

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA
CAMPUS DE FREDERICO WESTPHALEN
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM AGRONOMIA: AGRICULTURA
E AMBIENTE

Felipe Bonini da Luz

**INDICADORES DA QUALIDADE DO SOLO EM FUNÇÃO DO USO DA
TERRA**

Frederico Westphalen, RS

2017

Felipe Bonini da Luz

INDICADORES DA QUALIDADE DO SOLO EM FUNÇÃO DO USO DA TERRA

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Agronomia: Agricultura e Ambiente, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Agronomia**.

Orientador: Prof. Dr. Vanderlei Rodrigues da Silva

Frederico Westphalen, RS

2017

Ficha catalográfica elaborada através do Programa de Geração Automática da Biblioteca Central da UFSM, com os dados fornecidos pelo(a) autor(a).

Bonini da Luz, Felipe
Indicadores da qualidade do solo em função do uso da terra / Felipe Bonini da Luz.- 2017.
88 p.; 30 cm

Orientador: Vanderlei Rodrigues da Silva
Coorientador: Julio Cezar Franchini
Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa Maria, Campus de Frederico Westphalen, Programa de Pós-Graduação em Agronomia - Agricultura e Ambiente, RS, 2017

1. Sistema Plantio Direto 2. Integração Lavoura Pecuária 3. Carbono orgânico do solo 4. Soil Management Assessment Framework I. Rodrigues da Silva, Vanderlei II. Franchini, Julio Cezar III. Título.

© 2017

Todos os direitos autorais reservados a Felipe Bonini da Luz. A reprodução de partes ou do todo deste trabalho só poderá ser feita mediante a citação da fonte.

Endereço: Linha Sete de Setembro s/n – BR 386, KM 40. Frederico Westphalen, RS, CEP 98400-000.

Fone: (0xx55) 99915 7648; Endereço eletrônico: boninisolos@gmail.com

Felipe Bonini da Luz

INDICADORES DA QUALIDADE DO SOLO EM FUNÇÃO DO USO DA TERRA

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-Graduação em Agronomia: Agricultura e Ambiente, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS) como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Agronomia**.

Aprovado em 31 de março de 2017:

Vanderlei Rodrigues da Silva, Dr. (UFSM)
(Presidente/Orientador)

Fabio Joel Kochem Mallmann, Dr. (URI)

Mauricio Roberto Cherubin, Dr. (USP)

Frederico Westphalen, RS

2017

*A todos os amigos, educadores, profissionais e estudantes das áreas de
agronomia*

DEDICO...

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela força espiritual nos momentos de angústia e de alegrias.

A Universidade Federal de Santa Maria, pelo incentivo a qualificação como servidor.

Ao Programa de Pós-Graduação em Agronomia- Agricultura e Ambiente por nos dar a condição de tornar-se mestre.

Ao Centro Nacional de Pesquisa em soja (EMBRAPA-Soja), pela oportunidade da realização desta pesquisa.

Ao Professor, amigo e orientador, Vanderlei Rodrigues da Silva pela confiança em trabalharmos juntos.

Aos pesquisadores da EMBRAPA-Soja Júlio Cezar Franchini e Henrique Debiasi pela dedicação em nos orientar.

Aos professores Clóvis Orlando Da Ros e Rodrigo Ferreira da Silva.

Aos colegas de trabalho Lucindo Somavilla, Marcela de Melo Torchelsen, Andreia Giovenardi, Paulo Bairros e Fernanda Volpato pelo auxílio nas análises laboratoriais.

A Clever Briedis (UEPG) e Murilo Veloso (UFRGS) pela orientação quanto ao fracionamento físico da matéria orgânica do solo.

Um forte agradecimento ao servidor da EMBRAPA- Soja Esmael Lopes dos Santos, pelo empenho e dedicação dada a mim, na realização deste trabalho. Assim como os servidores Donizete Loni, Idelfonso e Mariluci.

Aos examinadores da defesa desta dissertação. Em especial, a Mauricio Roberto Cherubin pela enorme contribuição neste trabalho, em relação ao Capítulo 3.

As estagiárias da Embrapa Angélica, Maiara e Natassia pelo auxílio nas coletas de solo a campo.

A grande ajuda motivacional, pelas coletas de solo e, suportar as noites mal dormidas, Carlos A. Bonini Pires.

Aos grandes amigos (eternos) Lucas Aquino Alves, Cícero Ortigara e Junior Melo Damian por todos os momentos vivenciados neste período de pós-graduação. Com certeza os melhores de nossas vidas.

Aos amigos Hazael S. Almeida, Ezequiel Koppe e Rosemar de Queiroz pela amizade por me acolher no momento em que estive com vocês.

A Família Gabbi (Nataniel, Romualdo, Rubens, Tia Maria) pelo acolhimento em um momento difícil.

Aos então diretores José Mario Doleys Soares (UFSM-CS) e Bráulio Otomar Caron (UFSM-FW), juntamente a Diego Ricardo Menegol.

Aos amigos Diego H. Simon, André L. Grolli, Rudinei de Marco, Laila M. Drebes, Paola D. Welter, Alex Negrini, José Alcides S. de Freitas, Luis Carlos Zanatta, fundamentais para aguentarmos o “tranco”. E, em especial a Daniel Aquino de Borba, por ser o braço direito em todos os momentos.

Com orgulho, satisfação e amor, faço este último agradecimento a minha Família, meus pais Alvarus M. e Cleonice, meus irmãos Marciane, Mônica, João Paulo e Cirineu, meus cunhados Jorge, Mauricio e Natalia, meus sobrinhos Gustavo, Camila, Sophia, Lorena e Sarah. Obrigado por acima de qualquer coisa e em todos os momentos, apoiarem e incentivarem os meus estudos. Este trabalho e este título é para vocês.

A todos, muito obrigado!

"Temos plena condição de não repetir os erros do passado no futuro uso da terra no Brasil"

Carlos Clemente Cerri

RESUMO

INDICADORES DA QUALIDADE DO SOLO EM FUNÇÃO DO USO DA TERRA

AUTOR: Felipe Bonini da Luz
ORIENTADOR: Vanderlei Rodrigues da Silva

A mudança de uso da terra (MUT), ou o uso da terra, tem sido responsável, globalmente, por grande parte das emissões de dióxido de carbono e pela degradação do solo. O aumento da demanda por bioenergia, tem ocasionado a expansão das áreas de cana-de-açúcar na região centro sul, principalmente em áreas que anteriormente eram usadas como pastagem, e o aumento da demanda por alimentos tem expandido as áreas de produção de grãos para solos marginais (ou seja, arenosos). Desta forma, a vegetação nativa deu lugar às áreas com pastagens e, posteriormente, as pastagens transformadas em lavouras para a produção de grãos ou bioenergia. Contudo, apesar do alto impacto econômico positivo para o país através da produção da soja e da cana-de-açúcar, não se tem conhecimento de como esta MUT está afetando os recursos e a qualidade do solo. Para isto, neste trabalho mensuramos indicadores para avaliar a qualidade do solo sob diferentes usos na região de transição tropical no Sul do Brasil. Foram avaliados quatro usos da terra (vegetação nativa, pastagem, cultivo com cana-de-açúcar e cultivo com soja) em três locais com condições de solo distintas. A hipótese testada neste trabalho foi que a intensificação da agricultura através do manejo das pastagens, do cultivo da soja em sistema plantio direto (SPD), integração lavoura pecuária (ILP) e da cana-de-açúcar melhoram a qualidade do solo. Amostras de solo foram coletadas em três camadas (0,0 – 0,10; 0,10 – 0,20; e 0,20 – 0,30 m) nos municípios de Londrina, Santo Inácio e São Jorge do Ivaí, região norte do PR. Foram analisados, em laboratório, atributos físicos, químicos, biológicos, estoques de carbono e nitrogênio do solo. Também foi calculado um índice de qualidade do solo (IQS) através da *Soil Management Assessment Framework* (SMAF). Os resultados apontam enorme potencial de sequestro de carbono no solo através do SPD, ILP e manejo das pastagens, principalmente nas áreas marginais em processo de expansão da agricultura no Brasil. Além disso, concluiu-se que o uso da terra com soja e cana-de-açúcar não induz degradação física e química do solo em relação a pastagem, porém o baixo estoque de carbono e nitrogênio no solo, e o menor IQS, orientam que a expansão da cana-de-açúcar deve ser evitada em solos arenosos.

Palavras-chave: Sistema plantio direto. Integração Lavoura Pecuária. Carbono orgânico do solo. *Soil Management Assessment Framework*.

ABSTRACT

SOIL QUALITY INDICATORS IN FUNCTION OF THE LAND USE

AUTHOR: Felipe Bonini da Luz

ADVISOR: Vanderlei Rodrigues da Silva

Land-use change (LUC) or land use has been largely responsible for a large part of carbon dioxide emissions and soil degradation. The increased demand for bioenergy has led to the expansion of sugarcane areas in the south-central region, especially in areas previously used as pasture, and increased demand for food has expanded the use of marginal soils (*i.e.*, sandy). In this way, the native vegetation gave place to the areas with pastures and, later, the transformed pastures in fields for the production of grains or bioenergy. However, despite the high positive economic impact for the country through the production of soybeans and sugarcane, it is not known how this LUC is affecting the resources and the quality of the soil. For this, in this work the indicators to evaluate soil quality under different land uses in the tropical transition region of southern Brazil were measured. Four land uses (native vegetation, pasture, sugarcane, and soybean) were evaluated in three sites with different soil conditions. The hypothesis tested in this study was that intensification of agriculture through pasture management, soybean cultivation under no-tillage system (NT), integrated crop-livestock system (ICLS) and sugarcane improved soil quality. Soil samples were collected in three layers (0.0 - 0.10, 0.10 - 0.20, 0.20 -0.30 m) in Londrina, Santo Inácio and São Jorge do Ivaí, northern- PR- Brazil. Physical, chemical, biological attributes, stocks of carbon and nitrogen were analyzed in the laboratory. A Soil Quality Index (SQI) was also calculated using the *Soil Management Assessment Framework* (SMAF). The results point to the enormous potential of soil carbon sequestration through NT, ICLS and pasture management, especially in the marginal areas in the process of agricultural expansion in Brazil. In addition, it was concluded that land use with soybean and sugarcane does not induce physical and chemical degradation of the soil in relation to pasture, but the low carbon and nitrogen inventory in the soil, and the lower SQI, the expansion of sugarcane should be avoided in sandy soils.

Keywords: No-tillage. Integrated crop- livestock system. Soil organic carbon. *Soil Management Assessment Framework*.

