



UNIVERSIDADE
ESTADUAL DE LONDRINA

TITO LÍVIO DA LUZ STELMACHUK

**CARBONO E RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE UM
LATOSSOLO VERMELHO SUBMETIDO AO SPD**

TITO LÍVIO DA LUZ STELMACHUK

**CARBONO E RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE UM
LATOSSOLO VERMELHO SUBMETIDO AO SPD**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Agronomia.

Orientador: Prof. Dr. Ricardo Ralisch

Londrina
2015

Ficha de identificação da obra elaborada pelo autor, através do Programa de Geração Automática do Sistema de Bibliotecas da UEL

Stelmachuk, Tito Lívio da Luz .

Carbono e resistência à penetração de um Latossolo Vermelho submetido ao SPD / Tito Lívio da Luz Stelmachuk. - Londrina, 2015.
54 f. : il.

Orientador: Ricardo Ralisch.

Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Estadual de Londrina, Centro de Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Agronomia, 2015.

Inclui bibliografia.

1. Carbono lábil - Teses. 2. Penetrometria - Teses. 3. Gases do efeito estufa - Teses. 4. Urochloa ruziziensis - Teses. I. Ralisch, Ricardo . II. Universidade Estadual de Londrina. Centro de Ciências Agrárias. Programa de Pós-Graduação em Agronomia. III. Título.

TITO LÍVIO DA LUZ STELMACHUK

**CARBONO E RESISTÊNCIA À PENETRAÇÃO DE UM LATOSSOLO
VERMELHO SUBMETIDO AO SPD**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia, da Universidade Estadual de Londrina, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Agronomia.

BANCA EXAMINADORA

Orientador Prof. Dr. Ricardo Ralisch
Universidade Estadual de Londrina - UEL

Dr. Henrique Debiasi
Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária -
EMBRAPA SOJA/Londrina

Prof. Dr. Esmael Lopes dos Santos
Centro Universitário Filadélfia – UNIFIL

Londrina, 23 de fevereiro de 2015.

Dedico este trabalho à minha querida
Marisa e aos nossos filhos Pedro e
Paula.

AGRADECIMENTOS

À Deus.

Aos meus pais Pedro (in memorian) e Astréa (in memorian).

Aos meus irmãos Pedro, Rubens, Stela, Regina, Maris, Lúcio, Maria Aparecida e Aná e todos os meus familiares que sempre estiveram comigo.

Aos familiares da Marisa.

Ao grande amigo e orientador Prof. Dr. Ricardo Ralisch.

Ao Dr. Henrique Debiasi (EMBRAPA), Prof. Dr. Esmael Lopes dos Santos (UNIFIL), Prof. Dra. Maria de Fátima Guimarães (UEL) e Prof. Dra. Graziela Moraes de Cesare Barbosa (IAPAR) pela disposição, colaboração e sugestões na banca avaliadora.

À Profa. Dra. Inês Fonseca (UEL) e ao Dr. Nelson Fonseca Júnior (IAPAR) pelo auxílio na estatística.

Aos professores e funcionários do departamento de Agronomia da UEL e do programa de pós-graduação em Agronomia.

Aos meus amigos Agro 792 e aos meus amigos do grupo do ECC pelo companheirismo e incentivo.

Aos colegas da pós-graduação, ao professor Dr. Osmar Rodrigues Brito e toda equipe do Laboratório de Solos da UEL, ao professor Dr. Cássio Egídio Prete e toda equipe da Fazenda Escola da UEL.

À CAPES pelo apoio financeiro

Às estagiárias Ana Carolina Coqueiro e Maely Kawana dos Santos.

Aos amigos Mario César Garms Thimóteo, João Bersi e Rodrigo Cornacini Ferreira por serem grandes incentivadores.

Ao amigo Rubson (EMBRAPA) pela boa vontade demonstrada no auxílio na confecção dos gráficos.

Ao IAPAR, em especial ao amigo Altair Sebastião Dorigo, e à EMBRAPA pelo disponibilização da estrutura e da biblioteca quando necessitei.

Aos companheiros do cafezinho diário (ou quase), Cláudio e Fábio.

Aos meus queridos filhos Pedro e Paula pela ajuda nas coletas de amostra no campo e nas análises laboratoriais.

À minha querida Marisa.

E mais uma vez, aos queridos Pedro, Paula e Marisa pela força, incentivo, paciência e por sempre acreditarem em mim, mesmo nos momentos em que eu mesmo tive dúvidas.

STELMACHUK, Tito Lívio da Luz. **Carbono e resistência à penetração de um Latossolo Vermelho submetido ao SPD**. 2015. 54f. Dissertação (Mestrado em Agronomia) – Universidade Estadual de Londrina, Londrina, 2015.

RESUMO

O desafio brasileiro é a prática de uma agricultura eficiente, rentável e sustentável, com o uso racional dos recursos naturais e sequestro de carbono para minimizar as emissões de gases de efeito estufa. O ciclo do carbono indica que o solo é um importante reservatório deste elemento e as raízes das plantas têm um papel importante no seu aporte. O objetivo deste trabalho foi quantificar os teores de carbono orgânico e a resistência à penetração de um Latossolo Vermelho sob diferentes sucessões de culturas durante a fase inicial do Sistema Plantio Direto. O experimento foi conduzido na Fazenda Escola da Universidade Estadual de Londrina, com oito tratamentos e seis repetições em blocos casualizados, onde foram avaliadas oito sucessões da soja no verão com milho, trigo, canola, milho + ruziziensis, aveia, nabo, ruziziensis e pousio no inverno. Foram analisados os teores de carbono orgânico total, lábil e residual (por diferença), matéria orgânica e capacidade de troca catiônica, nas profundidades de 0,00-0,05 m, 0,05-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m, após o terceiro ano das sucessões. Os dados de penetrometria foram obtidos no quarto ano das sucessões, até a profundidade de 0,80 m. Os teores de carbono orgânico total, matéria orgânica, carbono lábil e capacidade de troca catiônica decresceram com o aumento da profundidade e o carbono residual aumentou da camada superficial para a segunda profundidade e em seguida decresceu. Ocorreu diferença estatística pelo teste de Tukey a 5% para carbono orgânico total e matéria orgânica entre os tratamentos com soja/milho (9,74 g kg⁻¹ e 16,80 g kg⁻¹ respectivamente) e soja/ruziziensis (9,22 g kg⁻¹ e 15,90 g kg⁻¹ respectivamente), ambos em relação ao tratamento com soja/canola (5,71 g kg⁻¹ e 9,85 g kg⁻¹ respectivamente) apenas na profundidade de 0,20 a 0,40 m. Em curtos períodos de observação não é possível verificar diferenças de acúmulo de carbono entre os diversos tratamentos. A maior resistência do solo à penetração na profundidade de 0,10-0,20 m indica que a fase inicial do SPD é a mais crítica para este parâmetro.

Palavras-chave: Carbono lábil. Penetrometria. Gases do efeito estufa. *Urochloa ruziziensis*.

STELMACHUK, Tito Lívio da Luz. **Carbon and penetration resistance of an Oxisol submitted to the SPD**. 2015. 54p. Dissertation (Master's Degree in Agronomy) – State University of Londrina, Londrina, 2015.

ABSTRACT

The Brazilian challenge is to practice an efficient, profitable and sustainable agriculture, with the rational use of natural resources and carbon sequestration to minimize emissions of greenhouse gases. The carbon cycle indicates that the soil is an important reservoir of the element and the roots of plants plays an important role in their uptake. The objective of this study was to quantify carbon content and penetration resistance of an Oxisol under different crop sequences during the initial phase of the No-Tillage System. The experiment was conducted at the School Farm of the State University of Londrina, with eight treatments and six replications in randomized blocks, were evaluated eight succession with soybean in summer and corn, wheat, canola, corn + ruziziensis, oats, turnips, ruziziensis and fallow in the winter. The levels of total organic, labile and residual (by difference) carbon, organic matter and cation exchange capacity at depths of 0.00-0.05 m, 0.05-0.10 m, 0.10-0.20 m 0.20-0.40 m were analyzed after third year of succession. The penetrometer data were obtained in the fourth year of succession, to a depth of 0.80 m. The total organic carbon, organic matter, labile carbon and cation exchange capacity decreased with increased depth and increased residual carbon from the surface layer to the second depth and then decreased. Statistical difference at 5% Tukey test for total organic carbon and organic matter between treatments with soybean/corn (9.74 g kg⁻¹ and 16.80 g kg⁻¹, respectively) and soybean/ruziziensis (9.22 g kg⁻¹ and 15.90 g kg⁻¹, respectively), both in relation to treatment with soybean/canola (5.71 g kg⁻¹ and 9.85 g kg⁻¹, respectively) only at a depth of 0.20-0.40 m. In short periods of observation carbon accumulation can't be verified between the treatments. Most soil resistance observed in the 0.10-0.20 m layer indicates that the initial phase of the No-Tillage System adoption is the most critical.

Keywords: Labile carbon. Soil resistance. Greenhouse gases. *Urochloa ruziziensis*.

LISTA DE TABELAS

| | |
|--|----|
| Tabela 1 – Nomeclatura e legenda dos tratamentos..... | 23 |
| Tabela 2a – Valores médios das características químicas em profundidade dos solos da área experimental e da mata de referência..... | 26 |
| Tabela 2b – Valores médios das características químicas em profundidade dos solos da área experimental e da mata de referência..... | 26 |
| Tabela 3 – Teores de carbono orgânico total (COT) no solo em diversas sucessões de culturas em um Latossolo Vermelho .. | 32 |
| Tabela 4 – Teores de carbono lábil (CL) no solo em diversas sucessões de culturas em um Latossolo Vermelho.. | 34 |
| Tabela 5 – Teores de carbono residual (CR) no solo em diversas sucessões de culturas em um Latossolo Vermelho . | 35 |
| Tabela 6 - Índice de manejo de carbono (IMC) no solo em diversas sucessões de cultura em um Latossolo Vermelho .. | 36 |
| Tabela 7 – Teores de matéria orgânica (MO) no solo em diversas sucessões de culturas em um Latossolo Vermelho . | 37 |
| Tabela 8 – Capacidade troca catiônica efetiva para diversas sucessões de cultura em Latossolo Vermelho..... | 39 |
| Tabela 9 - Resistência do solo à penetração (RSP) para diversas sucessões de culturas em um Latossolo Vermelho .. | 43 |
| Tabela 10 – Umidade do solo expressa em percentagem de massa, desvio padrão das médias das umidades e coeficiente de variação .. | 46 |

SUMÁRIO

| | | |
|----------|---|-----------|
| 1 | INTRODUÇÃO GERAL | 10 |
| 2 | REVISÃO DE LITERATURA | 13 |
| 2.1 | O BRASIL AGRÍCOLA | 13 |
| 2.2 | OS GASES DO EFEITO ESTUFA E O AQUECIMENTO GLOBAL | 14 |
| 2.3 | O FLUXO DE CARBONO E A MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO..... | 15 |
| 2.4 | DEGRADAÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA E A COMPACTAÇÃO DO SOLO..... | 17 |
| 2.5 | O SISTEMA PLANTIO DIRETO | 19 |
| 2.6 | ROTAÇÃO E SUCESSÃO DE CULTURAS E PLANTAS DE COBERTURA DO SOLO | 20 |
| 3 | MATERIAL E MÉTODOS | 22 |
| 3.1 | LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DA ÁREA DO EXPERIMENTO..... | 22 |
| 3.2 | DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS | 22 |
| 3.3 | AMOSTRAGEM DO SOLO | 24 |
| 3.4 | PREPARO DAS AMOSTRAS | 24 |
| 3.5 | ANÁLISES DE SOLO E SUA CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA..... | 24 |
| 3.6 | CÁLCULO DO ÍNDICE DE MANEJO DE CARBONO..... | 27 |
| 3.7 | ANÁLISE ESTATÍSTICA | 27 |
| 3.8 | RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO | 27 |
| 3.9 | UMIDADE DO SOLO..... | 28 |
| 4 | ARTIGO A: CARBONO ORGÂNICO APÓS TRÊS ANOS DE SUCESSÃO SOJA E CULTURAS DE INVERNO EM SISTEMA PLANTIO DIRETO | 29 |
| 4.1 | RESUMO | 29 |
| 4.2 | ABSTRACT..... | 30 |
| 4.3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 31 |
| 4.4 | CONCLUSÃO..... | 39 |

| | | |
|----------|---|-----------|
| 5 | ARTIGO B: RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO EM DIFERENTES SUCESSÕES DE CULTURAS NA FASE INICIAL DO SISTEMA PLANTIO DIRETO | 40 |
| 5.1 | RESUMO | 40 |
| 5.2 | ABSTRACT..... | 41 |
| 5.3 | RESULTADOS E DISCUSSÃO | 42 |
| 5.4 | CONCLUSÃO..... | 46 |
| 6 | CONSIDERAÇÕES FINAIS | 47 |
| | REFERÊNCIAS | 48 |

1 INTRODUÇÃO GERAL

O Brasil é o quinto país do mundo em extensão territorial (851,5 milhões de hectares), está situado em uma região de alta incidência de radiação solar, apresenta chuvas abundantes na maioria do seu território, possui grandes mananciais hídricos em todas as regiões, não apresenta temperaturas extremas e tem solos com relevos predominantemente favoráveis.

A interação destes fatores faz do Brasil um país com grande potencial de produção agrícola. Embora apenas pouco mais de 7% do seu território seja ocupado por culturas anuais, o país se coloca entre os maiores produtores de grãos do mundo, com destaque para produção de soja que ocupa mais da metade desta área.

A derrubada de matas nativas para introdução da agricultura causa diversas alterações no ambiente, principalmente no solo, devido às perturbações decorrentes dos diversos tipos de manejo. Estas alterações também afetam o equilíbrio do ciclo do carbono, já que o solo é o principal reservatório de carbono do ciclo terrestre.

