, J.A.; MORAES, A.; PAULETTI, V.; TOMAZI, T. & PERGHER, M. No-till reduces global warming potential in a subtropical Ferralsol. *Plant and Soil*, 361:359-373, 2012.

PIVA, J.T. Emissão de óxido nitroso e metano em um Latossolo Bruno submetido a sistemas de preparo e integração lavoura-pecuária. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba. 2010.

R Development Core Team (2008) R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

REIS, C.E.S.; DICK, D.P.; CALDAS, J.S. & BAYER, C. Carbon sequestration in clay and silt fractions of Brazilian soils under conventional and no-tillage systems. *Scientia Agricola*, 71:292-301, 2014.

SAAB, S.C. & MARTIN-NETO, L. Use of the EPR technique to determine thermal stability of some humified organic substances found in soil organic-mineral fractions. *Química nova*, 26:497-498, 2003.

SALTON, J.C. Matéria orgânica e agregação do solo na rotação lavoura-pastagem em ambiente tropical. 2005. 158p. Tese (Doutorado) - Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre. 2005.

SALTON, J.C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; FABRICIO, A.C.; MACEDO, M.C.M.; BROCH, D.L.; BOENI, M. & CONCEIÇÃO, P.C. Matéria orgânica do solo na interação lavoura-pecuária em Mato Grosso do Sul. Dourados, Embrapa Agropecuária Oeste, 2005. 58p. (Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 29).

SANTOS, D.C.; PILLON, C.N.; FLORES, C.A.; LIMA, C.L.R.; CARDOSO, E.M.C.; PEREIRA, B.F. & MANGRICH, A.S. Agregação e frações físicas da matéria orgânica de um Argissolo Vermelho sob sistemas de uso no bioma Pampa. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 35:1735-1744, 2011.

SCHMIDT, M.W.I.; KINICKER, H.; HATCHER, P.G. & KÖGEL-KNABNER, I. Improvement of ^{13}C and ^{15}N CPMAS NMR spectra of bulk soils, particle size fractions and

organic material by treatment with 10% hydrofluoric acid. *European Journal of Soil Science*, 48:319-328, 1997.

SILVA, E.F.; LOURENTE, E.P.R.; MARCHETTI, M.E.; MARCANTE, F.M.; FERREIRA, A.K.T. & FUJII, G.C. Frações lábeis e recalcitrantes da matéria orgânica em solos sob integração lavoura-pecuária. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 46:1321-1331, 2011.

SILVEIRA, P.M.; STONE, L.F.; ALVES JÚNIOR, J. & SILVA, J.G. Efeitos do manejo do solo sob plantio direto e de culturas na densidade e porosidade de um Latossolo. *Bioscience Journal*, 24:53-59, 2008.

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*, 76:39-58, 2004.

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

SIX, J.; CONANT, R.T.; PAUL, E. & PAUSTIAN, K. Stabilization mechanisms of soil organic matter: Implications for C-saturation of soils. *Plant and Soil*, 241:155-176, 2004.

SOUZA, E. D.; CARNEIRO, M. A. C.; PAULINO, H. B.; SILVA, C. A. & BUZETTI, S. Alterações nas frações do carbono em um Neossolo Quartzarênico submetido a diferentes sistemas de uso do solo. *Acta Scientiarum: Agronomy*, 28:305-311, 2008.

SOUZA, E.D. de; COSTA, S.E.V.G. de A.; ANGHINONI, I.; CARVALHO, P.C. de F.; ANDRIGUETI, M. & CAO, E. Estoques de carbono orgânico e de nitrogênio no solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto, submetido a intensidades de pastejo. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 33:1829-1836, 2009.

TORN, M. S., SWANSTON, C. W., CASTANHA, C. & TRUMBORE, S. E. Storage and turnover of natural organic matter in soil. In: SENESI, N.; XING, B. & HUANG, P.M., eds.

Biophysico-chemical processes involving natural nonliving organic matter in environmental systems. New Jersey, USA, 2009. p.215-268.

TONUCCI, R.G.; NAIR, P.K.R.; NAIR, V.D.; GARCIA, R. & BERNARDINO, F.S. Soil carbon storage in silvopasture and related land-use systems in the Brazilian Cerrado. *Journal of Environmental Quality*, 40:833-841, 2011.