LISTA DE TABELAS

ARTIGO 1

Tabela 1 - Concentração de Carbono Orgânico do solo (COS), Nitrogênio Total (NT) e valores médios de densidade do solo (Ds) nas diferentes camadas em função do uso da terra. VN – Vegetação Nativa; PA – pastagem; CA – cana-de-açúcar; soja em sistema plantio direto (SPD) e rotação milho (SO1), soja em SPD com rotação trigo (SO2), soja em sistema de preparo convencional (SPC) com rotação milho (SO3), soja em SPC com rotação trigo (SO4) para Londrina, São Jorge do Ivaí e Santo Inácio, Paraná – Brasil.....	27
--	----

ARTIGO 2

Tabela 1 - Atributos de acidez do solo e CTC para as camadas de 0,0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m sob diferentes usos da terra (VN – vegetação nativa; PA – pastagem; CA – cana-de-açúcar; soja em sistema plantio direto (SPD) e rotação milho (SO1), soja em SPD com rotação trigo (SO2), soja em sistema de preparo convencional (SPC) com rotação milho (SO3), soja em SPC com rotação trigo (SO4) para Londrina, Santo Inácio e São Jorge do Ivaí, Paraná – Brasil.	49
Tabela 2 - Macronutrientes para as camadas de 0,0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m sob diferentes usos da terra (VN – vegetação nativa; PA – pastagem; CA – cana-de-açúcar; soja em sistema plantio direto (SPD) e rotação milho (SO1), soja em SPD com rotação trigo (SO2), soja em sistema de preparo convencional (SPC) com rotação milho (SO3), soja em SPC com rotação trigo (SO4) para Londrina, Santo Inácio e São Jorge do Ivaí, Paraná – Brasil.....	52
Tabela 3 - Atributos físicos do solo (Ds -densidade do solo, Pt – porosidade total, Ma-macroporosidade, Mi- microporosidade) para as camadas de 0,0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m sob diferentes usos da terra (VN – vegetação nativa; PA – pastagem; CA – cana-de-açúcar; soja em sistema plantio direto (SPD) e rotação milho (SO1), soja em SPD com rotação trigo (SO2), soja em sistema de preparo convencional (SPC) com rotação milho (SO3), soja em SPC com rotação trigo (SO4) para Londrina, Santo Inácio e São Jorge do Ivaí, Paraná – Brasil.	53

ARTIGO 3

Tabela 1 - Algoritmos de interpretação dos indicadores de qualidade do solo; pH (pH), P (mg dm ⁻³), K (mg dm ⁻³), COS (%) e Ds (Mg m ⁻³).....	70
Tabela 2 - Valores médios utilizados para calcular o SMAF para as camadas de 0,0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m sob diferentes usos da terra (VN – vegetação nativa; PA – pastagem; CA – cana-de-açúcar; SPD – soja sob sistema plantio direto; e SCM – soja em sistema de plantio convencional) em Londrina, Santo Inácio e São Jorge do Ivaí, Paraná – Brasil.	75
Tabela 3 - Scores dos indicadores de qualidade do solo para as camadas de 0,0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m sob diferentes usos da terra (VN – vegetação nativa; PA – pastagem; CA – cana-de-açúcar; SPD – soja sob sistema plantio direto; e SCM – soja em sistema de plantio convencional) em Londrina, Santo Inácio e São Jorge do Ivaí, Paraná – Brasil.	76

LISTA DE FIGURAS

ARTIGO 1

- Figura 1 – Localização geográfica dos locais de estudo no estado do Paraná, Brasil, destacando os principais grupos litológicos e perfil estratigráfico estudado. Fonte: MINEROPAR.....22
- Figura 2 - Cronologia de uso da terra nos locais de estudo em Londrina, São Jorge do Ivaí e Santo Inácio, Paraná23
- Figura 3 - Estoques de carbono e nitrogênio (Mg ha^{-1}) na camada de 0,0 – 0,30 m em função do uso da terra. Vegetação nativa (VN), pastagem (PA), cana-de-açúcar (CA), soja em sistema plantio direto e rotação com milho (SO1), soja em sistema plantio direto e rotação com trigo (SO2), soja em sistema de preparo convencional e rotação com milho (SO3), soja em sistema de preparo convencional e rotação com trigo (SO4) para Londrina, Santo Inácio e São Jorge do Ivaí, Paraná – Brasil.29
- Figura 4 - Índice de estratificação de carbono (IEC) em função do uso da terra. Vegetação nativa (VN), pastagem (PA), cana-de-açúcar (CA), soja em sistema plantio direto (SPD) e rotação milho (SO1), soja em SPD com rotação trigo (SO2), soja em sistema de preparo convencional (SPC) com rotação milho (SO3), soja em SPC com rotação trigo (SO4) em Londrina (A), São Jorge do Ivaí (B) e Santo Inácio (C), Paraná – Brasil.....31

ARTIGO 3

- Figura 1 - Funções de pontuação (scoring functions) para cada indicador de qualidade do solo avaliado nos diferentes sistemas de uso da terra, destacando os três locais de estudo. *As formas das curvas variam de acordo com o indicador, sendo: “mais é melhor” (more is better) para COS, P e K; “menos é melhor” (less is better) para Ds; e ponto ótimo (mid-point optimum) para pH do solo.....73
- Figura 2 - Índice de qualidade do solo e a contribuição ponderadas dos componentes químicos (SQ), físicos (SF) e biológicos (SB) do solo para as camadas de 0,0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m sob diferentes usos da terra (VN – vegetação nativa; PA – pastagem; CA – cana-de-açúcar; SPD – soja sob sistema plantio direto; e SCM – soja em sistema de cultivo mínimo) em Londrina, Santo Inácio e São Jorge do Ivaí, Paraná – Brasil.....79
- Figura 3 - Índice de qualidade do solo (a, c, e) e os scores dos componentes químicos, físicos e químicos do solo (b, d, f) para as camadas de 0,0-0,30 m sob diferentes usos da terra (VN – vegetação nativa; PA – pastagem; CA – cana-de-açúcar; e SPD – soja sob sistema plantio direto) em Londrina, Santo Inácio e São Jorge do Ivaí, Paraná – Brasil.81
- Figure 4 - Alterações na qualidade do solo (0,0-0,30 m) devido ao uso do solo (vegetação nativa, pastagem, cana-de-açúcar e agricultura sob plantio direto) no estado do Paraná, Brasil.....82

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO GERAL	15
2. ARTIGO 1: MUDANÇAS NOS ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO NO SOLO EM FUNÇÃO DO USO DA TERRA NA REGIÃO SUL DO BRASIL	18
2.1. RESUMO	18
2.2. ABSTRACT	18
2.3. INTRODUÇÃO	19
2.4. MATERIAIS E MÉTODOS	21
2.4.1. Descrição dos locais de estudo	21
2.4.2. Amostragem e coleta de solo	25
2.4.3. Variáveis determinadas	25
2.4.4. Análise dos dados	26
2.5. RESULTADOS	27
2.5.1. Londrina	27
2.5.2. São Jorge do Ivaí	30
2.5.3. Santo Inácio	30
2.6. DISCUSSÃO	32
2.7. CONCLUSÕES	37
2.8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	38
3. ARTIGO 2: ALTERAÇÕES DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS DO SOLO EM FUNÇÃO DO USO DA TERRA NA REGIÃO SUL DO BRASIL	43
3.1. RESUMO	43
3.2. ABSTRACT	43
3.3. INTRODUÇÃO	44
3.4. MATERIAL E MÉTODOS	45
3.4.1. Análises das propriedades químicas do solo	45
3.4.2. Análises das propriedades físicas do solo	46
3.4.3. Análise dos dados	47
3.5. RESULTADOS	47
3.5.1. Propriedades químicas do solo	47
3.5.2. Propriedades físicas do solo	50
3.6. DISCUSSÃO	54
3.6.1. Propriedades químicas do solo	54
3.6.2. Propriedades físicas do solo	56
3.6.3. Estratégias de manejo para sustentar/ melhorar a qualidade química e física do solo	58
3.7. CONCLUSÃO	59
3.8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	60
4. ARTIGO 3: SOIL MANAGEMENT ASSESSMENT FRAMEWORK (SMAF) COMO ESTRATÉGIA DE CARACTERIZAÇÃO DO USO DA TERRA	65
4.1. RESUMO	65
4.2. ABSTRACT	66
4.3. INTRODUÇÃO	66
4.4. MATERIAL E MÉTODOS	68
4.4.1. Indicadores analisados	68
4.4.2. Avaliação da qualidade do solo	69
4.4.3. Análise dos dados	71

4.5.	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	71
4.6.	CONCLUSÕES	83
4.7.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	83
5.	CONSIDERAÇÕES FINAIS.....	87
6.	REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	88

INTRODUÇÃO GERAL

A mudança de uso da terra (MUT), ou o uso da terra, tem sido responsável, globalmente, por grande parte das emissões de dióxido de carbono (CERRI et al., 2009) e pela degradação do solo, sendo resultado direto do aumento da população e do crescimento econômico (KARLEN; RICE, 2015). A região centro-sul do Brasil está passando pelo processo de MUT para a produção de bioenergia (cana-de-açúcar), principalmente em áreas que anteriormente eram usadas para pastagem (ADAMI et al., 2012, FRANCO et al., 2015). Nesta região, também está localizada uma das maiores áreas de produção de grãos (soja, milho e trigo) do país, a qual nos últimos 50 anos vêm passando pelo processo de MUT (WINGEYER et al., 2015). Desta forma, a vegetação nativa deu lugar às áreas com pastagens e, posteriormente as pastagens estão sendo (ou foram) transformadas em lavouras para a produção de grãos ou bioenergia.

Compreender e gerir a MUT é um desafio central para a sustentabilidade global (BARRETO et al., 2013). As pastagens ocupam 200 milhões de ha no Brasil, sendo que 70 % apresentam algum grau de degradação (DIAS-FILHO, 2014). Porém, ao intensificarmos os cultivos nas áreas degradadas, cria-se uma complexa relação entre os aumentos de rendimento e o uso da terra, sendo evidente e necessária uma investigação cuidadosa antes de tirar qualquer conclusão sobre o futuro do uso da terra no Brasil, pois dependerá do local e da atividade agrícola que se intensificará.

Atualmente áreas de solos leves (arenosos) tem sido incorporados ao processo produtivo de grãos, pastagens cultivadas e bioenergia no Brasil, sendo considerada a nova e última grande fronteira agrícola do país (DONAGEMMA et al., 2016). Estes solos são considerados mais susceptíveis a degradação, quando comparados a solos de textura mais fina (argilosos). Desta maneira, as estratégias mais promissoras para mitigar a degradação do solo são selecionar os usos apropriados da terra e melhorar as práticas de manejo do solo, aumentando os teores de matéria orgânica (KARLEN; RICE, 2015), além da adoção de uma abordagem holística e integrada para a gestão dos recursos e da qualidade do solo (LAL, 2015).

A ciência aponta que as investigações futuras devem ser direcionadas especialmente sobre áreas de pastagem, pois sua ocorrência é generalizada na paisagem tanto em clima temperado como tropical. Além disso, incertezas referentes a qualidade do solo em áreas de pastagem continuam a ser motivo de preocupação (HARRIS et al., 2015). Segundo Sá et al. (2017), o início da degradação do solo na América do Sul, desencadeado pela transformação

da vegetação nativa em pastagens, tem sido agravado pelo mau uso continuado do solo, e o manejo incorreto das pastagens degradadas.