O aquecimento global, causado pelo aumento da concentração dos gases do efeito estufa (GEE) na atmosfera, é uma das consequências do desequilíbrio do ciclo do carbono. O dióxido de carbono (CO_2) é o principal destes gases, e boas práticas devem ser adotadas em todos os setores produtivos para mitigar as suas emissões, o mesmo valendo para emissões de óxido nitroso (N_2O), gás metano (CH_4) e demais GEE.

O desafio da agricultura brasileira é ser eficiente, rentável, conservacionista e sustentável, usando racionalmente os recursos da natureza. Um dos indicadores para tal eficiência é a capacidade de fixar carbono (C) no solo, promovendo seu sequestro da atmosfera.

O Plano Setorial de Mitigação e de Adaptação às Mudanças Climáticas para a Consolidação de uma Economia de Baixa Emissão de Carbono na Agricultura (plano ABC), do Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento (MAPA), estimula e financia a prática de técnicas agrícolas capazes de mitigar as emissões dos GEE, mantendo o C fixado no solo. As principais tecnologias do plano ABC são: recuperação de pastagens degradadas, integração lavoura-pecuária-

floresta (ILPF), Sistema Plantio Direto (SPD), fixação biológica de nitrogênio (FBN), florestas plantadas e tratamento de dejetos animais.

Diferentes tipos de manejo agrícola do solo podem aumentar ou diminuir os estoques de C no solo, sendo desejável a adoção de manejos conservacionistas, capazes de mitigar emissões de CO₂, sequestrando C, aumentando seu estoque no solo e gerando uma agricultura sustentável.

SPD é a base de um manejo conservacionista, pautado no mínimo revolvimento do solo, na manutenção permanente de cobertura e na rotação de culturas.

A rotação de culturas pode ser entre culturas com valor comercial ou entre estas e plantas de cobertura, também chamadas de adubos verdes, desde que a fitomassa produzida pela parte aérea e pelas raízes das plantas seja suficiente para manter a superfície coberta e para aportar grande quantidade de C ao solo, melhorando as características físicas do solo, entre elas, a diminuição da resistência à penetração das raízes.

As várias espécies de plantas de cobertura do solo apresentam diferentes sistemas radiculares, que exploram diferentes profundidades do solo, utilizam e reciclam variadas quantidades e tipos de nutrientes, distribuem fitomassa radicular (carbono orgânico) de maneira diversa no perfil do solo, além de proteger a superfície com a fitomassa da parte aérea. A ação de todos estes atributos leva à melhoria da qualidade do solo, o que torna conveniente a utilização destas plantas em rotações ou sucessões com culturas de valor comercial no SPD.

Baseado nas hipóteses de que o SPD com sucessão entre plantas de valor comercial e plantas de cobertura do solo possa elevar os teores de C no solo, manter o solo com cobertura permanente e diminuir a resistência do solo à penetração das raízes, foi implantado na Fazenda Escola da Universidade Estadual de Londrina (FEUEL), em Londrina – PR, num Latossolo Vermelho (SANTOS et al., 2013) um experimento com oito sucessões entre culturas comerciais e plantas de cobertura, sob SPD.

As avaliações realizadas levaram à elaboração de dois artigos, formato sugerido pelo Programa de Pós-Graduação em Agronomia da UEL, com os seguintes objetivos: artigo A) quantificar os teores de carbono de um Latossolo Vermelho, em oito diferentes sucessões de culturas no SPD, visando determinar as sucessões mais eficientes no sequestro de C; artigo B) avaliar a resistência do solo

à penetração (RSP), relacionando-a com a umidade e com cada uma das oito sucessões de culturas.

O título do artigo A é Carbono orgânico após três anos de sucessão soja e culturas de inverno em sistema plantio direto e do artigo B é Resistência do solo à penetração em diferentes sucessões de culturas na fase inicial do sistema plantio direto.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 O BRASIL AGRÍCOLA

O Brasil ocupa uma área de 851.576.704,90 hectares (IBGE, 2012), o que o coloca como o quinto maior país do mundo em extensão territorial (FRANCISCO, 2014).

Pela grande extensão territorial e pelas boas condições edafoclimáticas, o Brasil apresenta, desde o período colonial, grande vocação para agricultura. Nos séculos XVI e XVII ocorreu o ciclo econômico da cana-de-açúcar (MARANGONI, 2011), entre 1800 e 1930 aconteceu o ciclo do café (BIANCHI, 2012), e de 1970 até os dias de hoje vivemos o ciclo da soja (FREITAS, 2014). Além destes, houveram outros ciclos extrativistas como o ciclo do pau-brasil nas regiões Nordeste e Sudeste, o ciclo da borracha na região Norte e o ciclo da erva-mate no Paraná. Estes ciclos sempre favoreceram um setor em detrimento de outros, dando origem a poderosas oligarquias com grande força política, que depois da proclamação da república sustentavam os governos através do voto de cabresto (BIANCHI, 2012).

Atualmente cerca de 7% do território nacional é ocupado para produção de grãos (CONAB, 2015), sendo que pouco mais da metade desta área (55%) é ocupada por soja (MAPA, 2015).

O grande incremento na área de produção de grãos se deu a partir de 1970, alavancado principalmente pela expansão da área de soja, que até 1985 se deu principalmente pela substituição de culturas perenes e de subsistência na região Sul e abertura de novas áreas no Centro-Oeste (HIRAKURI; LAZZAROTTO, 2011). Após 1985, a expansão da agricultura vem ocorrendo predominantemente sobre áreas de pastagem degradada (HIRAKURI; LAZZAROTTO, 2011).

Hirakuri e Lazzarotto (2011) mostram que no período compreendido entre as safras 1985/86 e 2010/11 a área de soja no Brasil aumentou em 2,52 vezes, enquanto que a produção aumentou em 5,7 vezes, destacando grande incremento na produtividade. A mesma tendência foi apresentada para grãos em geral, pois nos últimos 25 anos a área cultivada aumentou em 1,53 vezes enquanto a produção aumentou 3,49 vezes (CONAB, 2015).

Parte deste salto de produtividade se deve a avanços científicos e tecnológicos em manejo e conservação do solo (DEBIASI et al., 2013), já que nos anos 70 e 80 do século passado, o manejo inadequado era um dos principais problemas ligados à soja no Sul do Brasil, na época, a maior região produtora.

As principais regiões produtoras de grãos do Brasil são Centro-Oeste e Sul, e os principais estados produtores são Mato Grosso e Paraná (CONAB, 2015).

Atualmente, o Brasil é responsável por 10,17% da produção mundial de grãos, o que o consolida como um dos maiores países produtores (CAETANO, 2014). Nos últimos 20 anos, o produto interno bruto (PIB) de origem agropecuária representou, em média, 23,83% do PIB nacional (CEPEA, 2014).

2.2 OS GASES DO EFEITO ESTUFA E O AQUECIMENTO GLOBAL

Alguns gases presentes na atmosfera permitem a passagem da radiação solar, porém retêm parte da radiação emitida pela Terra aquecida e isto ocasiona uma temperatura mais elevada e mais estável na baixa atmosfera e na superfície terrestre, evitando grandes oscilações entre o dia e a noite (XAVIER; KERR, 2004). Este fenômeno é chamado de efeito estufa, que permite a vida no planeta, na forma como conhecemos.

Os principais GEE são: vapor d'água (H_2O), gás metano (CH_4), óxido nitroso (N_2O) e dióxido de carbono (CO_2) (SILVA; PAULA, 2009). Tomando o potencial de aquecimento do CO_2 como referência, tem-se o potencial de aquecimento 21 e 310 vezes maior para CH_4 e N_2O respectivamente (WATSON; ZINYOWERA; MOSS, 1997).

A queima de combustíveis fósseis que se elevou exponencialmente após a revolução industrial (uso de carvão) e a derrubada de florestas nos séculos XIX e XX alterou o ciclo terrestre do carbono aumentando consideravelmente os níveis de CO_2 na atmosfera. Os níveis de CH_4 e N_2O também se elevaram devido a práticas antrópicas. A somatória destes fatos potencializou o efeito estufa provocando o aquecimento global (GAUDARD, 2006).

A intensificação da agricultura com manejos inadequados do solo também é responsável por parte das emissões dos GEE, o que torna o Brasil um dos grandes emissores. Porém, estes fatos abrem grandes oportunidades para a

criação e utilização de práticas e tecnologias mitigadoras destes gases na agricultura (BRANDÃO et al., 2012).

2.3 O FLUXO DE CARBONO E A MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO

Apenas 0,06% do C do planeta Terra estão nos reservatórios atmosfera, oceanos e biosfera terrestre. Os 99,94% restantes estão geologicamente estocados. As trocas de C ocorridas entre os três reservatórios (atmosfera, oceanos e biosfera terrestre) são conhecidas como ciclo biogeoquímico do carbono (PACHECO; HELENE, 1990).

O C trocado entre um reservatório e outro por unidade de tempo devido ao ciclo biogeoquímico é chamado de fluxo de carbono (PACHECO; HELENE, 1990).

O solo é o maior reservatório de C da biosfera terrestre, onde está localizada a matéria orgânica do solo (MOS). A MOS é toda matéria, viva ou morta, de origem animal ou vegetal, em variados graus de decomposição, composta por C orgânico (PRIMO; MENEZES; SILVA, 2011). A MOS apresenta em sua composição 58% de C orgânico (BRUNETTO et al., 2006).

O C orgânico formador da MOS é originado do CO₂ atmosférico, que forma a biomassa através do processo de fotossíntese realizado pelos seres autotróficos (plantas). A atividade fotossintética das plantas depende da energia luminosa (sol), umidade (H₂O), temperatura, nutrientes, entre outros fatores, sendo mais intensa no verão e na primavera (PACHECO; HELENE, 1990). Durante o processo fotossintético, ocorre a formação de tecidos que fixam o C na fitomassa. A respiração das plantas e dos seres heterotróficos oxida o C devolvendo-o para atmosfera em forma de CO₂. A fotossíntese sequestrando C atmosférico e a respiração da biota devolvendo o CO₂ para a atmosfera são os principais processos que garantem o fluxo de C entre a biosfera terrestre e a atmosfera (PACHECO; HELENE, 1990).

A MOS é fracionada em matéria macrororgânica, que são resíduos orgânicos em diferentes estádios de decomposição, e matéria orgânica humificada, quando não mais se reconhece a origem do material. A matéria orgânica humificada é dividida em substância não húmicas (lipídios, proteínas, ácidos orgânicos de baixo peso molecular) e substâncias húmicas (SH) (BUSATO, 2009). As SH por sua vez

se fracionam em fração ácidos fúlvicos (FAF), fração ácidos húmicos (FAH) e fração huminas (FHU).

A FAF apresenta cadeias carbônicas relativamente pequenas, portanto possui baixo peso molecular, concentrando os grupos carboxílicos, potencializando a polaridade das moléculas, tornando-a mais reativa, mais solúvel e mais móvel no solo (SILVA; MENDONÇA, 2007).

A solubilização da FAF se dá em meio alcalino e em meio levemente ácido (PRIMO; MENEZES; SILVA, 2011). Apresenta cor clara e dentre as SH, a FAF é a menos resistente à decomposição microbiana.

A FAH apresenta cadeias de tamanho intermediário entre a FAF e a FHU, portanto o peso molecular é maior do que o da FAF, o que a torna menos solúvel e mais resistente à decomposição microbiana. A FAH é insolúvel em meio ácido e solúvel em meio alcalino. A coloração é escura (acinzentada). É menos ácida do que a FAF, provavelmente por possuir relativamente menos grupos carboxílicos (PRIMO; MENEZES; SILVA, 2011).

A FHU é altamente estável, pouco reativa, provavelmente pela hidrofobicidade e pela interação com componentes inorgânicos. Possui elevada massa molecular, apresenta cor escura (preta), é insolúvel tanto em meio ácido como em meio alcalino e é extremamente resistente à decomposição microbiana (PRIMO; MENEZES; SILVA, 2011).

A MOS é composta por 58% de carbono orgânico, conforme já visto anteriormente, e o carbono orgânico total (COT) pode ser dividido em carbono lábil (CL), presente nas frações da matéria orgânica de menor peso molecular e mais facilmente degradáveis e carbono resistente (CR), presente nas frações da matéria orgânica de maior peso molecular e menos susceptíveis aos processos de degradação.

O CL permanece por pouco tempo no solo devido à elevada taxa de decomposição, e tem como função principal o fornecimento de nutrientes às plantas através da mineralização por micorganismos (SILVA; MENDONÇA, 2007; SILVA et al., 2011).

A principal função do CR é a ação sobre as condições químicas e físicas do solo, além de atuar no sequestro de carbono, pela sua maior permanência no solo (SILVA; MENDONÇA, 2007; SILVA et al., 2011).

Alguns fatores afetam o acúmulo de MOS, como: textura do solo, maior ou menor presença de agregados, aporte de C e qualidade dos resíduos vegetais.

Solos com textura argilosa tendem a possuir maior agregação, e os agregados do solo protegem a MOS, dificultando a sua mineralização (DIEKOW, 2003), portanto, solos argilosos acumulam mais MOS do que solos de textura arenosa.

O acúmulo de MOS será tanto maior, quanto maior for o aporte de C via resíduos vegetais e quanto maior for a relação C/N destes resíduos (DIEKOW, 2003).

2.4 DEGRADAÇÃO DA MATÉRIA ORGÂNICA E A COMPACTAÇÃO DO SOLO

A MOS é indicador de qualidade do solo, pois é sensível ao manejo, é fonte de nutrientes, além de influenciar em atributos físicos do solo como infiltração e retenção de água, friabilidade, estabilidade dos agregados, estruturação, resistência à erosão, entre outros (CONCEIÇÃO et al., 2005).

A friabilidade é o intervalo de umidade compreendido entre os limites de contração e plasticidade, e é esta a faixa de umidade ideal para as intervenções mecanizadas de preparo do solo. A diminuição dos teores de MOS em áreas agrícolas reduz o limite da plasticidade do solo, e conseqüentemente, a faixa de friabilidade, o que aumenta a possibilidade de ocorrência da compactação (SILVA; CABEDA; CARVALHO, 2006). Nestes casos, a compactação do solo ocorre mesmo quando o tráfego de máquinas agrícolas é realizado em baixa umidade.