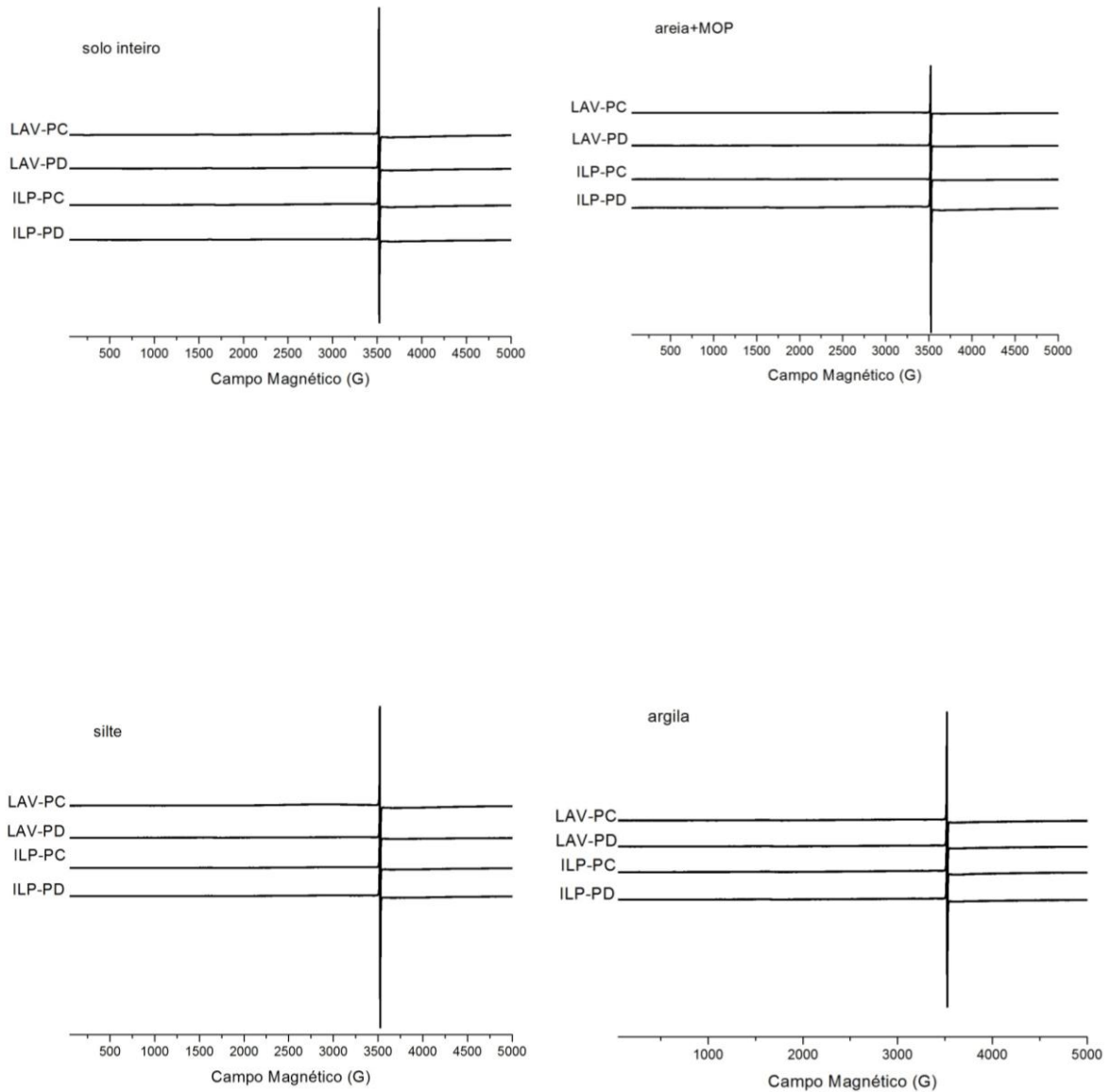
TORNQUIST, C.G.; GASSMAN, P.W.; MIELNICZUK, J.; GIASSON, E. & CAMPBELL, T. Spatially explicit simulations of soil C dynamics in Southern Brazil: Integrating century and GIS with i_Century. *Geoderma*, 150:404-414, 2009.

VIEIRA, F.C.B.; BAYER, C.; ZANATTA, J.A.; DIECKOW, J.; MIELNICZUK, J. & HE, Z.L. Carbon management index based on physical fractionation of soil organic matter in an Acrisol under long-term no-till cropping systems. *Soil & Tillage Research*, 96:195-204, 2007.

ZANATTA, J.A & SALTON, J.C. Soil carbon sequestration affected by no-tillage and integrated crop-livestock systems in Midwestern Brazil. In: 19th World Congress of Soil Science, *Soil Solutions for a Changing World [DVD]*; 1-6 ago 2010. Brisbane. Australia: 2010.

WINCK, B.R.; VEZZANI, F.M.; DIECKOW, J.; FAVARETTO, N. & MOLIN, R. Carbono e nitrogênio nas frações granulométricas da matéria orgânica do solo, em sistemas de culturas sob plantio direto. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 38:980-989, 2014.

7. APÊNDICES



APÊNDICE 1. Espectros de ressonância paramagnética eletrônica (EPR) do solo inteiro e frações areia+MOP, silte e argila da camada de 0-5 cm de Latossolo Bruno sob lavoura em preparo convencional (LAV-PC), lavoura em plantio direto (LAV-PD), integração lavoura-pecuária em preparo convencional (ILP-PC) e integração lavoura-pecuária em plantio direto (ILP-PD). Castro-PR.



APÊNDICE 2. Vista da área experimental (A). Perda do volume de solo do PC em comparação ao PD (B). Trincheira aberta até 30 cm com o jogo de gabaritos de metal (C). Trincheira aberta até 1 m de profundidade com o auxílio do trado rosca (D).



APÊNDICE 3. Sonicação das amostras de solo a 900 J mL^{-1} (A). Sedimentação do silte calculada pela Lei de Stokes (B). Sifonamento da argila e seu armazenamento em galões de 5 litros (C). Secagem da fração de tamanho argila em estufa a $45 \text{ }^\circ\text{C}$ (D).