O aumento da população, maior urbanização e renda disponível continuarão a aumentar a pressão sobre as terras agrícolas sul-americanas (WINGEYER et al., 2015). A melhor compreensão das diferenças regionais no solo e a quantificação das consequências potenciais das práticas de produção atuais são necessárias para assegurar que programas científicos resultem em recomendações de manejo que apoiem a intensificação da agricultura sem degradação adicional do solo. Também serão importante subsídio para aqueles que precisam tomar decisões que visem a sustentabilidade agrícola.

No entanto, as informações sobre as mudanças e os padrões de indicadores da qualidade do solo em função do uso da terra são limitadas em muitas regiões ao redor do globo. A grande variabilidade entre locais e sistemas agrícolas indica que é incorreto supor que os resultados de um local específico sejam necessariamente transferíveis (POWLSON et al., 2016) principalmente para condições de solos frágeis, como os arenosos. Por isto, neste trabalho medimos indicadores para avaliar a qualidade do solo sob diferentes usos na região de transição tropical no Sul do Brasil. Foram avaliados quatro usos da terra (vegetação nativa, pastagem, cultivo com cana-de-açúcar e cultivo com soja) em três locais com condições de solo distintas.

Estes usos da terra foram escolhidos devido as seguintes razões. De 1990 a 2011, a área utilizada para cultivo no Brasil cresceu cerca de 22%, sendo as culturas da soja, cana-de-açúcar e milho responsáveis por todo esse aumento, tornando-se cultivadas em 70% da área agrícola brasileira (LAPOLA et al., 2014). Em segundo lugar, as maiores degradações do solo visíveis no Brasil estão localizadas em áreas de pastagem, ao mesmo tempo que a produção de carne bovina segue crescente (BARRETO et al., 2013). Em terceiro, as culturas agrícolas de soja e milho constituem um impacto econômico positivo para os países da América do Sul (WINGEYER et al., 2015). Contudo, não se sabe ao certo como este impacto está afetando os recursos naturais e a qualidade do solo. Em quarto, porém não menos importante, o aumento da demanda por etanol fará o Brasil expandir as áreas de produção da cana-de-açúcar em 6,4 milhões de ha até 2021 (GOLDEMBERG et al., 2014), que ocorrerá predominantemente na região centro-sul do país. Além destas razões, existe carência de informações sobre a expansão da agricultura para solos arenosos, quanto a implantação de sistemas de produção que vise a busca de produtividade e melhoria da qualidade do solo (DONAGEMMA et al., 2016; REICHERT et al., 2016)

O uso da terra no Brasil deve ser guiado por princípios sólidos de sustentabilidade, uma vez que as alterações climáticas, a segurança alimentar e energética e a conservação da biodiversidade estão em pauta. Para que estes princípios sejam alcançados, promover e avaliar a qualidade do solo é a base para a gestão sustentável do uso da terra. A ciência utiliza vários métodos de avaliação da qualidade do solo, todos baseados em indicadores, podendo ser físicos (densidade e porosidade), químicos (acidez, concentração de nutrientes e saturação de bases) e biológicos (carbono orgânico do solo, atividade biológica). Desta maneira, este trabalho está estruturado em três capítulos, descritos a seguir.

O Capítulo 1 tem o objetivo de avaliar a resposta do solo quanto aos seus estoques de carbono e nitrogênio frente a diferentes usos da terra na região centro sul do Brasil.

No Capítulo 2 são discutidas as alterações das propriedades físicas e químicas do solo em função do uso da terra com o objetivo de testar a hipótese de que a intensificação da agricultura através do cultivo das culturas da soja ou cana-de-açúcar pode melhorar os parâmetros físicos e químicos do solo em relação à pastagem.

O terceiro capítulo tem objetivo de integrar atributos químicos, físicos e biológicos para avaliar a qualidade do solo em função do uso da terra através de um índice de qualidade do solo, utilizando a SMAF (Soil Management Assessment Framework).

2. ARTIGO 1: MUDANÇAS NOS ESTOQUES DE CARBONO E NITROGÊNIO NO SOLO EM FUNÇÃO DO USO DA TERRA NA REGIÃO SUL DO BRASIL

2.1. RESUMO

Os diferentes usos da terra afetam a dinâmica da matéria orgânica e o conteúdo de carbono e nitrogênio no solo, sendo influenciado pelas práticas de manejo e classe de solo. Dessa maneira, os objetivos deste estudo foram avaliar a resposta do solo quanto aos estoques de carbono e nitrogênio na vegetação nativa, pastagem, cultivo de cana-de-açúcar e cultivo de soja em três locais com diferentes classes de solo na região Sul do Brasil. A hipótese deste trabalho baseia-se que o cultivo de solos marginais (arenosos) através da aplicação de diretrizes do Plano ABC, como SPD, ILP e manejo das pastagens possam incrementar os estoques de carbono e nitrogênio no solo. Amostras de solo foram coletadas em três camadas (0,0 – 0,10; 0,10- 0,20; 0,20 -0,30 m) nos municípios de Londrina, Santo Inácio e São Jorge do Ivaí, região norte do PR e calculados os estoques de carbono orgânico, nitrogênio total e o índice de estratificação de carbono. Os usos da terra com soja cultivada em SPD, pastagem manejada com adubação e ILP apresentaram os maiores estoques de carbono principalmente no solo das áreas marginais (arenosas) em processo de expansão da agricultura no Brasil. Estes usos da terra correspondem a algumas das ações descritas no Plano ABC, para mitigação de gases de efeito estufa no Brasil. Os resultados deste trabalho orientam que a expansão das áreas de cana-de-açúcar na região centro sul devem ser evitadas em solos arenosos, pois devido a fragilidade destes, e revolvimento a cada implantação/renovação dos canaviais, demonstrou potencial para redução dos estoques de carbono, comprometendo a qualidade do solo.

Palavras-chave: Sistema plantio direto. Solos arenosos. Soja. Cana-de-açúcar.

PAPER 1: CHANGES IN CARBON AND NITROGEN STOCKS IN SOIL AS A FUNCTION OF LAND USE IN THE OF SOUTHERN BRAZIL

2.2. ABSTRACT

Land use affect the dynamics of organic matter, carbon and nitrogen content in the soil, being influenced by the management and soil class. The objectives of this study were to evaluate the soil response to carbon and nitrogen stocks in native vegetation, pasture,

sugarcane and soybean in three locations with different soil classes in the southern region of Brazil. The hypothesis of this study is that the cultivation of marginal (sandy) soils through the application of the ABC Plan guidelines, such as NT, ICLS and pasture management, may increase carbon and nitrogen stocks in the soil. Soil samples were collected in three layers (0.0 - 0.10, 0.10 - 0.20, 0.20 --0.30 m) in Londrina, Santo Inácio and São Jorge do Ivaí, northern PR and it was calculated the total nitrogen and carbon stocks and stratification ratio. Land uses with soybean cultivated in NT, pasture managed with fertilization and ICLS presented the largest carbon stocks mainly in the soil of the marginal (sandy) areas in the process of expansion of agriculture in Brazil. These land uses correspond to some of the actions described in the ABC Plan, for mitigation of greenhouse gases in Brazil. The results of this study suggest that the expansion of sugarcane areas in the south-central region should be avoided in sandy soils, because of their fragility, and a revitalization of each sugarcane planting / renewal, has shown the potential for reducing Carbon, compromising the soil quality.

Keywords: No-tillage. Sandy soils. Soybean. Sugarcane.

2.3. INTRODUÇÃO

O solo é um dos maiores reservatórios de carbono do planeta, por conter cerca de duas a três vezes mais carbono (C) do que aquele encontrado em toda a vegetação (LAL, 2008). Devido a importância do C orgânico do solo para o ambiente e à agricultura, muitos estudos, pesquisas e debates têm sido realizados ao redor do mundo (BRASIL, 2012; UNFCCC, 2015) para entender a dinâmica do C e sua influência no ambiente. O sequestro de carbono no solo é uma estratégia para alcançar a segurança alimentar através da melhoria da qualidade do solo e compensar as emissões globais de gases do efeito estufa (LAL, 2004)

A matéria orgânica do solo (MOS) desempenha um importante papel no balanço global do C, pois, em um cenário otimista, práticas de manejo do solo podem compensar até 8,9 % das emissões globais de CO₂ e os solos agrícolas possuem uma grande contribuição na fixação do carbono na MOS (SOMMER; BOSSIO, 2014). A América do Sul possui potencial para sequestrar 8,24 Pentagramas de C no solo, num cenário entre os anos de 2016 a 2050 através de usos da terra que contemplem o sistema plantio direto (SPD), a restauração das pastagens degradadas e o sistema de integração lavoura pecuária (ILP) (SÁ et al., 2017). Como estratégia de mitigação dos efeitos da emissão de gases, o governo brasileiro lançou em 2010 o programa Agricultura de Baixa emissão de Carbono - Plano ABC (BRASIL, 2012),

onde objetiva a expansão da área sob SPD, recuperação das pastagens degradadas, e implementação do sistema ILP, entre outros temas.

O uso da terra com pastagem no Brasil ocupa uma área de 200 milhões de ha, onde 70% apresenta algum grau de degradação (DIAS-FILHO, 2014). Estudos tem demonstrado que a intensificação produtiva destas áreas, além de aumentar a produtividade, pode aumentar a qualidade do solo (STRASSBURG et al., 2014). O SPD é um sistema de manejo do solo consolidado nas regiões tropicais em usos da terra para produção de grãos, proporcionando maior acúmulo de carbono no solo (CORBEELS et al., 2016), devido aos seus princípios de conservação, envolvendo o não revolvimento, cobertura permanente, rotação de culturas, além do balanço positivo entre entradas e saídas de C do sistema (SÁ et al., 2015). O sistema ILP surge como alternativa de manejo para recuperação de pastagens degradadas e implementação do SPD, através do consorcio com a produção de grãos, possuindo elevado potencial para elevar os estoques de carbono no solo (MACEDO, 2009)

O aumento da demanda por biocombustíveis faz com que áreas de cultivo de cana-de-açúcar estejam em plena expansão no Brasil (GOLDEMBERG et al., 2014), principalmente em áreas anteriormente utilizadas com pastagem na região centro sul do País (CHERUBIN, et al. 2015). Além disso, a consolidação da agricultura através da produção de grãos nessa região tem ocasionado a expansão do cultivo de grãos e cana-de-açúcar para solos marginais, ou seja, solos arenosos e frágeis (DONAGEMMA et al., 2016).

Elevada incerteza permanece, quanto a dinâmica do carbono, para muitos locais que sofrem com a mudança no uso da terra através da expansão da agricultura, sendo necessários testes de campo adicionais para conclusões mais eficientes (QIM, et al., 2016), principalmente em solos frágeis e arenosos (REICHERT et al., 2016). Isso porque modelos preditivos da dinâmica do C associados com a mudança do uso da terra são incapazes de refletir a diversidade de tipos de solos tropicais (BRUUN, et al., 2013), demonstrando a necessidade de estudos nas diversas regiões agrícolas.