A quantidade de deformação (compactação) que o solo poderá sofrer é controlado pelo fator umidade (RALISCH et al., 2008).

Manejo inadequado do solo leva à diminuição da MOS. O revolvimento intensivo acelera a decomposição da MOS, pois leva à desagregação do solo, expondo a matéria orgânica à ação dos microrganismos decompositores. Com manejos inadequados, é mais rápido perder a MOS do que acumulá-la (ALCÂNTARA; MADEIRA, 2008)

A maior estabilidade dos agregados possibilita ao solo resistir às forças que resultam em compactação. A maior ou menor agregação do solo é função de alguns atributos, entre eles o teor de MOS, visto que ocorre relação

positiva entre o diâmetro dos agregados e os teores de COT (SILVA; CABEDA; CARVALHO, 2006).

De acordo com Silva (2003), em sistemas de preparo com revolvimento excessivo de solo com gradagem e aração, ocorre compactação sub-superficial, logo abaixo da camada arável (0,20 m), conhecida como pé de arado ou pé de grade. Em SPD, a camada compactada ocorre mais próximo à superfície, entre 0,08 e 0,15 m de profundidade (SILVA, 2003 e SUZUKI, 2005).

Segundo Ralisch et al. (2008), os dois anos iniciais no SPD são críticos com relação à resistência à penetração nos estratos mais superficiais do solo.

A presença de palha sobre a superfície do solo serve como agente dissipador da energia de compactação exercida pelo tráfego de máquinas e pisoteio de animais (BRAIDA et al., 2006). Aplicando-se uma mesma energia de compactação em um solo, geralmente, quanto mais elevado for o teor de MOS, menor será a densidade máxima atingida e maior será a umidade para atingi-la (BRAIDA et al., 2006).

A compactação se dá quando o solo é comprimido e tem sua densidade aumentada em função da diminuição da porosidade total, reduzindo a disponibilidade de nutrientes, água e ar, culminando com o aumento da RSP (REINERT; COLLARES; REICHERT, 2007). Se a RSP for maior do que determinados níveis críticos, as raízes não conseguem vencer a camada compactada.

O monitoramento do grau de compactação e da localização da camada compactada normalmente é feito com penetrômetros de cone.

Esses instrumentos dividem-se em 2 grupos, conforme o tipo de penetração do cone no solo: dinâmicos e estáticos. Nos equipamentos do grupo dinâmico, a penetração ocorre em consequência de impactos causados por um corpo metálico, e as leituras são indiretas. Já, os equipamentos do grupo estático, a penetração ocorre em velocidade constante (VAZ et al., 2002).

Os penetrômetros estáticos são computadorizados, com dispositivos para coletar, interpretar e armazenar os dados. Estes podem ser de acionamento manual ou hidráulico (REINERT; COLLARES; REICHERT, 2007). Os de acionamento manual tem o inconveniente da dificuldade de manter constante a

velocidade de penetração enquanto que os de acionamento hidráulico mantêm a velocidade de penetração constante.

Segundo Tavares Filho e Ribon (2008), o monitoramento periódico da compactação através da resistência à penetração é uma maneira prática de avaliar os efeitos de diferentes manejos nas características físicas do solo e no comportamento das raízes.

A umidade do solo apresenta relação inversa com a RSP, e além do fator umidade, fatores como teor de MO, densidade, textura do solo (VAZ et al., 2002), taxa de penetração e ângulo do cone também influenciam a medida da RSP (MORAES et al., 2014).

Um levantamento de resistência à penetração com mais de 15 pontos de amostragem por talhão proporciona uma melhor representatividade da média dos resultados (TAVARES FILHO; RIBON, 2008), minimizando os efeitos da variabilidade espacial.

A falta de padronização dos métodos e dos equipamentos é uma desvantagem na determinação da RSP através da penetrometria (MORAES et al., 2014), porém, é um processo rápido, prático e de baixo custo.

2.5 O SISTEMA PLANTIO DIRETO

Solos intensamente revolvidos emitem grande quantidade de CO₂ para atmosfera pela exposição e oxidação da MOS, causando rápida diminuição dos seus teores (SILVA; LEMAINSKI; RESCK, 1994) e levando rapidamente o solo à degradação.

O SPD é um manejo conservacionista e mitigador das emissões de CO₂, pois de acordo com Campos et al. (2011), favorece o acúmulo de C nas camadas mais profundas do solo, devido à rotação de culturas.

O SPD se baseia em três princípios fundamentais para manter a sustentabilidade: mínimo revolvimento do solo, cobertura permanente do solo e rotação de culturas (FUENTES LLANILLO et al., 2010; FRANCHINI et al., 2011; DEBIASI et al., 2013).

Para Calegari et al. (2006), o SPD recupera o COT e quando complementado por rotação de culturas comerciais e plantas de cobertura do solo, o processo de acúmulo de C é acelerado. Já para Bayer e Mielniczuk (1999) a

manutenção permanente de palhada sobre o solo em SPD eleva a atividade microbiana e favorece o acúmulo superficial de MOS.

Os efeitos da compactação do solo são minimizados com a adoção do SPD devido à proteção física da superfície pela cobertura permanente, aos efeitos dos variados sistemas radiculares das culturas e ao aumento dos teores de MOS (RALISCH et al, 2008).

A recuperação do COT e o acúmulo de MOS fazem do SPD um manejo melhorador da qualidade do solo. Embora individualmente nenhum indicador possa ser conclusivo, a presença de C e da fração viva da MOS são bons indicadores de qualidade do solo (MENDES; REIS, 2010).

2.6 ROTAÇÃO E SUCESSÃO DE CULTURAS E PLANTAS DE COBERTURA DO SOLO

De acordo com Franchini et al. (2011), a rotação de culturas é a alternância de diferentes culturas na mesma estação do ano e no mesmo local em determinado espaço de tempo (ciclo). A rotação de culturas é um dos princípios fundamentais que garantem a sustentabilidade do SPD (FUENTES LLANILLO et al., 2010; FRANCHINI et al., 2011; DEBIASI et al., 2013).

A rotação de culturas comerciais com culturas destinadas à cobertura do solo em SPD é fundamental para a continuidade de sistemas de produção sustentáveis, pela reciclagem de nutrientes (BORKERT et al., 2003).

Segundo Franchini et al. (2011), sucessão de culturas é o ordenamento de duas culturas, por tempo indeterminado, ocupando a mesma área agrícola, uma em cada estação do ano.

Soja no verão e trigo no inverno é um exemplo usual de sucessão de culturas nas regiões sul e sudoeste do estado do Paraná, enquanto nas regiões norte e oeste ocorre um predomínio da sucessão soja no verão e milho no inverno (FRANCHINI et al., 2011).

Plantas de cobertura do solo ou adubo verde são espécies destinadas a manter o solo coberto, melhorar as características físicas, químicas e biológicas do solo e melhorar as condições de cultivo das espécies vegetais com valor comercial, implantadas posteriormente, na mesma área, em sistema de rotação. Estas plantas devem apresentar o maior número possível das seguintes características: 1) fácil implantação; 2) rápido desenvolvimento inicial; 3) elevada

produção de fitomassa aérea e radicular; 4) sistema radicular volumoso e agressivo; 5) suscetibilidade a pragas e doenças diferentes para quebrar o ciclo; 6) rusticidade; 7) hábito não invasor; 8) ser de fácil controle; 9) não possuir sementes com longo período de dormência (GONTIJO NETO, 2013).

O sistema radicular das plantas de cobertura favorecem, num curto prazo, a formação de agregados no solo, que se estabilizam a longo prazo pela presença de MOS, melhorando a qualidade física do solo (SOUZA; SOUZA; CARVALHO, 2014).

Culturas com sistema radicular abundante e agressivo são mais eficientes para aumentar os teores de COT e CR no solo, pois alocam maior quantidade de C fotossintetizado para as raízes (SHAMMOT; MCDONALD; BARTHOLOMEW, 1968).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 LOCALIZAÇÃO E DESCRIÇÃO DA ÁREA DO EXPERIMENTO

O estudo foi realizado em experimento situado na FEUEL (23°20'23"S e 51°12'50"O) a uma altitude de 572 m, num Latossolo Vermelho (SANTOS et al., 2013), textura muito argilosa. O clima da região, segundo a classificação climática de Köppen, é do tipo Cfa, caracterizado como clima subtropical, geadas pouco frequentes e com tendência de concentração das chuvas nos meses de verão, contudo sem estação seca definida (CAVIGLIONE et al., 2000), temperatura média anual de 21,1°C e precipitação pluviométrica anual de 1608 mm.

3.2 DELINEAMENTO EXPERIMENTAL E TRATAMENTOS

O experimento foi delineado em blocos casualizados com 8 tratamentos e 6 repetições. Cada parcela ocupou uma área de 160 m² (8 m x 20 m) e cada bloco ocupou uma área de 1.280 m² (160 m² x 8 parcelas), totalizando uma área de 7.680 m² (1.280 m² x 6 blocos).

Os tratamentos foram sucessões de soja (*Glycine max*) no verão e 7 diferentes culturas no inverno, sendo: trigo (*Triticum aestivum*), canola (*Brassica napus*), milho (*Zea mays*) e consórcio de milho (*Zea mays*) + ruziziensis (*Urochloa ruziziensis*) como culturas comerciais, e aveia preta (*Avena strigosa*), nabo forrageiro (*Raphanus sativum*), e ruziziensis (*Urochloa ruziziensis*) como culturas de cobertura de solo. Adicionalmente, um dos tratamentos foi composto por soja no verão e pousio durante o inverno. O pousio foi constituído por resteva de soja e diversas plantas infestantes, com predominância de nabo (*Raphanus sp*) e trapoeraba (*Comellina sp*).

A implantação das culturas foi realizada por semeadora tracionada por trator, no SPD, na época indicada para cada espécie, sendo que o início do experimento ocorreu com a implantação da cultura de verão (soja), em outubro de 2010. Anteriormente, a partir de 1992, foi cultivado na área, em sistema de sucessão, as culturas de soja no verão e trigo no inverno.

No tratamento com milho e ruziensiensis em consórcio, a semeadura das duas culturas foi simultânea.

Para implantação das culturas de soja, milho, nabo forrageiro, canola e ruziensiensis (consorciada ao milho) foi utilizada uma semeadora marca Vencetudo, com 6 linhas, equipada com haste sulcadora, e para implantação das culturas de aveia, trigo e ruziensiensis (semeadura solteira), uma semeadora marca Vencetudo, com 14 linhas, equipada com discos sulcadores desencontrados.

O espaçamento utilizado entre as linhas de semeadura foi de 0,45 m para soja, nabo forrageiro e canola, 0,90 m para milho e ruziensiensis (consorciada ao milho), e 0,17 m para aveia, trigo e ruziensiensis (semeadura solteira).

No verão, a soja foi adubada com 250 kg ha⁻¹ de fertilizante formulado N-P-K 00-20-20 no sulco de plantio e no inverno as culturas não receberam adubação. Os demais tratos culturais e fitossanitários ocorrem conforme as recomendações técnicas dos órgãos oficiais.

Ao final de cada safra, as culturas comerciais foram colhidas com colhedora automotriz e as espécies de cobertura do solo foram manejadas com rolo-faca.

Entre as operações de manejo das plantas de cobertura do solo com rolo-faca e da semeadura da soja foi aplicado o equivalente à 2,0 L ha⁻¹ de herbicida Glyphosate para controle de plantas infestantes e eventuais rebrotas.

Os oito tratamentos receberam nomenclatura, conforme a Tabela 1.

Tabela 1 - Nomeclatura e legenda dos tratamentos

| Tratamento | Culturas de inverno | |
|------------|-----------------------|---|
| | nome comum | nome científico |
| TRI | trigo | <i>Triticum aestivum</i> |
| CAN | canola | <i>Brassica napus</i> |
| M+R | milho + ruziensiensis | <i>Zea mays</i> + <i>Urochloa ruziensiensis</i> |
| MIL | milho | <i>Zea mays</i> |
| NAB | nabo forrageiro | <i>Raphanus sativum</i> |
| AVE | aveia preta | <i>Avena strigosa</i> |
| RUZ | ruziensiensis | <i>Urochloa ruziensiensis</i> |
| POU | pousio | |

Fonte: autoria própria.

3.3 AMOSTRAGEM DO SOLO

Foi realizada amostragem simples do solo em cada uma das 48 parcelas, nas profundidades de 0,00-0,05 m, 0,05-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m, totalizando 192 amostras simples para posterior obtenção das médias. Foram retiradas amostras simples porque as parcelas tinham tamanho reduzido e o número de repetições foi elevado. Os utensílios utilizados foram: pá reta (vanga) nas três primeiras profundidades e trado de rosca na mais profunda, para que não houvesse contaminação entre os estratos.

A retirada das amostras ocorreu após o terceiro ciclo verão-inverno, em outubro de 2013.

As amostras foram acondicionadas em sacos plásticos, identificadas e levadas ao laboratório de solos da Universidade Estadual de Londrina (UEL), onde foram preparadas e analisadas.

O laboratório da UEL se localiza no Centro de Ciências Agrárias, Campus Universitário, rodovia Celso Garcia Cid (PR-445), km 380, CEP 86.055-900, Londrina – PR.

3.4 PREPARO DAS AMOSTRAS

As amostras foram colocadas em bandejas de isopor e deixadas em ambiente seco e quente (casa de vegetação) para secar. Após secas, as amostras foram destorroadas e posteriormente tamisadas em peneira de 2,0 mm, constituindo a terra fina seca ao ar (TFSA), estando prontas para serem analisadas, conforme Silva et al. (2009) e Pavan et al. (1992).

3.5 ANÁLISES DO SOLO E SUA CARACTERIZAÇÃO QUÍMICA

As amostras de solo foram analisadas para $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$, Al^{3+} , Ca^{2+} , K^+ , P, pH CaCl_2 e pH SMP apenas para caracterização química do solo do experimento e COT e CL para o desenvolvimento da pesquisa.