A compreensão da dinâmica do carbono e da qualidade da matéria orgânica é crucial para avaliar a sustentabilidade dos sistemas agrícolas, visto que a melhoria do manejo do C parece ser a força motriz para resistir à degradação dos mesmos (REICHERT et al., 2016). O C tem sido utilizado como um indicador chave da qualidade do solo e importante mecanismo para a sustentabilidade agrícola (LAL, 2015). As avaliações de carbono orgânico total são eficazes na demonstração dos efeitos das práticas de manejo do solo (SILVA et al., 2016).

Entretanto, entender como está sendo a entrada de carbono e nitrogênio nos sistemas agrícolas frente as mudanças de uso da terra em solos marginais, principalmente em áreas

cultivadas com cana-de-açúcar (BRONDANI et al., 2016) e com culturas anuais (NOGUEIROL et al., 2014), pode fornecer informações importantes sobre a qualidade do solo em agroecossistemas tropicais (SANTOS et al., 2013), principalmente em solos arenosos (DONAGEMMA et al., 2016). Uma das maneiras para entender a entrada de C nos sistemas agrícolas é o cálculo da relação de estratificação de C, onde altas proporções de estratificação, podem ser bons indicadores da qualidade dinâmica do solo (FRANZLUEBBERS, 2002), refletindo na maior ciclagem e sequestro de C no solo (BRIEDES et al., 2012) podendo ser aplicados a condições de solos tropicais.

Para abordar a eficiência das práticas de manejo quanto ao acúmulo de C no solo nos locais de expansão da agricultura para produção de grãos e bioenergia propõe-se com este trabalho avaliar os estoques de C e nitrogênio (N) nos usos da terra sob vegetação nativa, pastagem natural e cultivada, cultivo de cana-de-açúcar e cultivo anual de soja em SPD, ILP e preparo convencional em diferentes solos com variações texturais. A hipótese deste trabalho baseia-se que o cultivo de solos marginais (arenosos) através da aplicação de diretrizes do Plano ABC, como SPD, ILP e manejo das pastagens possam incrementar os estoques de C e N no solo.

Neste intuito o objetivo deste trabalho foi avaliar as alterações nos estoques de carbono e nitrogênio do solo em diferentes usos da terra na região Sul do Brasil.

2.4. MATERIAIS E MÉTODOS

2.4.1. Descrição dos locais de estudo

Para o desenvolvimento deste estudo foram coletadas amostras de solo em três locais na região Norte do Estado do Paraná, Brasil, considerados ambientes de transição entre clima tropical e subtropical. Os três locais selecionados foram: (1) Londrina, situada a 620 m de altitude, cujas coordenadas geográficas são 23°12'S e 51°10'W, em solo argiloso originado da formação basáltica (>70% de argila); (2) São Jorge do Ivaí, situada a 600 m de altitude, cujas coordenadas geográficas são 23°19'S e 52°14'W, correspondendo a uma região de transição entre a formação Caiuá e a formação sobre basalto e (3) Santo Inácio, situado a 410 m de altitude, cujas coordenadas geográficas são 22°45'S e 51°50'W, em solo originado da formação sedimentar "Arenito Caiuá" (10% de argila), conforme a Figura 1.

Figura 1 – Localização geográfica dos locais de estudo no estado do Paraná, Brasil, destacando os principais grupos litológicos e perfil estratigráfico estudado. Fonte: MINEROPAR

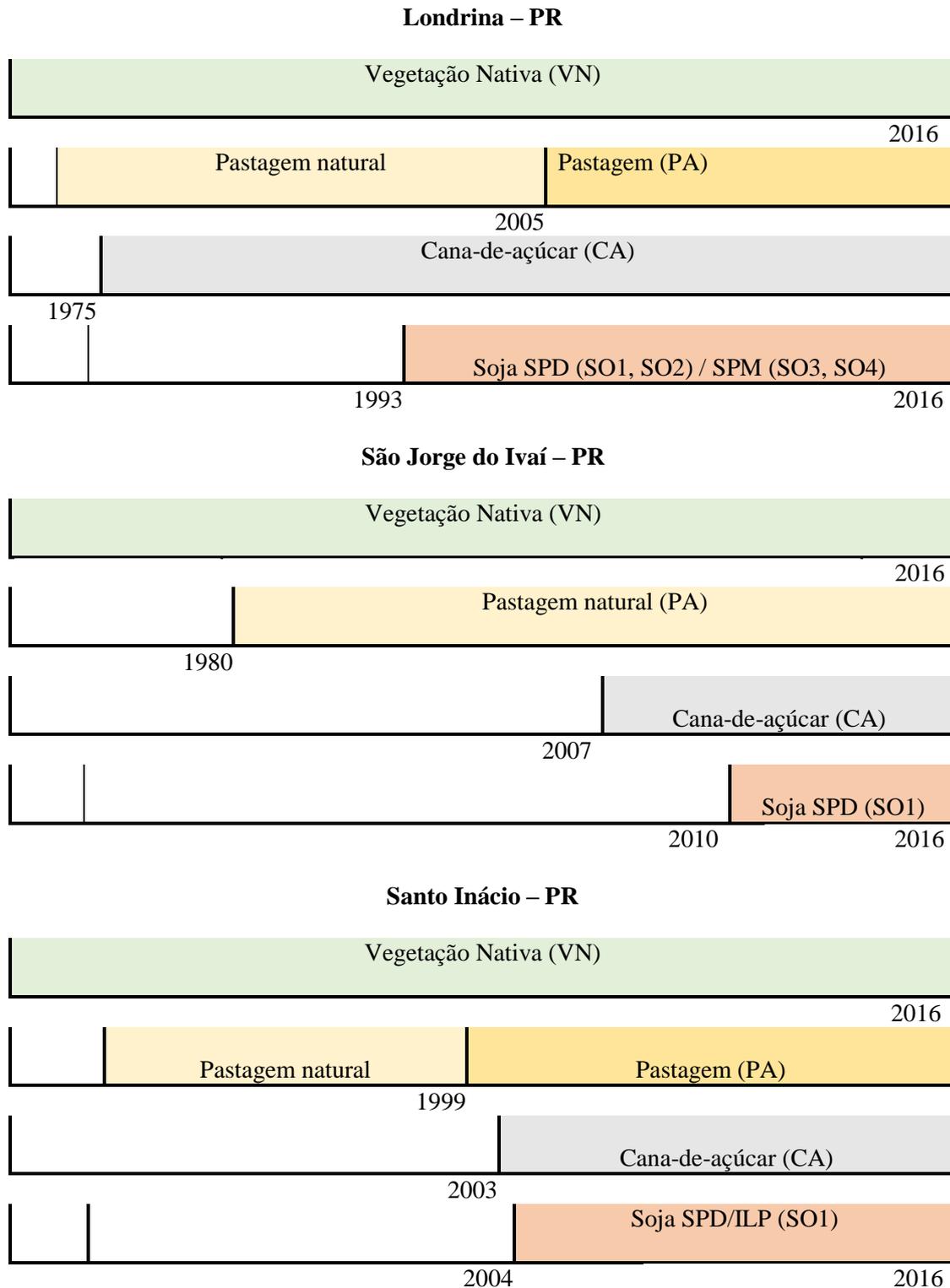


Nos três locais foram escolhidas áreas com os seguintes usos do solo: (A) Vegetação Nativa, (B) Pastagem, (C) Cultivo de Cana-de-açúcar, (D) Cultivo de Soja. A descrição detalhada de cada área é apresentada a seguir e a Figura 2 apresenta a cronologia de uso da terra para cada local.

2.4.1.1. Londrina

A área de estudo está localizada na fazenda experimental da Embrapa Soja. O solo é classificado como um Latossolo Vermelho Eutroférico com 75% de argila, 23% de silte e 2% de areia, formado a partir de basalto. O clima da região é considerado subtropical úmido (Cfa, segundo classificação de Köppen), com temperatura média anual de 20,7 °C e precipitação média anual de 1622 mm. A vegetação nativa consiste de uma vegetação sub-montana secundária e floresta estacional semidecidual composta por *Trichillia clausenii*, *Euterpe edulis* e *Aspidosperma polyneuron* como espécies dominantes (OLIVEIRA-FILHO; RATTER, 1995).

Figura 2 - Cronologia de uso da terra nos locais de estudo em Londrina, São Jorge do Ivaí e Santo Inácio, Paraná



A pastagem é cultivada com *Panicum maximum* cv. Tanzânia implantada em 2005 (anteriormente era pastagem natural), com adubação anual de 80 kg ha⁻¹ de N, sendo que no ano de 2013 foi aplicado 4 Mg ha⁻¹ de cama de frango. A carga animal média é 2,9 unidade

animal (UA) ha⁻¹. O cultivo da cana-de-açúcar foi instalado em 1975, com renovação feita a cada cinco anos. A última cana planta ocorreu em 2012, com a cultivar RB 5354, utilizando adubação de 250 kg ha⁻¹ do adubo 20-00-20 (formulado NPK) e aplicação de 2 Mg ha⁻¹ de cama de frango. O cultivo da soja corresponde a um experimento implantado em 1993, possuindo 23 anos no período das coletas de amostras deste trabalho. Em vez de apenas um uso da terra com soja, amostras foram coletadas em 4 usos: sistema plantio direto (SPD) com semeadura da soja no verão e após cultivo de milho segunda safra (SO1); SPD com semeadura da soja no verão e trigo no inverno (SO2); sistema de preparo convencional (SPC) com arado de disco e grade pesada antes da implantação de cada cultura, com semeadura da soja no verão e após cultivo de milho segunda safra (SO3); e SPC com arado de disco e grade pesada antes da implantação de cada cultura, com semeadura da soja no verão e trigo no inverno (SO4). Nos usos da terra com soja a adubação foi 320 kg ha⁻¹ de adubo 00-20-20 (formulado NPK), e nas culturas de milho e trigo foi de 250 e 150 kg ha⁻¹, respectivamente, de adubo 08-28-16.

2.4.1.2. São Jorge do Ivaí

A área de estudo está localizada na propriedade do Sr. Pedro Piveta. O solo é classificado como Latosso Vermelho-Escuro com 17% de argila, 8% de silte e 75% de areia, formado pela transição entre basalto e sedimentos da formação Caiuá. O clima da região é considerado subtropical úmido (Cfa, segundo classificação de Koppen), com temperatura média anual de 20 °C e precipitação média anual de 1329 mm. A vegetação nativa é similar a descrita para Londrina.

A Pastagem é considerada natural, do gênero *Cynodon spp.*, sem manejo de adubação, mas com baixa carga animal (1,5 UA ha⁻¹). A cana-de-açúcar foi implantada em 2007, onde a colheita é realizada sem queima. O uso da terra com soja iniciou em 2010, onde a área anteriormente possuía pastagem natural.

2.4.1.3. Santo Inácio

A área de estudo pertence a Estância JAE, de propriedade do Sr. Fernando Sichieri. O solo é classificado como Neossolo Quartzarenico com 10% de argila, 5% de silte e 85% de areia, formado de sedimentos mesozoicos (Figura 1), correspondendo a formação caiuá. O clima da região é considerado subtropical úmido (Cfa, segundo classificação de Koppen),

com temperatura média anual de 20 °C e precipitação média anual de 1500 mm. A vegetação nativa é similar a descrita para os demais locais.

O uso da terra com pastagem foi instalado em 1999, sendo composto por braquiária (*Brachiaria ruziziensis*). A pastagem recebe adubações anuais de 120 kg ha⁻¹ de nitrogênio, 80 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 80 kg ha⁻¹ de K₂O, utilizando carga animal média de 4 UA ha⁻¹. Em 2015 a braquiária foi substituída por grama tifton (*Cynodon spp*), permanecendo com a mesma adubação e carga animal. O uso da terra com cana-de-açúcar foi implantado em 2004, manejada sem queima, sendo o último plantio em 2014. O uso com soja é realizado SPD, juntamente com o sistema ILP implantado em 2003, onde no inverno é semeado braquiária, após a saída da soja. A soja é adubada com 70 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 90 kg ha⁻¹ de K₂O. Na braquiária é aplicado somente 60 kg ha⁻¹ de N. No momento da coleta este uso da terra possuía 13 anos de implantação.

2.4.2. Amostragem e coleta de solo

Amostras de solo foram coletadas em fevereiro de 2016, sendo que todas as amostras de um mesmo local foram coletadas no mesmo dia. A amostragem para cada local de uso da terra constituiu-se de 4 pontos amostrais distanciados 50 m entre si, compondo 12 pontos amostrais para cada local. As amostras de solo foram coletadas nas camadas de 0,0–0,10; 0,10–0,20; e 0,20–0,30 m e encaminhadas para análise em laboratório. Para as análises de carbono e nitrogênio, foram coletadas amostras deformadas em cada ponto e camada. Para determinação da densidade do solo foram coletadas amostras indeformadas em anéis volumétricos de 100 cm³ nas três camadas de solo.

2.4.3. Variáveis determinadas

2.4.3.1. Densidade do solo

A partir da coleta de solo em anéis volumétricos, no laboratório foi retirado o excesso de solo e realizada a limpeza externa dos anéis. Após, as amostras foram levadas para estufa, a 105 °C até atingir peso constante (aproximadamente 24 horas). Determinou-se a densidade dividindo-se a massa de solo seca pelo volume total do anel.

2.4.3.2. Conteúdo e estoques de carbono orgânico total

O conteúdo de carbono orgânico total foi determinado por combustão seca através do uso de um analisador elementar (*Flash 2000 Organic Elemental Analyzer*). Para calcular os

estoques de carbono total para cada uso de solo e camada de solo utilizou-se a seguinte expressão.

$$\text{Estoque de carbono (Mg ha}^{-1}\text{)} = \frac{(\text{C (g Kg}^{-1}\text{)} * \text{Ds(Mg m}^{-3}\text{)} * \text{prof(cm)})}{10}$$

Onde: C é o conteúdo de carbono do solo; Ds é a densidade do solo expressa em Mg m⁻³; prof é a extensão da camada avaliada em cm; e 10 é o fator de correção para área.

Os estoques de carbono foram corrigidos para massas equivalente de solo de acordo com Carvalho et al (2009) em cada camada analisada, corrigindo a espessura da mesma em relação a área de referência (neste trabalho considerada a vegetação nativa) conforme a seguinte expressão.

$$\text{EstC (Mg ha}^{-1}\text{)} = \frac{(\text{C (g Kg}^{-1}\text{)} * \text{Ds(Mg m}^{-3}\text{)} * \frac{\text{Dsref (Mg m}^{-3}\text{)}}{\text{Ds (Mg m}^{-3}\text{)}} * \text{e (cm)})}{10}$$

Onde: EstC é estoque de C orgânico em determinada profundidade (Mg ha⁻¹); Cs é o teor de C orgânico total na profundidade amostrada (g kg⁻¹); Ds é a densidade do solo na profundidade amostrada (Mg m⁻³); Dref é a densidade do solo para profundidade amostrada na área de referência (Mg m⁻³); e "e" é a espessura da camada considerada (cm).

Para o cálculo dos estoques de nitrogênio seguiu-se o mesmo procedimento realizado para o cálculo do estoque de carbono. O índice de estratificação de carbono (IEC) foi calculado dividindo a concentração de carbono da camada superficial (0,0–0,10 m) pela concentração média de C das camadas subsuperficiais, conforme Franzluebbbers (2002). A tabela 1 apresenta as concentrações médias de carbono e nitrogênio e valores médios de densidade do solo

2.4.4. Análise dos dados

Os dados foram testados quanto a normalidade pelo teste de Shapiro-Wilk (p<0,05). A análise de variância foi utilizada para testar os efeitos dos diferentes usos da terra sobre os estoques de carbono, nitrogênio e o IEC. Quando significativos, os valores dos resultados foram comparados usando o teste de Tukey (p<0,05). Para efeitos deste estudo cada local foi analisado separadamente, visto as diferenças entre os históricos das áreas. Todas as análises foram realizadas através do software R, versão 3.3.1 (R Core Team, 2016).

Tabela 1 - Concentração de Carbono Orgânico do solo (COS), Nitrogênio Total (NT) e valores médios de densidade do solo (Ds) nas diferentes camadas em função do uso da terra. VN – Vegetação Nativa; PA – pastagem; CA – cana-de-açúcar; soja em sistema plantio direto (SPD) e rotação milho (SO1), soja em SPD com rotação trigo (SO2), soja em sistema de preparo convencional (SPC) com rotação milho (SO3), soja em SPC com rotação trigo (SO4) para Londrina, São Jorge do Ivaí e Santo Inácio, Paraná – Brasil.

Uso da Terra	Londrina			São Jorge do Ivaí			Santo Inácio		
	COS	NT	Ds	COS	NT	Ds	COS	NT	Ds
	----g Kg ⁻¹ ----		Mg m ⁻³	----g Kg ⁻¹ ----		Mg m ⁻³	---g Kg ⁻¹ --		Mg m ⁻³
	0,0 - 0,10 m			0,0 - 0,10 m			0,0 - 0,10 m		
VN	41,36 a*	5,04 a	0,85 d	8,77 a	1,00 a	0,95 c	5,72 a	0,89 a	1,24 b
PA	26,65 bc	2,52 bc	1,14 c	6,32 ab	0,70 ab	1,44 b	6,82 a	0,91 a	1,58 a
CA	19,34 cd	1,95 bc	1,29 a	4,45 b	0,43 b	1,65 a	2,42 b	0,30 b	1,57 a
SO1 [§]	33,98 ab	3,24 b	1,29 a	5,19 ab	0,49 b	1,62 a	5,67 a	0,72 a	1,54 a
SO2	31,69 b	3,09 bc	1,21 b						
SO3	17,93 d	1,87 c	1,24 a						
SO4	19,00 cd	1,96 bc	1,21 b						
	0,10 - 0,20 m			0,10 - 0,20 m			0,10 - 0,20 m		
VN	20,77 a	2,42 a	1,05 c	5,78 a	0,78 a	1,37 c	4,20 ns	0,70 ns	1,50 b
PA	20,23 a	1,92 b	1,15 bc	5,65 a	0,61 ab	1,48 b	3,48	0,47	1,64 a
CA	16,85 ab	1,7 b	1,25 ab	2,49 b	0,28 b	1,78 a	2,65	0,17	1,61 a
SO1	14,40 b	1,64 b	1,28 a	3,35 b	0,33 b	1,72 a	4,89	0,79	1,69 a
SO2	15,55 ab	1,71 b	1,29 a						
SO3	18,43 ab	1,84 b	1,26 ab						
SO4	17,67 ab	1,78 b	1,27 a						
	0,20 - 0,30 m			0,20 - 0,30 m			0,20 - 0,30 m		
VN	18,04 a	2,04 a	1,12 c	4,86 a	0,65 a	1,38 c	4,60 ns	0,70 ns	1,43 b
PA	17,30 a	1,96 ab	1,11 c	5,03 a	0,51 ab	1,55 bc	2,87	0,50	1,66 a
CA	17,20 a	1,63 ab	1,31 a	2,76 b	0,30 b	1,79 a	2,80	0,86	1,69 a
SO1	12,59 b	1,43 b	1,19 bc	3,16 b	0,24 b	1,7 ab	4,05	0,48	1,68 a
SO2	14,70 ab	1,62 ab	1,23 b						
SO3	16,95 ab	1,81 ab	1,25 ab						
SO4	16,36 ab	1,80 ab	1,27 ab						

*Médias seguidas pela mesma letra em cada coluna dentro de cada profundidade não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

[§] Para Santo Inácio considerar soja em sistema de integração lavoura pecuária (ILP). Para São Jorge do Ivaí considerar soja sucessão soja.

2.5. RESULTADOS

2.5.1. Londrina

O maior estoque de C e N entre os tratamentos avaliados foi no uso da terra com vegetação nativa, com 78 e 9,1 Mg ha⁻¹, respectivamente, na camada de 0,0 – 0,30 m (Figura

3). Nos tratamentos pastagem (63 Mg ha^{-1}), cana-de-açúcar (53 Mg ha^{-1}), SO1 (58 Mg ha^{-1}), SO2 (60 Mg ha^{-1}), SO3 (54 Mg ha^{-1}) e SO4 (53 Mg ha^{-1}) não houve diferença significativa para o estoque de C, assim como para N, onde os valores para estes usos ficaram na faixa de $5,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ (Figura 3).