Para determinação de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$, o extrator foi KCl 1N seguido de titulação com solução de EDTA 0,01M. Na determinação de Al^{3+} , o extrator também

foi KCl 1N e a titulação foi feita com NaOH 0,015N. Para determinação do Ca^{2+} , foi utilizado o mesmo extrator e a titulação foi feita com EDTA 0,0125 mol L^{-1} .

Nas análises de K^+ e P, usou-se como extrator a solução Mehlich-1 (H_2SO_4 0,025N + HCl 0,05N). A determinação do P foi através do espectrofotômetro a 630 nm e a do K^+ através do fotômetro de chama.

O pH da solução de solo em CaCl_2 0,01M foi determinado por meio de potenciômetro calibrado com as soluções tampão pH 7,0 e pH 4,0. Também foi determinado o pH em solução SMP.

Todos os procedimentos analíticos acima descritos estão de acordo com Pavan et al. (1992).

O COT foi determinado pelo método de Walkley-Black que consiste em adicionar 10 ml de $\text{K}_2\text{Cr}_2\text{O}_7$ 1N e 10 ml de H_2SO_4 concentrado na TFSA, gerando calor. Agita-se por 1 minuto e deixa esfriar por 30 minutos. Adiciona-se 50 ml de H_2O , 3 ml de H_3PO_4 e 0,5 ml do indicador Difenilamina 1%. Titula-se com FeSO_4 1N, conforme descrito por Pavan et al. (1992).

O CL foi determinado pelo método descrito por Blair, Lefroy e Lisle (1995), que consiste em sua oxidação por KMnO_4 , utilizando-se 0,5 g de TFSA, 7,5 ml de KMnO_4 0,033 mol L^{-1} , agita-se em agitador vertical por uma hora a 12 rpm, centrifuga-se por cinco minutos a 2000 rpm, pipeta-se 0,2 ml da solução sobrenadante e adiciona-se H_2O até completar o volume de 50 ml e procede-se a leitura em espectrofotômetro de 565 nm.

Pela diferença entre os teores de $\text{Ca}^{2+} + \text{Mg}^{2+}$ e de Ca^{2+} , calculou-se o teor de Mg^{2+} , pelo pH SMP consultou-se a tabela de equivalência para ($\text{H}^+ + \text{Al}^{3+}$).

Através dos teores de Ca^{2+} , Mg^{2+} , K^+ e ($\text{Al}^{3+} + \text{H}^+$), calculou-se a saturação por bases (V%), CTC a pH 7,0, CTC efetiva, Ca%, Mg%, K% e Al%.

O CR foi calculado pela diferença entre COT e CL e a MOS foi calculada pela multiplicação do COT pelo fator 1,7241, assumindo que a MOS é composta por 58% de C, conforme Brunetto et al. (2006).

Apenas como referencial, todas as análises químicas realizadas no experimento também foram realizadas no solo de um remanescente de mata nativa, localizada próximo ao local do experimento (Tabelas 2a e 2b).

Tabela 2a: Valores médios das características químicas em profundidade dos solos da área experimental e da mata de referência

| profundidade (m) | P (mg dm ⁻³) | Ca ⁺⁺ | Mg ⁺⁺ | K ⁺ | Al ⁺⁺⁺ (Al ⁺⁺⁺ + H ⁺) | | CTC pH 7 | CTC ef |
|----------------------------|-----------------------------|------------------|------------------|----------------|---|------|----------|--------|
| | | | | | (cmol _c cm ⁻¹) | | | |
| área do experimento | | | | | | | | |
| 0,00-0,05 | 29,23 | 8,66 | 4,45 | 0,76 | 0,00 | 3,68 | 17,55 | 13,87 |
| 0,05-0,10 | 18,03 | 8,65 | 2,06 | 0,78 | 0,00 | 4,28 | 15,77 | 11,49 |
| 0,10-0,20 | 7,24 | 6,36 | 3,76 | 0,52 | 0,03 | 3,97 | 14,61 | 10,67 |
| 0,20-0,40 | 1,70 | 5,56 | 2,68 | 0,26 | 0,01 | 3,42 | 11,92 | 8,51 |
| mata de referência | | | | | | | | |
| 0,00-0,05 | 2,16 | 8,04 | 2,76 | 0,78 | 0,00 | 4,61 | 16,19 | 11,58 |
| 0,05-0,10 | 1,49 | 4,84 | 1,06 | 0,60 | 0,00 | 6,21 | 12,71 | 6,50 |
| 0,10-0,20 | 0,81 | 3,54 | 1,00 | 0,32 | 0,01 | 6,69 | 11,55 | 4,87 |
| 0,20-0,40 | 0,14 | 1,40 | 0,95 | 0,36 | 0,06 | 7,20 | 9,91 | 2,77 |

Fonte: autoria própria

Tabela 2b: Valores médios das características químicas em profundidade dos solos da área experimental e da mata de referência.

| profundidade (m) | MO (g kg ⁻¹) | V | Ca ⁺⁺ | Mg ⁺⁺ | K ⁺ | Al ⁺⁺⁺ | pH CaCl ₂ | pH SMP |
|----------------------------|-----------------------------|-------|------------------|------------------|----------------|-------------------|----------------------|--------|
| | | | | | | | | |
| área do experimento | | | | | | | | |
| 0,00-0,05 | 37,97 | 79,03 | 49,34 | 25,36 | 4,33 | 0,00 | 5,89 | 6,40 |
| 0,05-0,10 | 32,49 | 72,86 | 54,85 | 13,06 | 4,95 | 0,00 | 5,45 | 6,20 |
| 0,10-0,20 | 24,55 | 72,83 | 43,53 | 25,74 | 3,56 | 0,28 | 5,77 | 6,30 |
| 0,20-0,40 | 13,17 | 71,31 | 46,64 | 22,48 | 2,18 | 0,12 | 5,51 | 6,50 |
| mata de referência | | | | | | | | |
| 0,00-0,05 | 51,05 | 71,53 | 49,66 | 17,05 | 4,82 | 0,00 | 5,80 | 6,10 |
| 0,05-0,10 | 40,31 | 51,14 | 38,08 | 8,34 | 4,72 | 0,00 | 4,90 | 5,70 |
| 0,10-0,20 | 24,19 | 42,08 | 30,65 | 8,66 | 2,77 | 0,21 | 4,40 | 5,60 |
| 0,20-0,40 | 13,43 | 27,35 | 14,13 | 9,59 | 3,63 | 2,17 | 4,20 | 5,50 |

Fonte: autoria própria

3.6 CÁLCULO DO ÍNDICE DE MANEJO DE CARBONO

O índice de manejo de carbono (IMC) foi calculado através da fórmula $IMC = ICC \cdot IL \cdot 100$, onde ICC (índice de compartimento do C) = $\frac{COT\ tratamento}{COT\ referência}$ e IL (índice de labilidade do C) = $\frac{L\ amostra}{L\ referência}$ e L (labilidade do C) = $\frac{teor\ CL}{teor\ CR}$ (SIGNOR, D.; CERRI, C. E. P., 2013; BLAIR; LEFROY; LISLE, 1995), sendo que o IMC para área de referência é sempre 100%.

3.7 ANÁLISE ESTATÍSTICA

Os resultados obtidos para COT, CL, CR, CTC_{ef} e MOS foram submetidos à análise de variância e posteriormente à comparação entre as médias pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

3.8 RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO

O inverno do quarto ciclo (2014) recebeu a cultura da aveia preta (*Avena strigosa*) em área total do experimento. A aveia foi manejada com rolo-faca no final do inverno.

No início da primavera, após o manejo da aveia, foi realizada a coleta de dados de penetrometria, com o intuito de verificar o efeito residual dos tratamentos dos três anos anteriores na RSP. Foram realizadas três amostragens em cada uma das 48 parcelas totalizando 144 pontos amostrados, sendo 18 pontos para cada tratamento. Em SPD, o número de amostras acima de 15 apresenta boa representatividade (TAVARES FILHO; RIBON, 2008).

Os dados de penetrometria foram coletados quatro dias após a última chuva de um período chuvoso de 144 mm distribuídos em 12 dias (18 a 29-09-2014), registrado pela estação meteorológica do IAPAR, em Londrina.

Em cada ponto amostrado foi realizada leitura de 0,01 em 0,01 m até a profundidade de 0,80 m.

A penetrometria foi realizada com penetrógrafo de cone, computadorizado e de acionamento manual, marca Eijkelkamp, modelo

Penetrologger Viewer Vs. 6.08, com cone de 60° e área de 2 cm², a uma velocidade de penetração de 0,01 m s⁻¹.

Os dados da penetrometria foram apresentados graficamente nos intervalos de 0,00 a 0,05 m, 0,05-0,10 m, 0,10-0,20 m, 0,20-0,30 m, 0,30-0,40 m, 0,40-0,50 m, 0,50-0,60 m, 0,60-0,70 m e 0,70-0,80 m. Para cada intervalo de profundidade foi apresentada uma média de todas as leituras de um mesmo tratamento e os respectivos erros padrão das médias.

3.9 UMIDADE DO SOLO

Simultaneamente à penetrometria, foram coletadas amostras de solo para determinação de umidade expressa em massa. Foi amostrado um ponto por bloco, de 0,10 em 0,10 m até 0,80 m de profundidade com o auxílio de trado de rosca.

As amostras foram acondicionadas em embalagens totalmente vedadas e impermeáveis. Cada amostra embalada foi pesada, e na sequência foram abertas e imediatamente colocadas para secar em estufa a 105°C por 24 horas (BUSKE, 2013).

Após a secagem, as amostras foram novamente pesadas. A diferença entre a massa inicial e final é a massa de água contida na amostra (BUSKE, 2013).

Posteriormente a embalagem foi descartada e o solo seco foi novamente pesado. O quociente entre a massa de água e a massa da amostra de solo seco multiplicado por 100 é a umidade do solo expressa em porcentagem da massa. (BUSKE, 2013).

A determinação da umidade do solo foi realizada no laboratório de física do solo da UEL.

4 ARTIGO A: CARBONO ORGÂNICO APÓS TRÊS ANOS DE SUCESSÃO SOJA E CULTURAS DE INVERNO EM SISTEMA PLANTIO DIRETO

4.1 RESUMO

Resumo: O desafio brasileiro é a prática de uma agricultura eficiente, rentável e sustentável, com o uso racional dos recursos naturais e sequestro de carbono para minimizar as emissões dos gases do efeito estufa. O ciclo do carbono indica que o solo é um importante reservatório deste elemento e as raízes das plantas têm um papel importante no seu aporte. O objetivo deste trabalho foi quantificar os teores de carbono de um Latossolo Vermelho, em oito diferentes sucessões de culturas no Sistema Plantio Direto, visando determinar as sucessões mais eficientes no sequestro de carbono. O experimento foi conduzido na Fazenda Escola da Universidade Estadual de Londrina, com oito tratamentos e seis repetições em blocos casualizados, onde foram avaliadas oito sucessões com soja no verão e milho, trigo, canola, milho + ruziziensis, aveia, nabo, ruziziensis e pousio no inverno. Foram analisados os teores de carbono orgânico total, lábil e residual (por diferença), matéria orgânica e capacidade de troca catiônica, nas profundidades de 0,00-0,05 m, 0,05-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m, após o terceiro ano das sucessões. Os teores de carbono orgânico total, matéria orgânica, carbono lábil e capacidade de troca catiônica decresceram com o aumento da profundidade e o carbono residual aumentou da camada superficial para a segunda profundidade e em seguida decresceu. Ocorreu diferença estatística pelo teste de Tukey a 5% para carbono orgânico total e matéria orgânica entre os tratamentos com soja/milho (9,74 g kg⁻¹ e 16,80 g kg⁻¹ respectivamente) e soja/ruziziensis (9,22 g kg⁻¹ e 15,90 g kg⁻¹ respectivamente), ambos em relação ao tratamento com soja/canola (5,71 g kg⁻¹ e 9,85 g kg⁻¹ respectivamente) apenas na profundidade de 0,20 a 0,40 m. Em curtos períodos de observação não é possível verificar diferenças de acúmulo de carbono entre os diversos tratamentos.

Palavras-chave: Rotação de culturas. Matéria orgânica do solo. Sequestro de carbono. Aquecimento global. Manejo do solo

4.2 ABSTRACT

Abstract: The Brazilian challenge is to practice an efficient sustainable and profitable agriculture, with the rational use of natural resources and carbon sequestration to minimize emissions of greenhouse gases. The carbon cycle indicates that the soil is an important reservoir of the element and the roots of the plants have an important role in their uptake. The objective of this study was to quantify the organic carbon content in the Oxisol, in eight different crop sequences in the No-Tillage System, to determine the most effective sequences in carbon sequestration. The experiment was conducted at the Farm School of the State University of Londrina, with eight treatments and six replications in randomized blocks, were evaluated eight succession with soybean in summer and corn, wheat, canola, corn + ruziziensis, oats, turnips, ruziziensis and fallow in the winter. The levels of total organic carbon, labile and residual were analyzed (by difference), organic matter and cation exchange capacity at depths of 0.00-0.05 m, 0.05-0.10 m, 0.10-0.20 m 0.20-0.40 m me, after third year of succession. The total organic carbon, organic matter and effective cation exchange capacity decreased with increased depth and increased residual carbon from the surface layer to the second depth and then decreased. Statistical difference by Tukey test at 5% for total organic carbon and organic matter between treatments with soybean/corn (9.74 g kg^{-1} and 16.80 g kg^{-1} , respectively) and soybean/ruziziensis (9.22 g kg^{-1} and 15.90 g kg^{-1} , respectively), both in relation to treatment with soybean/canola (5.71 g kg^{-1} and 9.85 g kg^{-1} , respectively) only at a depth of 0.20-0.40 m. In short periods of observation can not be verified carbon accumulation of differences between the various treatments.