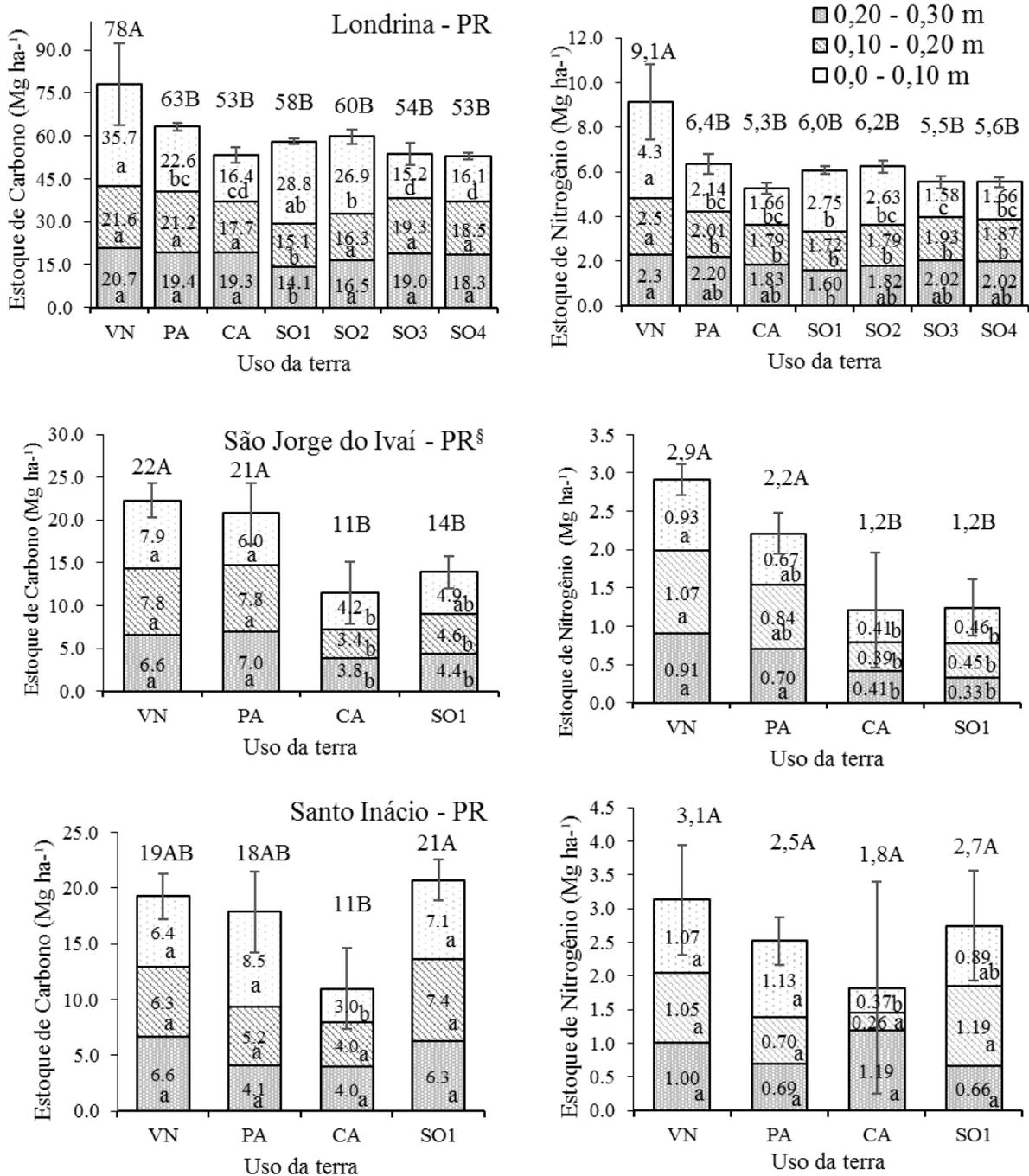
Quando analisados os estoques de C e N apenas na camada 0,0 - 0,10 m foi possível encontrar diferenças significativas mais acentuadas entre os usos da terra (Tabela 1). O estoque de C foi maior não só na vegetação nativa, como também no uso da terra cultivado com soja/rotação milho (SO1), seguido por soja/rotação trigo (SO2), ambos em sistema plantio direto e, posteriormente do uso com pastagem. Para a camada superficial, os usos da terra com cana-de-açúcar e soja cultivado em sistema de preparo convencional (SO3 e SO4) apresentaram os menores valores de estoque de carbono (Figura 3). O uso da terra SO3 apresentou estoque de C 48% inferior que o uso SO1, sendo o uso da terra SO4, 40% menor que o uso SO2. O uso da terra com cana – de – açúcar apresentou estoque de C 43% e 39% menor que os usos SO1 e SO2 respectivamente. Na camada de 0,0 – 0,10 m, o estoque de C na pastagem foi maior que nos usos SO3 e SO4.

Na camada superficial o estoque de N foi maior na vegetação nativa ($4,3 \text{ Mg ha}^{-1}$) (Figura 3), quando comparado aos demais usos da terra. O estoque de N foi maior no uso SO1 ($2,75 \text{ Mg ha}^{-1}$), quando comparado ao uso da terra SO3 ($1,58 \text{ Mg ha}^{-1}$) na camada de 0,0 – 0,10 m. Por sua vez, na camada de 0,10 - 0,20 m, o estoque de N foi maior na vegetação nativa, quando comparado aos demais usos da terra. Essa diferença visualizada na camada de 0,10 – 0,20 m, não foi observada na camada de 0,20 – 0,30 m, onde apenas o uso SO1 foi inferior a vegetação nativa e os demais usos igualando-se a vegetação nativa (Figura 3).

O uso da terra SO1 foi o único uso que apresentou menor estoque de C na camada de 0,10 – 0,20 m, quando comparado aos demais usos, possuindo $1,2 \text{ Mg ha}^{-1}$ de C a menos que o uso SO2 e $6,5 \text{ Mg ha}^{-1}$ a menos que a vegetação nativa (Figura 3). Na camada de 0,20 – 0,30 m o uso SO1 novamente apresentou estoque de C inferior aos demais usos da terra, com $14,1 \text{ Mg ha}^{-1}$. Os demais usos da terra na camada de 0,20 – 0,30 m apresentaram um estoque de C médio de $18,8 \text{ Mg ha}^{-1}$ (Figura 3).

O IEC (Figura 4) no solo argiloso de Londrina, demonstrou que os usos da terra vegetação nativa e sistema plantio direto (SO1 e SO2) estão apresentando maior entrada de carbono. Um valor de índice de estratificação de carbono superior a 2 é considerado adequado para um solo de alta qualidade (FRANZLUEBBERS, 2002). Os usos da terra com pastagem, cana-de-açúcar e soja em sistema de preparo convencional (SO3 e SO4) apresentaram valores inferiores a 2.

Figura 3 - Estoques de carbono e nitrogênio (Mg ha^{-1}) na camada de 0,0 – 0,30 m em função do uso da terra. Vegetação nativa (VN), pastagem (PA), cana-de-açúcar (CA), soja em sistema plantio direto e rotação com milho (SO1), soja em sistema plantio direto e rotação com trigo (SO2), soja em sistema de preparo convencional e rotação com milho (SO3), soja em sistema de preparo convencional e rotação com trigo (SO4) para Londrina, Santo Inácio e São Jorge do Ivaí, Paraná – Brasil.



*Médias seguidas pela mesma letra (maiúscula na camada de 0,0 – 0,30 m e minúsculas dentro de cada camada em função do uso da terra) não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). [§] Para Santo Inácio considerar soja em sistema de integração lavoura pecuária (ILP). Para São Jorge do Ivaí considerar soja sucessão soja.

2.5.2. São Jorge do Ivaí

Para a condição de um solo franco-arenoso, como é o caso de São Jorge do Ivaí, os usos da terra com cana-de-açúcar e soja apresentaram os menores estoques de C (11 e 14 Mg ha⁻¹ respectivamente) quando comparados aos estoques de C da vegetação nativa e a pastagem (22 e 21 Mg ha⁻¹, respectivamente) na camada de 0,0 – 0,30 m (Figura 3). Isso representa perda de 50,0 e 36,4 % no estocado de C do solo com o cultivo de cana-de-açúcar e soja em relação a vegetação nativa. Esse comportamento também é observado quando avaliada separadamente cada camada de solo (Figura 3), ressaltando-se que na camada de 0,0 - 0,10 m o uso da terra com soja apresentou um leve aumento dos estoques de C em relação ao uso da terra com cana-de-açúcar, porém, com valores não diferindo estatisticamente.

Da mesma forma que os estoques de C, os estoques de N em todas as camadas avaliadas foram mais elevados na vegetação nativa e na pastagem. Os seus valores, considerando a camada 0,0 – 0,30 m, correspondem a 2,9 e 2,2 Mg ha⁻¹ respectivamente, enquanto os usos da terra com cana-de-açúcar e soja correspondem a 1,2 Mg ha⁻¹.

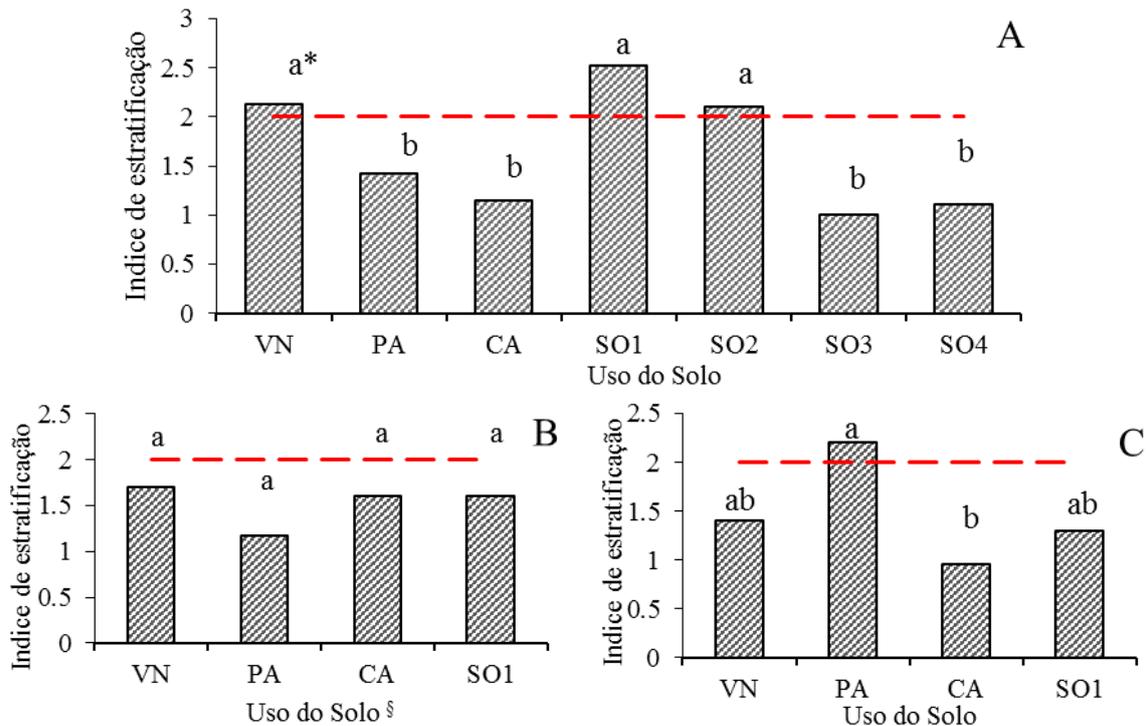
O IEC para esta condição de solo e ambiente foi inferior a 2 para todos os usos da terra (Figura 4), não havendo diferenças entre os usos. Isso demonstra que apesar do maior estoque de C nos usos com vegetação nativa e pastagem, a entrada de carbono nestes ambientes ainda pode melhorar para alcançar uma boa qualidade do solo.

2.5.3. Santo Inácio

Ao avaliar o uso da terra sobre a formação Caiuá na camada de 0,0 - 0,30 m foi encontrada diferença significativa no estoque de C (Figura 3) entre o uso da terra com soja (sistema ILP) e o uso da terra com cana-de-açúcar. O uso da terra com cana-de-açúcar apresentou estoque de C 45% menor que o uso SO1. Apesar da diferença de 7 Mg ha⁻¹ entre cana-de-açúcar e pastagem e 8 Mg ha⁻¹ entre a vegetação nativa e a pastagem não houve diferença significativa entre os estoques de carbono destes usos.

Quando analisada apenas a camada superficial do solo (0,0 -0,10 m), verifica-se o menor estoque de C no uso da terra com cana-de-açúcar (3,0 Mg ha⁻¹), possuindo 3,4 Mg ha⁻¹ de C a menos que a vegetação nativa, 5,5 Mg ha⁻¹ de C a menos que o uso com pastagem e 4,1 Mg ha⁻¹ menor que o uso da terra com soja (Figura 3). Ao contrário da camada superficial nas camadas de 0,10 – 0,20 m e 0,20 – 0,30 m não ocorreu diferenças significativas no estoque de C entre os usos da terra.