Key words: Crop rotation. Soil organic matter. Carbon sequestration. Global warming. Soil management

4.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Apenas como referência, foi apresentado no final das tabelas 3, 4, 5, 7 e 8, os teores analisados de COT, CL, CR, CTCef e matéria orgânica (MO) respectivamente, em quatro diferentes profundidades de um Latossolo Vermelho, sob fragmento de mata nativa localizada próxima ao experimento. Isto impede a comparação estatística entre os tratamentos e referência, mas reduz a variabilidade dos dados analisados.

As profundidades analisadas no solo de mata nativa são as mesmas utilizadas no experimento.

O COT apresentou teores decrescentes com o aumento da profundidade em todos os tratamentos (Tabela 3), o que é justificável pelo maior aporte de C pelas raízes das culturas nos estratos superiores do solo. Não ocorreu diferença estatística entre os tratamentos nos teores de COT nas profundidades de 0,00-0,05 m, 0,05-0,10 m e 0,10-0,20 m.

Na camada de 0,20-0,40 m, houve diferença significativa entre os tratamentos CAN, com menor teor de COT, e os tratamentos MIL e RUZ, que apresentaram teores mais elevados (Tabela 3).

Esta diferença deve-se, provavelmente, ao maior volume, maior profundidade e maior relação C/N do sistema radicular do milho e da ruzizensis em relação à canola. O sistema radicular da ruzizensis atingiu 2,0 m de profundidade, num Latossolo Vermelho distrófico, textura argilosa, sob SPD, no município de Ipameri - GO (FREITAS; NASCENTE; SANTOS, 2013), enquanto que as raízes de milho aportaram 2,50 Mg ha⁻¹ de matéria seca até uma profundidade de 1 m em SPD num Latossolo Vermelho distroférico, muito argiloso, em Londrina – PR (BORDIN et al., 2008).

A cultura do milho aportou 0,72 Mg ha⁻¹ de C até 1 m de profundidade em SPD, sendo que 53% deste C se localizou abaixo da camada superficial de 0,00 a 0,10 m (BORDIM et al., 2008), o que explica a diferença estatística entre os teores de COT, ocorrida nos tratamentos CAN e MIL, nos estratos mais profundos (Tabela 3)

Tabela 3 - Teores de carbono orgânico total (COT) no solo em diversas sucessões de cultura em um Latossolo Vermelho.

| Tratamento | carbono orgânico total (g kg ⁻¹) | | | |
|---------------------------|--|-----------|-----------|-----------|
| | profundidades (m) | | | |
| | 0,00-0,05 | 0,05-0,10 | 0,10-0,20 | 0,20-0,40 |
| CAN | 22,08 a | 19,81 a | 11,85 a | 5,71 a |
| POU | 21,69 a | 20,52 a | 16,73 a | 6,36 ab |
| M+R | 19,81 a | 18,57 a | 12,86 a | 7,13 ab |
| TRI | 19,64 a | 17,92 a | 14,68 a | 7,48 ab |
| AVE | 25,98 a | 17,15 a | 13,51 a | 7,53 ab |
| NAB | 20,91 a | 18,96 a | 15,17 a | 7,92 ab |
| RUZ | 23,12 a | 17,92 a | 14,55 a | 9,22 b |
| MIL | 22,99 a | 19,87 a | 14,56 a | 9,74 b |
| MATA REFERENCIAL | 29,61 | 23,38 | 14,03 | 7,79 |
| DMS (g kg ⁻¹) | 8,04 | 5,36 | 6,15 | 3,48 |
| CV (%) | 19,62 | 15,28 | 23,23 | 24,51 |

Fonte: autoria própria.

Médias seguidas pela mesma letra, dentro da mesma coluna, não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Hickmann e Costa (2012) observaram que, após 23 anos de cultivo em SPD, ocorreu acréscimo de 1,5 Mg ha⁻¹ no estoque de COT, em relação à mata nativa de referência, apenas na profundidade de 0,00-0,05 m. Nas demais camadas, distribuídas entre 0,05 e 0,40 m não houve recuperação de C.

No trabalho de Hickmann e Costa (2012) foi quantificado os teores de COT em 4 profundidades e em diversos tipos de manejo num Argissolo Vermelho Amarelo da Zona da Mata de Minas Gerais, sendo que um dos manejos foi o SPD. Comparando os resultados obtidos no SPD por Hickmann e Costa (2012) com este trabalho, houve similaridade em todas as profundidades analisadas.

Apresentando a mesma tendência de diminuição dos teores de COT nos estratos mais profundos, os resultados obtidos por Silva et al. (2012) se assemelharam com este trabalho, mas a fonte de aporte de C, ao invés de apenas plantas, foi a aplicação de diferentes tipos de material orgânico compostado. A médio prazo, ocorreu maior acúmulo de COT na camada de 0,00-0,05 m (SILVA et

al., 2012), sendo que nas camadas inferiores não houve diferença estatística em relação à testemunha sem aplicação de composto.

Batista et al. (2013) pesquisaram solos com vegetação de cerrado nativo (referência), pasto e dois tipos de rotação em ILP, no município de Maracajú – MS, todos em três profundidades, e também obtiveram resultados apresentando decréscimo de COT em profundidade, sendo que o carbono orgânico particulado se mostrou mais sensível ao manejo do que o carbono orgânico associado aos minerais.

Ao contrário do verificado nos estudos acima mencionados, ocorreu aumento dos teores de COT com o aumento da profundidade em trabalho realizado por Santos, Lacerda e Zinn (2013), o que não é usual, mas é explicado pela presença de 14% de amostras de Organossolo na base de dados da referida pesquisa.

Percebe-se que, em geral, os teores de COT da área manejada do experimento são menores do que os da mata nativa, confirmando resultados de Stürmer et al. (2011) em experimento realizado no município de Agudo – RS, com predominância de Neossolo e Chernossolo.

Os teores de CL se mostraram mais sensíveis ao efeito dos diferentes manejos do que o CR, sobretudo nos estratos mais superficiais, onde a MOS está mais sujeita à oxidação.

Considerando que labilidade do C (L) = $CL \cdot CR^{-1}$ (SIGNOR; CERRI, 2013), e comparando os teores de CL (Tabela 4) com os teores de CR (Tabela 5), observou-se que L foi alta em relação ao observado por Conceição et al. (2005), em experimento realizado num Argissolo Vermelho distroférico de textura franco-argilosa sob SPD, em Eldorado do Sul – RS. Esta diferença pode ser explicada pelo método de fracionamento do C, pois Conceição et al. (2005) utilizou a metodologia de fracionamento físico, enquanto neste trabalho o método utilizado foi o de oxidação por $K_2Cr_2O_7$.

O método de oxidação por $K_2Cr_2O_7$ oxida parte do C pertencente ao compartimento CR, superestimando a labilidade (SIGNOR; CERRI, 2013).

Em relação ao solo de referência da mata, as áreas manejadas mostraram diminuição de CL em todos os estratos.

Tabela 4 - Teores de carbono lábil (CL) no solo em diversas sucessões de cultura em um Latossolo Vermelho.

| Tratamento | carbono lábil (g kg ⁻¹) | | | |
|---------------------------|-------------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| | profundidades (m) | | | |
| | 0,00-0,05 | 0,05-0,10 | 0,10-0,20 | 0,20-0,40 |
| CAN | 12,39 a | 5,36 a | 6,54 a | 2,89 a |
| POU | 12,63 a | 5,60 a | 7,58 a | 3,24 a |
| M+R | 12,26 a | 6,08 a | 6,97 a | 2,97 a |
| TRI | 12,55 a | 5,48 a | 7,27 a | 3,53 a |
| AVE | 12,65 a | 5,92 a | 7,11 a | 3,23 a |
| NAB | 12,16 a | 5,47 a | 7,13 a | 2,98 a |
| RUZ | 12,63 a | 5,72 a | 6,88 a | 3,46 a |
| MIL | 12,39 a | 5,84 a | 8,28 a | 3,85 a |
| MATA REFERENCIAL | 19,98 | 13,91 | 7,83 | 6,93 |
| DMS (g kg ⁻¹) | 3,18 | 1,21 | 2,68 | 1,29 |
| CV (%) | 13,71 | 11,49 | 19,95 | 21,18 |

Fonte: autoria própria.

Médias seguidas pela mesma letra, dentro da mesma coluna, não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Para CR, não foi observada diferença estatística entre os teores de um tratamento para outro em nenhuma das profundidades, o que pode ser consequência da curta duração (apenas três anos) do experimento (Tabela 5).

Quando comparados os teores de CR do solo da área experimental e da área referencial de mata nativa (Tabela 5), percebeu-se semelhança entre os dois no estrato superior e maiores teores de CR no solo da área experimental nas demais camadas.

Esperava-se o mesmo comportamento entre os teores de CR e COT em profundidade, porém, houve um aumento do teor de CR do estrato superficial (0,00-0,05 m) para o estrato subsuperficial (0,05-0,10 m) e a partir deste ocorreu a diminuição dos teores de CR com o aumento da profundidade (Tabela 5). Isto pode ser explicado pela grande exposição da MOS à oxidação próximo à superfície, provocando maior labilidade do C. Nas camadas inferiores o CR segue a mesma tendência de diminuição do COT.

O mesmo ocorreu com as observações de Batista et al. (2013) quando analisaram solo com rotação de pastagem e milho, isto é, teores menores de CR no estrato superficial (0,00-0,10 m), aumentando no segundo estrato (0,10-0,20 m), voltando a diminuir no estrato inferior (0,20-0,30 m). Nesta pesquisa, os mesmos autores analisaram solo com vegetação de cerrado nativo (Maracajú – MS) e os resultados mostraram aumento de CR com o aumento da profundidade. Quando Batista et al. (2013) analisaram duas modalidades de ILP, detectaram diminuição do CR com o aumento da profundidade.

Tabela 5: Teores de carbono residual (CR) para diversas sucessões de cultura em um Latossolo Vermelho.

| Tratamento | carbono residual (g kg ⁻¹) | | | |
|---------------------------|--|-----------|-----------|-----------|
| | profundidades (m) | | | |
| | 0,00-0,05 | 0,05-0,10 | 0,10-0,20 | 0,20-0,40 |
| CAN | 9,69 a | 14,45 a | 5,31 a | 2,82 a |
| POU | 9,06 a | 14,92 a | 9,15 a | 3,12 a |
| M+R | 7,54 a | 12,49 a | 5,89 a | 4,16 a |
| TRI | 7,09 a | 12,44 a | 7,41 a | 3,95 a |
| AVE | 13,32 a | 11,23 a | 6,40 a | 4,30 a |
| NAB | 8,75 a | 13,49 a | 8,04 a | 4,94 a |
| RUZ | 10,49 a | 12,21 a | 7,66 a | 5,76 a |
| MIL | 10,60 a | 14,03 a | 6,28 a | 5,89 a |
| MATA REFERENCIAL | 9,63 | 9,47 | 6,20 | 0,86 |
| DMS (g.kg ⁻¹) | 7,11 | 4,89 | 5,98 | 3,45 |
| CV (%) | 39,95 | 19,97 | 45,79 | 42,47 |

Fonte: autoria própria.

Médias seguidas pela mesma letra, dentro da mesma coluna, não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Já Steiner et al. (2011) observaram teores decrescente de CR em profundidade desde a camada mais superficial de um Latossolo Vermelho, no oeste do Paraná, embora a espessura do estrato superficial analisado por Steiner et al. (2011) foi de 0,00-0,10 m e não de 0,00-0,05 m como neste trabalho. Os tratamentos com adubação orgânica e orgânica + mineral apresentaram aumento nos teores de CR enquanto que os tratamentos com adubação mineral apresentaram perdas.

Em trabalho realizado no município de Maracajú – MS, em Latossolo Vermelho distroférrico, textura argilosa, Silva et al. (2011) também mostraram que os teores de CR são decrescentes em profundidade em observações comparando vegetação nativa (VN), SPD, pastagem revolvida (PR), integração lavoura-pecuária (ILP) com quatro anos e ILP com oito anos de implantação

No mesmo estudo, Silva et al (2011) observaram que na camada de 0,00-0,10 m, a ILP com oito anos incrementou os teores de CR em 37 e 39% em comparação ao SPD e ao ILP com quatro anos respectivamente, e não diferiu da VN e da PR.

Tabela 6 - Índice de manejo de carbono (IMC) no solo em diversas sucessões de cultura em um Latossolo Vermelho.

| Tratamento | Índice de manejo do carbono (%) | | | |
|------------|---------------------------------|-----------|-----------|-----------|
| | profundidades (m) | | | |
| | 0,00-0,05 | 0,05-0,10 | 0,10-0,20 | 0,20-0,40 |
| CAN | 46,23 | 21,18 | 82,77 | 9,53 |
| POU | 49,08 | 21,94 | 78,70 | 10,61 |
| M+R | 52,18 | 26,21 | 86,16 | 8,24 |
| TRI | 57,04 | 22,99 | 81,61 | 10,56 |
| AVE | 40,36 | 26,41 | 84,74 | 8,70 |
| NAB | 47,31 | 22,71 | 76,77 | 7,12 |
| RUZ | 45,29 | 24,53 | 73,63 | 8,28 |
| MIL | 44,26 | 24,65 | 108,97 | 10,00 |

Fonte: autoria própria

Considerando o IMC como um índice de sustentabilidade relativa entre diversos manejos de solo e sistemas de cultivo (BLAIR; LEFROY; SINGH, 1997), e comparando com os resultados obtidos por Sgnori e Cerri (2013), os valores observados neste trabalho foram muito baixos, provavelmente, devido ao clima quente desta região, que favorece a degradação da MOS em sistemas agrícolas.

Os teores de MO foram decrescentes com o aumento da profundidade em todos os tratamentos (Tabela 7), apresentando, logicamente, uma relação direta com o COT, pois para obtenção dos teores de MO utiliza-se o fator de

Van Bemmelen (1,724), assumindo que o teor de carbono na MO é 58% (RIGOLIN et al., 2013).

Tabela 7 - Teores de matéria orgânica (MO) para diversas sucessões de cultura em um Latossolo Vermelho.

| Tratamento | matéria orgânica (g kg ⁻¹) | | | |
|---------------------------|--|-----------|-----------|-----------|
| | profundidades (m) | | | |
| | 0,00-0,05 | 0,05-0,10 | 0,10-0,20 | 0,20-0,40 |
| CAN | 38,07 a | 34,15 a | 20,43 a | 9,85 a |
| POU | 37,40 a | 35,38 a | 28,85 a | 10,97 ab |
| M+R | 34,15 a | 32,02 a | 22,17 a | 12,29 ab |
| TRI | 33,86 a | 30,90 a | 25,30 a | 12,90 ab |
| AVE | 44,79 a | 29,56 a | 23,29 a | 12,98 ab |
| NAB | 36,05 a | 32,70 a | 26,16 a | 13,66 ab |
| RUZ | 39,86 a | 30,91 a | 25,08 a | 15,90 b |
| MIL | 39,63 a | 34,26 a | 25,11 a | 16,80 b |
| MATA REFERENCIAL | 51,05 | 40,31 | 24,19 | 13,43 |
| DMS (g kg ⁻¹) | 13,86 | 9,23 | 10,61 | 6,00 |
| CV (%) | 19,62 | 15,29 | 23,24 | 24,50 |

Fonte: autoria própria.

Médias seguidas pela mesma letra, dentro da mesma coluna, não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Entre os tratamentos ocorreu diferença estatisticamente significativa apenas na profundidade de 0,20-0,40 m, entre o tratamento CAN, que apresentou o menor teor de MO, e os tratamentos com MIL e RUZ, com teores mais elevados de MO (Tabela 7).

Comparando os resultados obtidos neste estudo com os dados referenciais obtidos na mata nativa, verificou-se que os teores de MO são mais elevados no solo da mata nativa nas profundidades de 0,00-0,05 m e de 0,05-0,10 m e semelhantes nas demais profundidades (Tabela 7).

A diminuição de MO em relação ao solo da mata nativa nos estratos mais superficiais, sugere que as diferentes sucessões de culturas, aqui experimentadas, não são suficientemente eficientes em sequestro de C em regiões de clima quente.

Estudo realizado em Latossolo Vermelho distrófico, no município de Silvíria – MS por Souza e Alves (2003), analisando MO nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,40 m em solos de cerrado nativo, semeadura direta, cultivo mínimo, seringueira, pastagem e cultivo convencional, comprovam a diminuição da MO com o aumento de profundidade em todos os tratamentos. Entre os tratamentos houve diferença significativa para preparo convencional na camada mais superficial, e para seringueira e pastagem em todas as profundidades, todos apresentando menor teor de MO em relação aos demais tratamentos.

A CTC_{ef} foi decrescente com o aumento da profundidade (Tabela 8) apresentando a mesma tendência dos teores de MO. Isto se explica pela maior capacidade de troca catiônica dos colóides originários da MO em relação aos colóides de origem mineral. A diminuição do pH em profundidade também é um fator que contribuiu para a diminuição da CTC_{ef} , comportamento também observado na mata de referência. A CTC_{ef} não apresentou diferença estatística entre os tratamentos numa mesma profundidade.

Ciotta et al. (2003) observaram que, após 21 anos de cultivo no SPD, em Latossolo Bruno no município de Guarapuava – PR, houve um aumento expressivo na CTC_{ef} do solo relacionado à elevação dos teores de MO. Os mesmos autores observaram também que a CTC_{ef} se apresentou mais elevada na camada de 0,0-0,02 m ($6,29 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) do que na camada de 0,15-0,20 m ($3,66 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), acompanhando o gradiente dos teores de MO.

Oliveira et al. (2013) também verificaram correlação positiva entre CTC_{ef} e MO em solos com má drenagem no sudoeste do estado do Mato Grosso.

Tabela 8 - Capacidade troca catiônica efetiva para diversas sucessões de cultura em Latossolo Vermelho.

| Tratamento | capacidade de troca catiônica efetiva (cmol _c dm ⁻³) | | | |
|---|---|-----------|-----------|-----------|
| | Profundidades (m) | | | |
| | 0,00-0,05 | 0,05-0,10 | 0,10-0,20 | 0,20-0,40 |
| CAN | 13,88 a | 11,51 a | 10,57 a | 8,27 a |
| POU | 13,96 a | 10,67 a | 10,57 a | 8,00 a |
| M+R | 14,47 a | 12,54 a | 10,84 a | 8,59 a |
| TRI | 12,89 a | 10,84 a | 10,21 a | 8,21 a |
| AVE | 15,95 a | 11,18 a | 10,40 a | 7,92 a |
| NAB | 13,40 a | 11,27 a | 10,70 a | 8,27 a |
| RUZ | 12,50 a | 11,51 a | 11,38 a | 9,35 a |
| MIL | 14,05 a | 12,41 a | 10,48 a | 9,42 a |
| MATA REFERENCIAL | 11,58 | 6,50 | 2,33 | 0,82 |
| DMS (cmol _c cm ⁻³) | 3,62 | 3,06 | 2,79 | 2,97 |
| CV (%) | 14,01 | 14,30 | 14,10 | 18,78 |

Fonte: autoria própria.

Médias seguidas pela mesma letra, dentro da mesma coluna, não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

4.4 CONCLUSÃO

- O uso de sucessões com plantas de cobertura não aumenta os teores de C orgânico e suas frações no curto prazo de adoção do SPD.

- É necessário o uso de rotações de culturas mais intensas para ocorrer aumento nos teores de C orgânico, que aproxime do solo natural, no curto prazo.

5 ARTIGO B: RESISTÊNCIA DO SOLO À PENETRAÇÃO EM DIFERENTES SUCESSÕES DE CULTURAS NA FASE INICIAL DO SISTEMA PLANTIO DIRETO

5.1 RESUMO

Resumo: Os diferentes manejos dos solos agrícolas modificam as características físicas, químicas e biológicas do solo. A compactação do solo é uma das modificações físicas decorrentes dos manejos inadequados. Uma consequência da compactação é o aumento da resistência do solo à penetração das raízes, que está diretamente relacionada com a umidade. O objetivo desta pesquisa foi avaliar, através da penetrometria, a resistência do solo à penetração, detectando varrições neste parâmetro em um Latossolo Vermelho, sob diferentes sucessões de culturas, na fase inicial do SPD. O experimento foi conduzido na Fazenda Escola da Universidade Estadual de Londrina, com oito tratamentos e seis repetições em blocos casualizados. Foram avaliadas oito sucessões com soja no verão e milho, trigo, canola, milho + ruziziensis, aveia, nabo, ruziziensis e pousio no inverno. Os dados de resistência à penetração foram obtidos com penetrômetro eletrônico de acionamento manual, de 0,01 em 0,01 m, até a profundidade de 0,80m, com uma velocidade de penetração de 0,01 m s⁻¹. A umidade foi obtida pelo método gravimétrico e as amostras foram coletadas até uma profundidade de 0,80 m. As maiores resistências do solo à penetração ocorreram na profundidade de 0,10-0,20 m em sete dos oito tratamentos e nestes sete tratamentos a resistência à penetração ultrapassou a 2,00 MPa. Apenas no tratamento com ruziziensis no inverno a resistência à penetração não atingiu a 2,00 Mpa e neste tratamento a resistência máxima ocorreu no estrato de 0,20-0,30 m. Estes resultados evidenciam que a fase mais crítica do Sistema Plantio Direto é a inicial.

Palavras-chave: Penetrômetro. Plantas de cobertura. Umidade do solo. Adubo verde. Física do solo.

5.2 ABSTRACT

Abstract: The different management of agricultural soils modify the physical, chemical and biological soil characteristics. Soil compaction is one of the physical changes resulting from inadequate management. A consequence of compression is increased soil resistance to root penetration, which is directly related to moisture. The objective of this research was to evaluate, through the penetrometer, soil penetration resistance, detecting compacted layers in an Oxisol under different crop sequences in the initial phase of the No-Tillage System (SPD in Portuguese). The experiment was conducted at the Farm School of the State University of Londrina, with eight treatments and six replications in randomized blocks. They assessed eight sequences in summer soybean and corn, wheat, canola, corn + ruziziensis, oats, radish, ruziziensis and fallow in winter. The penetration resistance data were obtained with electronic penetrometer manually operated, 0.01 by 0.01 m, to a depth of 0.80 m, with a penetration rate of 0.01 m s⁻¹. The humidity was obtained by gravimetric method and samples were collected to a depth of 0.80 m. The greatest resistance to penetration occurred at a depth of 0.10-0.20 m in seven of eight treatments and these seven treatments penetration resistance exceeded 2.00 MPa. As in treatment with ruziziensis in winter penetration resistance has not reached 2.00 MPa and the maximum resistance in this treatment occurred in the stratum of 0.20-0.30 m. These results show that the most critical phase of the No-Tillage System is the initial.

Key words: Penetrometer. Cover crops. Soil moisture. Green manure crops. Soil physic.

5.3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

A resistência do solo à penetração (RSP) decorrente da compactação do solo apresentou a mesma tendência nos oito tratamentos, aumentando expressivamente nos estratos superiores (0,00-0,05 m, 0,05-0,10 m e 0,10-0,20 m) e a partir daí passou a diminuir lenta e gradativamente até a profundidade de 0,70-0,80 m (Tabela 9 e Figura 1).

O máximo valor de RSP foi atingido na camada de 0,10-0,20 m em sete dos oito tratamentos, exceção para o tratamento RUZ, que apresentou o valor máximo no estrato de 0,20-0,30 m. Os valores mínimos ocorreram na profundidade de 0,00-0,05 m para todos os tratamentos (Tabela 9 e Figura 1), devido ao revolvimento e à maior presença de MOS.

Segundo conclusão de Genro Junior, Reinert e Reichert (2004), todas as rotações de culturas no Latossolo argiloso em SPD por eles pesquisadas apresentaram maior RSP na camada em torno de 0,10 m de profundidade comparado com este trabalho onde a maior RSP foi observada entre 0,10 e 0,20 m. Resultados concordantes com esta pesquisa quanto às menores RSP também foram obtidos por Genro Junior, Reinert e Reichert (2004), que ocorreram nos estratos superficiais, até 0,07 m.

Em estudo comparando solo de cerrado nativo e solos com diferentes tempos de implantação do SPD (3, 4 e 8 anos), Pragana, Nóbrega e Martins (2011) também observaram maior RSP na profundidade de 0,10-0,20 m para SPD com 3 e 8 anos, enquanto para o SPD com 4 anos a maior RSP foi observada entre 0,00-0,10 m. Para Ralisch et al. (2008), que pesquisaram RSP em SPD de 2, 8 e 14 anos em Latossolo Vermelho Amarelo do cerrado, os maiores valores atingidos foram na profundidade de 0,30 m para SPD 14 anos, 0,25 m para SPD 8 anos e 0,20 m para SPD 2 anos, confirmando os resultados obtidos na fase inicial de SPD deste trabalho na profundidade de 0,10-0,20 m.

Comparando a RSP para as três épocas de implantação do SPD, Ralisch et al. (2008) observaram valores mais elevados no SPD 2 anos, em relação aos SPD 8 e 14 anos, mostrando novamente que a fase crítica do SPD quanto à RSP é a inicial.

Tabela 9 - Resistência do solo à penetração (RSP) para diversas sucessões de culturas em um Latossolo Vermelho

| resistência do solo à penetração (Mpa) | | | | | | | | | |
|--|------------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|--------------|
| Tratamentos | Profundidade (m) | | | | | | | | |
| | 0,00 0,05 | 0,05 0,10 | 0,10 0,20 | 0,20 0,30 | 0,30 0,40 | 0,40 0,50 | 0,50 0,60 | 0,60 0,70 | 0,70 0,80 |
| TRI | 0,25 a | 1,38 a | 2,05 a | 1,97 a | 1,72 a | 1,53 a | 1,47 a | 1,42 a | 1,35 a |
| CAN | 0,28 a | 1,28 a | 2,03 a | 1,98 a | 1,75 a | 1,57 a | 1,47 a | 1,47 a | 1,40 a |
| M+R | 0,23 a | 1,22 a | 2,07 a | 2,03 a | 1,73 a | 1,60 a | 1,53 a | 1,50 a | 1,43 a |
| MIL | 0,30 a | 1,45 a | 2,02 a | 2,00 a | 1,67 a | 1,50 a | 1,45 a | 1,48 a | 1,38 a |
| NAB | 0,27 a | 1,45 a | 2,00 a | 1,93 a | 1,75 a | 1,60 a | 1,52 a | 1,50 a | 1,47 a |
| AVE | 0,18 a | 1,25 a | 2,07 a | 2,03 a | 1,73 a | 1,45 a | 1,40 a | 1,35 a | 1,28 a |
| RUZ | 0,28 a | 1,27 a | 1,92 a | 1,93 a | 1,70 a | 1,60 a | 1,53 a | 1,53 a | 1,53 a |
| POU | 0,37 a | 1,70 a | 2,20 a | 2,08 a | 1,88 a | 1,67 a | 1,62 a | 1,57 a | 1,53 a |
| DMS (Mpa) | 0,28 | 0,62 | 0,33 | 0,34 | 0,30 | 0,26 | 0,29 | 0,33 | 0,36 |
| CV (%) | 55,68 | 24,31 | 8,65 | 9,23 | 9,22 | 8,77 | 10,56 | 11,88 | 13,64 |