Figura 4 - Índice de estratificação de carbono (IEC) em função do uso da terra. Vegetação nativa (VN), pastagem (PA), cana-de-açúcar (CA), soja em sistema plantio direto (SPD) e rotação milho (SO1), soja em SPD com rotação trigo (SO2), soja em sistema de preparo convencional (SPC) com rotação milho (SO3), soja em SPC com rotação trigo (SO4) em Londrina (A), São Jorge do Ivaí (B) e Santo Inácio (C), Paraná – Brasil.



*Médias seguidas pela mesma letra para cada local não diferem entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) para cada local. § Para Santo Inácio considerar soja em sistema de integração lavoura pecuária (ILP). Para São Jorge do Ivaí considerar soja sucessão soja. Linha tracejada representa uma relação de referência a IEC igual a 2.

O estoque de N foi menor no uso da terra com cana-de-açúcar ($0,37 \text{ Mg ha}^{-1}$), quando comparado a vegetação nativa ($1,07 \text{ Mg ha}^{-1}$) e a pastagem ($1,13 \text{ Mg ha}^{-1}$) na camada de $0,0 - 0,10 \text{ m}$, e não diferiu significativamente do estoque de C do uso da terra com soja. Nas camadas de $0,10 - 0,20 \text{ m}$ não foram observadas diferenças entre os estoques de N dos usos da terra, assim como, quando avaliado a camada de $0,0 - 0,30 \text{ m}$.

Para as condições do arenito Caiuá em Santo Inácio, o uso da terra com pastagem foi o único a apresentar IEC superior a 2 (Figura 4), porém este valor não foi significativamente diferente dos valores encontrados na vegetação nativa e no uso da terra com soja, os quais foram inferiores a 2. O IEC da pastagem foi significativamente maior apenas que o IEC obtido no uso da terra com cana-de-açúcar.

2.6. DISCUSSÃO

O maior estoque de C no solo argiloso ocorre devido a interação organo-mineral entre as partículas de argila e grupos funcionais da MOS, visto que a maior parte do carbono armazenado nos solos tropicais encontra-se associado a fração mineral (CONCEIÇÃO et al., 2013). Além disso, o C pode ser armazenado no interior de micro e macroagregados (SIX et al., 2004). Porém a dificuldade da formação de agregados em solos arenosos restringe a possibilidade do acúmulo de carbono por oclusão (DIECKOW et al., 2009), como é o caso dos solos de Santo Inácio e São Jorge do Ivaí.

Concomitante com a interação organo-mineral, o histórico e atual uso da terra também determinam em grande parte a direção e a magnitude da mudança do C (QIN et al., 2016). Assim, o maior acúmulo de carbono é reflexo do tempo do uso da terra, da consolidação de cada sistema e do equilíbrio entre entradas e saídas de carbono. Em Londrina, onde os históricos de uso da terra possuem longa duração, foi verificado que a ação antrópica ocasionou perdas de carbono no solo quando a vegetação nativa foi substituída por agroecossistemas, ao avaliarmos todo o perfil aqui apresentado (0,0 - 0,30 m). Resultados semelhantes foram reportados anteriormente por Sá et al. (2001), Cerri et al. (2007) e Franco et al. (2015).

Os resultados deste estudo sugerem que os efeitos do uso da terra sobre a dinâmica da MOS e estoques de C é mais acentuada nos primeiros 10 cm de solo, onde é possível verificar diferenças significativas entre os usos, conforme apresentado na Figura 3 para Londrina, São Jorge do Ivaí e Santo Inácio, respectivamente. Em Londrina destaca-se o maior estoque de carbono na superfície do solo nos sistemas SO1 e SO2, onde a soja é cultivada em SPD a 23 anos. Estes resultados estão de acordo com Corbeels et al. (2016), onde observou maior acúmulo de C na camada superficial em relação as camadas mais profundas.

A intensificação da agricultura através do cultivo de grãos na região centro sul do Brasil, quando realizada sem a perturbação do solo, através do SPD, tem contribuído para aumentos nos estoques de C. Avaliando o impacto do SPD no acúmulo de carbono em comparação ao SPC e a pastagem, em um Argissolo com 22 % de argila, Souza et al. (2014) encontraram maior acúmulo de C no SPD na camada de 0,0 - 0,10 m. Porém, não observaram acúmulo na camada de 0,0 - 0,20 m em um SPD consolidado com 18 anos utilizando milho como cultura principal. O sequestro de C no solo sob SPD foi calculado por Corbeels et al. (2016) na camada de 0 – 40 cm, onde observaram um acúmulo variando de 1,48 a 1,61 Mg ha ano⁻¹ para solos com 55 a 73 % de argila da região do Cerrado, resultado de um balanço

positivo entre entradas e saídas de C no sistema. Para solos argilosos das regiões subtropicais brasileiras esta taxa de acúmulo pode ser obtida se considerar a camada de 0 – 100 cm (BODDEY et al., 2010) e quando considerada a camada de 0 – 30 cm a taxa de acúmulo é reduzido para 0,59 Mg ha ano⁻¹ (SÁ et al., 2015), porém sendo o saldo positivo.

A adoção do SPD por um período superior a 12 anos foi eficiente na recuperação do C, chegando a atingir valores iguais a vegetação nativa em Latossolos franco-argilosos da região do cerrado brasileiro (SIQUEIRA NETO et al., 2010), sugerindo o SPD como uso da terra para o controle dos processos de degradação da MOS e na mitigação das alterações climáticas. Balota et al. (2015) identificaram que o SPD na região Sul do Brasil, é o uso da terra que mais se aproxima da vegetação nativa em termos de acúmulo de C, apresentando vasto potencial para restabelecer a resiliência do solo após a conversão da vegetação nativa para o uso agrícola, através do seu fluxo contínuo de carbono no sistema (SÁ et al., 2015). Assim, o potencial de acúmulo de C no SPD depende da entrada de material vegetal e do correto manejo do sistema, não apenas de uma simples conversão do SPC para o SPD (CONCEIÇÃO et al., 2013).

Novelli et al. (2017) avaliaram a cultura da soja em diferentes sistemas de rotação de culturas e apontaram que rotações mais complexas, envolvendo no mesmo sistema soja, trigo e milho, favorece o incremento de C, e que em rotações mais simples, como por exemplo, apenas soja e trigo, este incremento é menor. Nos resultados deste estudo não foi possível verificar diferenças significativas nos estoques de C entre os usos SO1 e SO2 em Londrina, apesar do uso com milho apresentar um leve incremento na camada de 0,0 - 0,10 m (2,2 Mg ha⁻¹), provavelmente devido ao maior aporte de material vegetal (KUMAR et al., 2016) desta cultura em comparação ao trigo.

Os efeitos ocasionados pelo SPD sobre o estoque de C são reversíveis a medida em que o preparo convencional é adotado novamente, pois a respiração do solo aumentará e o carbono anteriormente sequestrado será liberado como CO₂ (PAUSTIAN et al., 2000). O cultivo convencional compromete a estrutura do solo, expondo a fração lábil da MOS a oxidação por microrganismos, interrompe a proteção física do C dentro dos macroagregados (SALVO et al., 2014), além de contribuir com a perda de C através da erosão do solo, afetando assim, os estoques de carbono no solo. Zinn et al. (2005) apontaram que os sistemas com revolvimento no solo no Brasil causaram perdas de 6,74 Mg ha⁻¹, ou 10,3 % do estoque de carbono antecedente na camada de 0 - 0,20 m. No presente estudo, os resultados indicam que os usos do solo com revolvimento anual (Cana-de-açúcar, SO3 e SO4 em Londrina; e cana-de-açúcar em São Jorge do Ivaí e Santo Inácio) obterão perda de 9 a 10 Mg ha⁻¹ de C na

camada de 0,0 - 0,30 m, quando comparado as áreas de pastagem, podendo chegar a uma perda de até 25 Mg ha⁻¹ quando comparado a vegetação nativa em Londrina, 10 Mg ha⁻¹ em São Jorge do Ivaí e 8 Mg ha⁻¹ em Santo Inácio, como pode ser visto na Figura 3.

Altas proporções de estratificação de carbono (>2) podem ser bons indicadores da qualidade dinâmica do solo e correlacionados com o maior acúmulo de C (FRANZLUEBBERS, 2002). Os resultados deste trabalho reportam que para a condição de solo argiloso (Londrina), os usos da terra que apresentaram índices superiores a 2 foram a vegetação nativa e o SPD. Resultados semelhantes foram encontrados por Kushwa et al. (2016) em SPD consolidado a 12 anos, onde apontaram também, maior relação de estratificação de C no SPD, com valores superiores a 2,0. Figueiredo et al. (2010) mencionam que o cultivo convencional através do arado degrada a qualidade do solo e diminui o índice de estratificação de carbono, pois, o rompimento da estrutura do solo expõe a MOS aos processos de decomposição microbiana, ocasionando a redução do C na superfície do solo. Esta abordagem pode ser vista neste trabalho também, onde SO3, SO4 e cana-de-açúcar (usos da terra com operações de revolvimento do solo) apresentaram IEC inferior a 2 (1,2, 1,3 e 1,2 respectivamente). Além disso, valores próximos ou inferiores a um indicam perda da qualidade do solo (SALTON et al., 2014).

O IEC foi relatado por Sá e Lal (2009) como um eficiente indicador do acúmulo de C a longo prazo no SPD na região Sul do Brasil. Os autores concluíram que o uso da terra cultivado sob SPD atinge valores de IEC variando de 1,64 a 2,61, e quando cultivado com preparo convencional estes valores reduzem para 1,12 a 1,51 em áreas com histórico de 22 anos de cultivo. Estes valores se enquadram nos resultados encontrados neste trabalho e são dados importantes para o desenvolvimento de estratégias locais e regionais na consolidação do SPD. Além disso, segundo Maia et al. (2010), mais importante que a adoção do SPD é a sua manutenção, que pode criar um aumento significativo no estoque de C do solo.

Segundo o presente trabalho, o uso da terra com pastagem pode ser eficiente no acúmulo de carbono em solos arenosos (Santo Inácio e São Jorge do Ivaí). Porém, este carbono está fracamente estabilizado. Assim, necessitando de uma intensificação do sistema de produção com controle de lotação animal, aplicação de corretivos e fertilizantes, para manter ou aumentar o aporte de C no solo, consolidando o sistema (SILVEIRA et al., 2014). Esta condição é visualizada em Santo Inácio, onde o IEC na pastagem foi maior que os demais usos da terra e superior a 2, devido ao não revolvimento do solo, manejo de pragas e plantas daninhas, utilização de espécie forrageira com alta produtividade, bem como, a realização do manejo da correção do solo com aplicação de calcário e adubação com uso de

fertilizantes. Estes resultados corroboram com Figueiredo et al. (2013), onde as pastagens mostraram ser excelente opção para aumentar o teor de carbono, principalmente através da matéria orgânica particulada. Quando a pastagem é bem manejada, sem revolvimento do solo, favorece a maior densidade de raízes, resultando num “efeito rizosférico”, ou seja, maior disponibilidade de substratos orgânicos para as comunidades microbianas disponibilizados pelas raízes (OLIVEIRA et al., 2001), conseqüentemente aumentando os estoques de C.