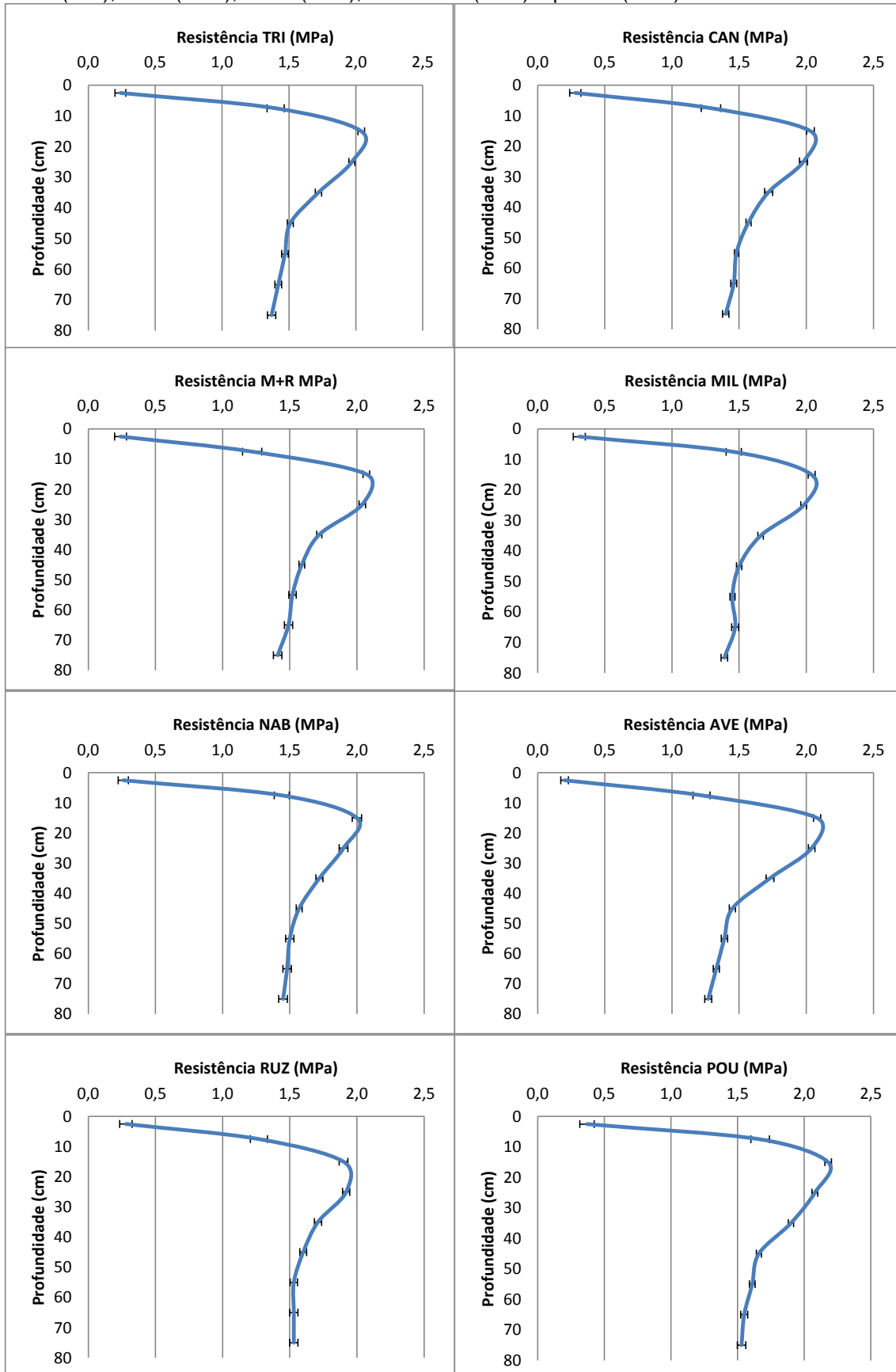
Fonte: autoria própria.

Médias seguidas pela mesma letra, dentro da mesma coluna, não diferem significativamente pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Na representação gráfica dos resultados, pode-se observar através das barras do erro padrão da média (EPM) que as maiores variabilidades da RSP para todos os tratamentos ocorreu no estrato de 0,05-0,10 m, seguido pelo estrato de 0,00-0,05 m (Figura 1), o que pode ser explicado pelo revolvimento superficial do solo por ocasião da semeadura e pelo maior aporte de material orgânico nestes estratos.

A maior amplitude de RSP entre as médias das diversas profundidades ocorreu no tratamento AVE, variando de 0,18 MPa na camada de 0,00-0,05 m até 2,07 MPa na camada de 0,10-0,20 m. A menor amplitude ocorreu no tratamento RUZ, variando de 0,28 MPa no estrato de 0,00-0,05 m até 1,93 MPa na profundidade de 0,20-0,30 m (Tabela 9).

Figura 1 - Resistência do solo à penetração (RSP) em MPa em função da profundidade (cm) em solos cultivados com sucessões de soja com trigo (TRI), canola (CAN), milho + ruziziensis (M+R), milho (MIL), nabo (NAB), aveia (AVE), ruziziensis (RUZ) e pousio (POU).



Fonte: autoria própria.

O tratamento POU atingiu a maior RSP de todo o experimento (2,20 MPa), os tratamentos TRI, CAN, M+R, MIL, NAB e AVE apresentaram RSP máxima entre 2,00 MPa (NAB) e 2,07 MPa (AVE e M+R), todos na profundidade de 0,10-0,20 m. O único tratamento que não atingiu 2,00 MPa foi o RUZ, que apresentou RSP máxima de 1,93 MPa na profundidade de 0,20-0,30 m (Tabela 9).

O valor de 2,00 MPa é considerado fortemente restritivo ao crescimento das raízes e das plantas (TARDIEU, 1994, citado por Pragana, Nóbrega e Martins, 2011).

Para Genro Junior, Reinert e Reichert (2004), os valores críticos de RSP para o crescimento das plantas variam com o tipo de solo e com a espécie cultivada, citando diversos autores que relatam níveis críticos variando entre 1 e 5 MPa.

Observações feitas por Tavares Filho et al. (2001) mostraram que índices de RSP acima de 3,5 MPa não restringiram o desenvolvimento das raízes de milho, porém influenciaram a sua morfologia.

Portanto, a definição de um valor de RSP que seja limitante ao enraizamento é impossível. Pelos mesmos motivos, empregar a RSP para avaliar e interpretar a ocorrência de compactação no solo também é inadequado, pois isto exige uma avaliação mais aprofundada da estrutura do solo. A penetrometria, porém, pode ser eficientemente empregada nas avaliações comparativas, seja entre situações diferentes de solo ou práticas agrícolas, seja entre momentos diferentes de uma mesma situação, o monitoramento de áreas.

A umidade do solo seguiu tendência inversa da RSP, variando de 30,373% na profundidade de 0,10-0,20 m até um máximo de 38,632% no estrato de 0,70-0,80 m (Tabela 10).

Resultados obtidos por Genro Junior, Reinert e Reichert (2004) confirmam a correlação negativa entre RSP e a umidade do solo, o mesmo ocorrendo com pesquisas realizadas por Silveira et al. (2010), Mion et al. (2012) e Campos et al. (2013).

A variabilidade da umidade do solo nas diversas observações por profundidade foi bastante pequena, o que pode ser observado pelo coeficiente de variação (CV%) entre os seis pontos amostrados, que é extremamente baixo, sugerindo grande uniformidade da umidade entre todos os pontos (Tabela 10).

Tabela 10 - Umidade do solo expressa em porcentagem de massa, desvio padrão das médias das umidades e coeficiente de variação

| Profundidade (m) | Umidade (%) | Desvio Padrão | CV (%) |
|------------------|-------------|---------------|--------|
| 0,00 – 0,10 | 31,397 | 0,157 | 0,500 |
| 0,10 – 0,20 | 30,373 | 0,857 | 2,823 |
| 0,20 – 0,30 | 32,441 | 1,005 | 3,097 |
| 0,30 – 0,40 | 34,679 | 0,878 | 2,531 |
| 0,40 – 0,50 | 35,482 | 1,228 | 3,460 |
| 0,50 – 0,60 | 36,858 | 1,151 | 3,123 |
| 0,60 – 0,70 | 37,371 | 1,865 | 4,990 |
| 0,70 – 0,80 | 38,632 | 2,085 | 5,396 |

Fonte: autoria própria

Apesar disto, há uma menor umidade do solo na camada de maior RSP, justificando parte desta variação, impossibilitando que se conclua tratar-se de camada compactada.

Esta redução de umidade se deve à dinâmica da água no solo em função dos horizontes de umectação, que ocorre após uma chuva ou irrigação e de desidratação causada pela evapotranspiração. O horizonte de umectação é sempre descendente, se iniciando na superfície. O de desidratação na maior parte das vezes também, mas como envolve um fator biótico de transpiração de plantas e sua dependência de distribuição e volume de raízes, que varia (RALISCH, 1999).

5.4 CONCLUSÃO

- O período mais crítico para ocorrência de camadas compactadas em SPD são os primeiros anos após a implantação.
- A camada de maior compactação subsuperficial no SPD ocorre predominantemente na profundidade entre 0,10 e 0,20 m.
- No período pesquisado (4 anos) não foi possível detectar diferenças significativas na RSP entre as diversas sucessões de culturas.

6 CONSIDERAÇÕES FINAIS

- O acúmulo de COT e de MOS ocorre muito lentamente e só pode ser verificado em experimentos de longa duração.
- A camada de maior RSP no SPD ocorre predominantemente na profundidade entre 0,10 e 0,20 m.
- No período pesquisado (4 anos) não foi possível detectar diferenças significativas na RSP entre as diversas sucessões de culturas.
- A RSP, embora sensível, não deve ser utilizada como parâmetro único para avaliar a compactação, devido à sua grande dependência da umidade do solo e, principalmente, pela complexidade envolvida.

REFERÊNCIAS

- ALCÂNTARA, F. A.; MADEIRA, N. R. **Manejo do solo no sistema de produção orgânico de hortaliças**. Brasília: EMBRAPA CNPH, 2008. 12p. (Circular Técnica, 64).
- BATISTA, I.; PEREIRA, M. G.; CORREIA, M. E. F.; BIELUCZYK, W.; SCHIAVO, J. A.; ROWS, J. R. C. Teores e estoque de carbono em frações lábeis e recalcitrantes da matéria orgânica do solo sob integração lavoura-pecuária no bioma Cerrado. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 34, n. 6, supl. 1, p. 3377-3388, 2013.
- BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A.; CAMARGO F. A. O. (Ed.). **Matéria orgânica do solo: fundamentos e caracterização**. Porto Alegre: Gênese, 1999. p. 9-26.
- BIANCHI, G. B. Café e economia brasileira da ascensão à extinção do ciclo do café. **Revista Jovens Pesquisadores**, Santa Cruz do Sul, v. 9, n. 1, p. 89-99, jan./jul. 2012.
- BLAIR, G. J.; LEFROY, R. D. B.; LISLE, L. Soil carbon fractions based on their degree of oxidation, and development of carbon management index for agricultural systems. **Australian Journal Agricultural Research**, Melbourne, v. 47, n. 7, p. 1459-1466, 1995.
- BLAIR, G. J.; LEFROY, R. D. B.; SINGH, B. P. Development and use of carbon management index to monitor changes in soil C pool size and turnover rate. In: BADISCH, G.; GILLER, K. E. (Ed.). **Driven by nature: plant litter quality and decomposition**. London: CAB International, 1997. p. 273-281.
- BORDIN, I.; NEVES, C. S. V. J.; MEDINA, C. C.; FRANCHINI, J. C.; TORRES, E.; URQUIAGA, S.. Matéria seca, carbono e nitrogênio de raízes de soja e milho em plantio direto e convencional. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 12, p. 1785-1792, 2008.
- BORKERT, L. P.; GAUDÊNCIO, C. A.; PEREIRA, J. C.; PEREIRA JUNIOR, O. A. Nutrientes minerais na biomassa da parte aérea em culturas de cobertura do solo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 1, p. 143-153, 2003.
- BRAIDA, J. A.; REICHERT, J. M.; VEIGA, M.; REINERT, D. J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio Proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 30, n. 4, p. 605-614, 2006.
- BRANDÃO, F. S.; CEOLIN, A. C.; RUVIARO, C. F.; GIANEZINI, M.; DIAS, E. A. O papel do agronegócio brasileiro na redução de emissão de gases de efeito estufa (GEES). **Revista Agroambiente**, Boa Vista, v. 6, n. 1, p. 84-90, 2012.
- BRUNETTO, G.; MELO, G. W.; KAMINSKI, J.; FURLANETTO, V.; FIALHO, F. B. Avaliação do método de perda de peso por ignição na análise de matéria orgânica em solos da Serra Gaúcha do Rio Grande do Sul. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 6, 2006.

BUSATO, J. G. Fracionamento da matéria orgânica do solo. In: ENCONTRO DE LABORATÓRIOS, 3., 2009, Goiânia. **Anais...** Goiânia, 2009.

BUSKE, T. C.. **Comportamento da umidade do solo determinada por métodos expeditos**. 2013. Dissertação (Mestrado em Engenharia Agrícola) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2013.

CAETANO, M. **IGC eleva estimativa para produção global de grãos em 2014/15**. 2014. Disponível em: <<http://www.valor.com.br/agro/3759450/igc-eleva-estimativa-para-producao-global-de-graos-em-201415>> . Acesso em: 14 jan. 2015.

CALEGARI, A.; CASTRO FILHO, C.; TAVARES FILHO, J.; RALISCH, R.; GUMARÃES, M. F. Melhoria da agregação do solo através do plantio direto. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 27, n. 2, p. 147-158, 2006.

CAMPOS, L. P.; LEITE, L. F. C.; MACIEL, G. A.; IWATA, B. F.; NÓBREGA, J. C. A. Atributos químicos de um Latossolo Amarelo sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 46, n. 12, 2011.

CAMPOS, M. C. C.; AQUINO, R. E.; OLIVEIRA, I. A.; BERGAMIN, A. C. Variabilidade espacial da resistência mecânica do solo à penetração e umidade do solo em área cultivada com cana-de-açúcar na região de Humaitá, Amazonas, Brasil. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**. Recife, v. 8, n. 2, p. 305-310, 2013.

CANELLAS, L. P.; BERNER, P. G.; SILVA, S. G.; SILVA, M. B.; SANTOS, G. A. Frações da matéria orgânica em seis solos de uma topossequência no Estado do Rio de Janeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 35, p. 133-143, 2000.

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

CEPEA – CENTRO DE ESTUDOS AVANÇADOS EM ECONOMIA APLICADA. **PIB do agronegócio (dados de 1994 a 2013)**. 2014. Disponível em: <<http://www.cepea.esalq.usp.br/pib/>>. Acesso em: 15 jan. 2015.

CIOTTA, M. N.; BAYER, C.; FONTOURA, S. M. V.; ERNANI, P. R.; ALBUQUERQUE, J. A. Matéria orgânica e o aumento da capacidade de troca de cátions em solos com argila de baixa atividade sob plantio direto. **Revista Ciência Rural**, Santa Maria, v. 33, n. 6, p. 1161-1164, 2003.

CONAB – COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de grãos: 4º levantamento safra 2014/15**. Brasília: CONAB, 2015. v. 2.

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**, Campinas, v. 29, n. 5, p. 777-788, 2005.

DEBIASI, H.; FRANCHINI, J. C.; CONTE, O.; BALBINOT JUNIOR, A. A.; TORRES, E.; SARAIVA, O. F.; OLIVEIRA, M. C. N. **Sistemas de preparo do solo: trinta anos de pesquisas na Embrapa Soja**. Londrina: EMBRAPA CNPSO, 2013. (Documentos, 342).

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

FRANCHINI, J. C.; COSTA, J. M.; DEBIASI, H.; TORRES, E. **Importância da rotação de culturas para a produção agrícola sustentável no Paraná**. Londrina: EMBRAPA CNPSO, 2011. (Documentos, 327).

FRANCISCO, W. C. **Maiores países do planeta**. 2014. Disponível em: <<http://brasileSCO.la/b118909>>. Acesso em: 13 jan. 2015.

FREITAS, E. **Expansão da soja no Brasil**. 2014. Disponível em: <<http://brasileSCO.la/b6338>>. Acesso em: 13 jan. 2015.

FREITAS, J. R.; NASCENTE, A. S.; SANTOS, F. L. S. População de plantas de milho consorciado com *Urochloa ruziziensis*. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, Goiânia, v. 43, n. 1, p. 79-87, 2013.

FUENTES LLANILLO, R.; CANALLI, L. B.; DEBIASI, H.; LORENZON, A. R.; RALISCH, R.; BUBLITZ, U.; SKORA NETO, F.; BERTOL, O. J.; HARGER, N.; FRANCHINI, J.; SIQUEIRA, R. **Plantio direto em busca da qualidade**. Curitiba: Iapar: Itaipú, 2010.

GAUDARD, D. M. **O ciclo do carbono e o efeito estufa**. 2006. Disponível em <<http://www.cmqv.org/website/artigo.asp?cod=1461&idi=%201&moe=212&id=14257>>. Acesso em: 14 Jan. 2015.

GENRO JUNIOR, S. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M. Variabilidade temporal da resistência à penetração de um Latossolo Argiloso sob semeadura direta com rotação de culturas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 477-484, 2004.

GONTIJO NETO, G. F. **Benefícios e características da adubação verde na produção sustentável de alimentos**. 2013. Disponível em: <<http://rehagro.com.br/plus/modulos/noticias/ler.php?cdnoticia=2616>>. Acesso em: 20 jan. 2015.

HIRAKURI, M. H.; LAZZAROTTO, J. J. **Evolução e perspectiva do desempenho econômico associado com a produção de soja nos contextos mundial e brasileiro**. Londrina: EMBRAPA CNPSO, 2011. (Documentos, 319).

HICKMAN, 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**, Campina Grande, v. 6, n. 10, p. 1055-1061, 2012.

IBGE – INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **O IBGE apresenta nova área territorial brasileira: 8.515.767,049 km²**. 2012. Disponível em: <<http://cod.ibge.gov.br/2ceet>>. Acesso em: 13 jan. 2015.

MAPA – MINISTÉRIO DA AGRICULTURA, PECUÁRIA E ABASTECIMENTO. **4º levantamento de safra 2014/15**. 2015. (galeria multimídia áudio). Disponível em: <<http://www.agricultura.gov.br>> . Acesso em: 13 jan. 2015.

MARANGONI, L. E. **Um estudo sobre a evolução do setor sucroalcooleiro do estado de Pernambuco no aspecto econômico e ambiental no período de 2000 a 2009**. 2011. Monografia (Especialização em Educação Ambiental Urbana) - Escola Superior Aberta do Brasil, Vilhena, 2011.

MENDES, I. C.; REIS JUNIOR, F. B. **A saúde do solo e a sustentabilidade dos agroecossistemas**. Planaltina - DF: Embrapa Cerrados, 2010. Disponível em: <<http://www.cpac.embrapa.br/noticias/artigosmidia/publicados/187/>> . Acesso em: 25 jun. 2014.

MION, R. L.; NASCIMENTO, E. M. S.; SALES, F. A. L.; SILVA, S. F.; DUARTE, J. M. L.; SOUSA, B. M. Variabilidade espacial da porosidade total, umidade e resistência do solo à penetração de um Argissolo amarelo. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 33, n. 6, p. 2057-2066, 2012.

MORAES, M. T.; SILVA, V. R.; ZWIRTES, A. L.; CARLESSO, R. Use of penetrometers in agriculture: a review. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 34, n. 1, p. 179-193, Jan./Feb. 2014.

OLIVEIRA, E. M.; PIERANGELI, M. A. P.; SILVA, F. L.; SANTOS, F. A. S. Relação entre a matéria orgânica e a CTC efetiva de solos de áreas alagáveis da região sudoeste do estado de Mato Grosso. In: CONGRESSO DE INICIAÇÃO CIENTÍFICA, 5., 2013, Cáceres. **Anais...** Cáceres, UNEMAT, 2013. v. 8.

PACHECO, M. R. P. S.; HELENE, M. E. M. Atmosfera, fluxos de carbono e fertilização por CO₂. **Estudos Avançados**, São Paulo, v. 4, n. 9, 1990.

PAVAN, M. A.; BLOCH, M. F.; ZEMPULSKI, H. D.; MIYAZAWA, M.; ZOCOLER, D. C. **Manual de análises químicas do solo e controle de qualidade**. Londrina: IAPAR, 1992. (Circular, 76).

PRAGANA, R. B.; NÓBREGA, J. C. A.; MARTINS, R. N. L. Efeito do plantio direto sobre a resistência à penetração de de Latossolos Amarelos na região do cerrado piauiense. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE CIÊNCIA DO SOLO, 33., 2011, Uberlândia. **Anais...** Uberlândia, 2011.

PRIMO, D. C.; MENEZES, R. S. C.; SILVA, T. O. Substâncias húmicas da matéria orgânica do solo: uma revisão de técnicas analíticas e estudos no nordeste brasileiro. **Scientia Plena**, São Cristóvão, v. 7, n. 5, 2011.

RALISCH, R. **Análise comparativa do desempenho de três equipamentos de preparo de solo na descompactação de um Latossolo Roxo**. 1999. Tese (Doutorado em Agronomia - Energia na Agricultura) – Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho, Botucatu, 1999.

RALISCH, R.; MIRANDA, T. M.; OKOMURA, R. S.; BARBOSA, G. M. C.; GUIMARÃES, M. F.; SCOPEL, E.; BALBINO, L. C. Resistência a penetração de um Latossolo Vermelho Amarelo do cerrado sob diferentes sistemas de manejo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 12, n. 4, p. 381-384, 2008.

REINERT, D. J.; COLLARES, G. L.; REICHERT, J. M. Penetrômetro de cone com taxa constante de penetração no solo: desenvolvimento e teste de funcionalidade. **Revista Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 27, n. 1, p. 304-316, jan./abr. 2007.

RIGOLIN, I. M.; SANTOS, C. H.; CALONEGO, J. C.; TIRITAN, C. S. Estoque de carbono do solo em sistemas vegetais com manejo agrícola diferenciado no oeste paulista. **Colloquium Agrariae**, Presidente Prudente, v. 9, n. 2, p. 16-29, 2013.

SANTOS, H. G.; JACOMINE, P. K. T.; ANJOS, L. H. C.; OLIVEIRA, V. A.; LUMBRERAS, J. F.; COELHO, M. R.; ALMEIDA, J. A.; CUNHA, T. J. F.; OLIVEIRA, J. B. **Sistema brasileiro de classificação de solos**. 3. ed. Brasília: EMBRAPA, 2013. 353 p.

SANTOS, L. L.; LACERDA, J. J. J.; ZINN, Y, L. Partição das substâncias húmicas em solos brasileiros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 37, n. 4, p. 955-968, 2013.

SHAMMOT, S.; MCDONALD, L.; BARTHOLOMEW, W. V. Rhizodeposition of organic matter debris in soil. **Soil Science Society American Journal**, Madison, v. 32, n. 6, p. 817-820, 1968.

SIGNOR, D.; CERRI, C. E. P. Comparação entre metodologias para cálculo do índice de manejo de carbono do solo em São Luis – MA. In: REUNIÃO NORDESTINA DE CIÊNCIA DO SOLO, 1., 2013, Areia. **Anais...** Areia, UFPB, 2013.

SILVA, A. J. N.; CABEDA, M. S. V.; CARVALHO, F. G. Matéria orgânica e propriedades físicas de um Argissolo Amarelo Coeso sob sistemas de manejo com cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 10, n. 3, p. 579-585, 2006.

SILVA, E. F.; LOURENTE, E. P. R.; MARCHETTI, M. E.; MERCANTE, 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**, Brasília, v. 46, n. 10, p. 1321-1331, 2011.

SILVA, F. C. et al. (Ed.). **Manual de análises químicas de solos, plantas e fertilizantes**. 2. ed. Brasília: EMBRAPA, 2009. 627 p.

SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. S. Matéria orgânica do solo. In: NOVAIS, R. F.; ALVAREZ, V. H.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. **Fertilidade do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 2007. p. 275-374.

- SILVA, J. E.; LEMAINSKI, J.; RESCK, D. V. S. Perdas de matéria orgânica e suas relações com a capacidade de troca de catiônica em solos da região de cerrados do oeste baiano. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 18, n. 3, p. 541-547, 1994.
- SILVA, J. R.; CONCEIÇÃO, G. C.; PEREIRA, C. A.; OLIVEIRA, T. C. T.; FREITAS, M. S. C.; GIONGO, V.; GAVA, C. A. T.; SILVA, J. D. Estoque de carbono orgânico total em um Argissolo amarelo adubado com compostos orgânicos. In: FERTBIO 2012, 2012, Maceió. **Anais...** Maceió, 2012.
- SILVA, R. W. C.; PAULA, B. L. Causa do aquecimento global: antropogênico versus natural. **Terræ Didática**, Campinas, v. 5, n. 1, p. 42-49, 2009.
- SILVA, V. R. **Propriedades físicas e hídricas em solos sob diferentes estados de compactação**. 2003. 171 f. Tese (Doutorado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2003.
- SILVEIRA, D. C.; MELO FILHO, J. F.; SACRAMENTO, J. A. A. S.; SILVEIRA, E. C. P. Relação umidade versus resistência à penetração para um Argissolo Amarelo distrocoeso no recôncavo da Bahia. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 34, n. 3, p. 659-667, 2010.
- SOUZA, L. S.; SOUZA, L. D.; CARVALHO, J. E. B. Adubação verde na física do solo. In: LIMA FILHO, O. F. et al. (Ed.). **Adubação verde e plantas de cobertura no Brasil: fundamentos e prática**. Brasília: EMBRAPA, 2014. p. 335-369.
- SOUZA, Z. M.; ALVES, M. C. Propriedades físicas e teor de matéria orgânica em um Latossolo Vermelho de cerrado sob diferentes usos e manejos. **Acta Scientiarum: Agronomy**, Maringá, v. 25, n. 1, p. 27-34, 2003.
- STEINER, F.; PIVETTA, L. A.; CASTOLDI, G.; COSTA, M. S. S. M.; COSTA, L. A. M. Carbono orgânico e carbono residual do solo em sistema de plantio direto, submetido a diferentes manejos. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 6, n. 3, p. 401-408, 2011.
- STÜRMER, S. L. K.; ROSSATO, O. B.; COPETTI, A. C. C.; SANTOS, D. R.; CALEGARI, A.; BRUM, B. Variações nos teores de carbono orgânico em função do desmatamento e revegetação natural do solo. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 2, p. 241-250, 2011.
- SUZUKI, L. E. A. S. **Compactação do solo e sua influência nas propriedades físicas do solo e crescimento e rendimento de culturas**. 2005. 149 f. Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.
- TARDIEU, F. Growth and functioning of roots and to root systems subjected to soil compaction. Towards a system with multiple signaling. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v. 30, p. 217-243, 1994.
- TAVARES FILHO, J.; BARBOSA, G. M. C.; GUIMARÃES, M. F.; FONSECA, I. C. B. Resistência do solo à penetração e desenvolvimento do sistema radicular do milho (*Zea mays*) sob diferentes sistemas de manejo em um Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 25, n. 3, p. 725-730, 2001.

TAVARES FILHO, J.; RIBON, A. A. Resistência do solo à penetração em resposta ao número de amostras e tipo de amostragem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 32, p. 487-494, 2008.

VAZ, C. M. P.; PRIMAVESI, O.; PATRIZZI, V. C.; IOSSI, M. F. **Influência da umidade na resistência do solo medida com penetrômetro de impacto**. São Carlos: EMBRAPA CNPIA, 2002. (Comunicado Técnico, 51).

WATSON, R. T.; ZINYOWERA, M. C.; MOSS, R. H. **The regional impacts of climate change**. Cambridge: Intergovernmental Panel on Climate Change (IPCC), 1997. 517 p.

XAVIER, M. E. R.; KERR, A. S. A análise do efeito estufa em textos para-didáticos e periódicos jornalísticos. **Caderno Brasileiro de Ensino de Física**, Florianópolis, v. 21, n. 3, p. 325-349, 2004.