A conversão da vegetação nativa para pastagem pode aumentar os estoques de carbono, em condições de solo arenoso (FERREIRA et al., 2016). O sistema radicular denso das gramíneas contribui para redução da densidade do solo e erosão, protegendo de certa forma o C no solo (RASSE et al., 2005; REICHERT et al., 2016). Os resultados deste trabalho respaldam que nas condições de solo arenoso não houve diferença significativa entre a vegetação nativa e a pastagem nos estoques de carbono. Contudo, em Santo Inácio, mesmo não diferindo significativamente, foi observado um decréscimo no estoque de carbono quando avaliado a camada de 0,0 - 0,30 m (Figura 3). Entretanto, neste mesmo local observa-se uma maior entrada de carbono na pastagem na camada de 0,0 - 0,10 m (Figura 3 e Figura 4). Resultados semelhantes foram encontrados por Durigan et al. (2017), em que a conversão da vegetação nativa em pastagens não resultou em perdas significativas do estoque de carbono em estudo realizado no bioma amazônico, principalmente devido a introdução de gramíneas tropicais perenes e a sua capacidade de adicionar carbono ao solo.

Entretanto, ao mesmo tempo em que as pastagens podem acumular carbono, também podem aumentar as taxas de liberação de CO₂ para a atmosfera (CARVALHO et al., 2010). Isso porque o manejo típico das pastagens em climas tropicais é caracterizado por processos de degradação do solo, com alta infestação de plantas daninhas, erosão devido ao solo parcialmente nu e baixa produtividade de forragem (MAIA et al., 2009). Salientamos que nos locais analisados neste estudo as pastagens não foram consideradas degradadas e não refletem áreas extensivas.

Os resultados encontrados neste trabalho discordam de Assad et al. (2013), que orienta a não utilização de solos arenosos com pastagem quando se busca níveis de carbono próximos ao da vegetação nativa. Em dois locais do presente estudo os teores de argila foram inferiores a 20% (Santo Inácio e São Jorge do Ivaí) e o estoque de C da vegetação nativa não diferiu significativamente da pastagem. Os resultados deste estudo sustentam que os usos da terra com cana-de-açúcar nas áreas arenosas são potencialmente mais prejudiciais a qualidade do solo que o uso com pastagens, com relação ao acúmulo de carbono, corroborando com resultados encontrados por Franco et al. (2015) e Melo et al. (2014), ao considerarem a

camada de 0 – 30 cm. Por outro lado, quando considerada a camada de 0 – 100 cm pode haver maior acúmulo de carbono na cana-de-açúcar quando comparada a pastagem (OLIVEIRA et al., 2016). Porém, destaca-se que quando as pastagens são bem manejadas, com adubações, controle da carga animal, e em alguns casos irrigação, esta realidade se inverte (STRASSBURG et al., 2014). Da mesma forma, se a cana-de-açúcar, em vez de ser manejada em cultivo convencional, como é feito hoje na maioria dos casos, for manejada em um sistema de cultivo mínimo, com menos arações e menor intensidade de preparo do solo, grande parte da perda de carbono poderia ser evitada (SILVA-OLAYA et al., 2013).

O uso da terra com soja em sistema ILP favoreceu o acúmulo de carbono em solo arenoso na área de Santo Inácio. Estes resultados estão de acordo com Boeni et al. (2014) em estudo realizado no cerrado brasileiro num experimento de 11 anos, onde as condições de solo eram similares as de Santo Inácio. Estes resultados justificam-se devido a maior adição de biomassa ocasionada pela braquiária e pelo seu extenso e vigoroso sistema radicular (SILVA et al., 2016). Os sistemas agropecuários integrados podem garantir a intensificação sustentável da agricultura, promovendo o aumento da produção de alimentos, fibras e energia (MORAES et al., 2014a), além de contribuir no acúmulo de C no solo (SÁ et al., 2017). Este incremento no acúmulo de carbono ocasionado pela ILP é notado quando analisamos o uso da terra com soja em São Jorge do Ivaí (Figura 3), local em que a soja é cultivada sem ILP, onde o estoque de carbono foi cerca de 33% menor que em Santo Inácio (Figura 3).

O uso da terra com sistemas de produção de soja sob SPD juntamente com ILP podem resultar em acúmulo de carbono. No entanto, a magnitude deste acúmulo depende das culturas introduzidas no plano de rotação, das condições edafoclimáticas e do tempo de adoção do sistema (CARVALHO et al., 2010). Além disso, a ILP reduz a emissão de gases de efeito estufa por unidade de produção e consequentemente favorece o sequestro de C no solo (SALTON et al., 2014). Por melhorar a qualidade do solo a ILP é um sistema de manejo adequado e recomendado para as regiões tropicais (SALTON et al., 2014) e subtropicais (MORAES et al., 2014b) e, com base nos resultados encontrados neste trabalho, é indicado para solos arenosos em processos de expansão da agricultura. Estes resultados corroboram com Donagemma et al. (2016), onde apontaram o potencial da utilização de gramíneas forrageiras, em especial a braquiária, em rotação/sucessão com lavouras de grãos a fim de aliviar os processos de degradação dos solos arenosos no Brasil.

O menor estoque de N nos usos da terra com pastagem, cana-de-açúcar e soja em relação a vegetação nativa é um padrão comum observado para diferentes manejos em várias regiões do Brasil. Estas perdas estão relacionadas com o menor acúmulo de C nestes usos em

relação a vegetação nativa (GROPPO et al., 2015). Entretanto, a adição de N no solo pela cultura da soja através da fixação biológica, assim como a maior deposição de material vegetal na superfície do solo através do SPD, resulta num acréscimo de N. Este maior acúmulo pode ser visto, para a condição de Santo Inácio, onde estoque de N no uso da terra com soja não diferiu dos estoques da vegetação nativa e da pastagem, bem como em Londrina, quando analisado o uso da terra com soja em SPD na camada superficial.

Em síntese, os presentes resultados sustentam que a análise do uso da terra deve ser feita separadamente em função da classe de solo, principalmente com relação ao seu teor de argila. Pois, quando analisamos os usos da terra em Londrina, numa condição de solo muito argiloso, observamos que o cultivo da cana-de-açúcar após a conversão da vegetação nativa ocasionou uma perda de $0,59 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ de carbono no solo em 42 anos. Estes resultados assemelham-se aos encontrados por Sá et al. (2015), onde a conversão da vegetação nativa em agroecossistemas levaram a um decréscimo de $0,58 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ em solo argiloso da região de Ponta Grossa, PR. Por outro lado, observamos que o SPD, comparado ao cultivo convencional, apresenta uma taxa de acúmulo de C no solo na faixa de $0,25 \text{ Mg ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$ maior, tendo como base o histórico de 23 anos de uso da terra em Londrina. Por sua vez, nos solos com baixo teor de argila, como é o caso de Santo Inácio e São Jorge do Ivaí, o uso da terra com pastagem e ILP favoreceu o acúmulo de carbono, não diferindo da vegetação nativa, sendo o uso da cana-de-açúcar potencialmente prejudicial à qualidade do solo através do acúmulo reduzido de carbono. Para estas áreas seria indicado o uso da terra em sistemas integrados de produção, que aliam SPD, a produção de grãos e gramíneas forrageiras anuais.

2.7. CONCLUSÕES

Os estoques de carbono e nitrogênio são alterados em função do uso da terra. Os usos da terra com soja cultivada em sistema plantio direto, pastagem manejada com adubação e sistema de integração lavoura pecuária apresentaram os maiores estoques de carbono no solo. Estes usos da terra correspondem a algumas das ações descritas no Plano ABC, para mitigação de gases de efeito estufa no Brasil. Os resultados deste estudo demonstraram o enorme potencial de sequestro de carbono através destas práticas de manejo, principalmente no solo das áreas marginais (arenosas) em processo de expansão da agricultura no Brasil.

Os resultados deste trabalho orientam que a expansão das áreas de cana-de-açúcar na região centro sul do Brasil devem ser evitadas em solos arenosos, pois devido a fragilidade

destes, e revolvimento a cada implantação/renovação dos canaviais, demonstrou potencial para redução dos estoques de carbono, comprometendo a qualidade do solo

2.8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ASSAD, E. D. et al. Changes in soil carbon stocks in Brazil due to land use: paired site comparisons and a regional pasture soil survey. **Biogeosciences**, v. 10, p. 6141–6160, 2013.

BODDEY, R. M. et al. Carbon accumulation at depth in Ferralsols under zero-till subtropical agriculture. **Global Change Biology**, v. 16, p. 784-795, 2010.

BALOTA, E. L. et al. Soil Quality in Relation to Forest Conversion to Perennial or Annual Cropping in Southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, p. 1003-1014, 2015.

BOENI, M. et al. Organic matter composition in density fractions of Cerrado Ferralsols as revealed by CPMAS ¹³C NMR: Influence of pastureland, cropland and integrated crop-livestock. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 190, p. 80-86, 2014.

BRANDANI, C. B. et al. Soil organic and organomineral fractions as indicators of the effects of land management in conventional and organic sugar cane systems. **Soil Research**, 2016.

BRASIL. **Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura** © Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2012.

BRIEDES, C. et al. Particulate soil organic carbon and stratification ratio increases in response to crop residue decomposition under no-till. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 36, p. 1483-1490, 2012.

BRUUN, T. B. et al. Organic carbon dynamics in different soil types after conversion of forest to agriculture. **Land Degradation Development**, v. 26, p. 272-283, 2013.

CARVALHO, J. L. N. et al. Carbon sequestration in agricultural soils in the Cerrado region of the Brazilian Amazon. **Soil & Tillage Research**, v. 103, p. 342–349, 2009.

CARVALHO, J. L. N. et al. Impact of pasture, agriculture and crop-livestock systems on soil C stocks in Brazil. **Soil & Tillage Research**, v. 110, p. 175–186, 2010.

CERRI, C. E. P. Predicted soil organic carbon stocks and changes in the Brazilian Amazon between 2000 and 2030. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 122, p. 58–72, 2007.

- CHERUBIN, M. R. et al. Sugarcane expansion in Brazilian tropical soils—Effects of land use change on soil chemical attributes. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 211, p. 173–184, 2015.
- CONCEIÇÃO, P. C.; DIECKOW, J.; BAYER, C. Combined role of no-tillage and cropping systems in soil carbon stocks and Stabilization. **Soil & Tillage Research**, v. 129, p. 40–47, 2013.
- CORBEELS, M. et al. Evidence of limited carbon sequestration in soils under no-tillage systems in the Cerrado of Brazil. **Scientific Reports**, v. 6, p. 1-8, 2016.
- DIECKOW, J. et al. Land use, tillage, texture and organic matter stock and composition in tropical and subtropical Brazilian soils. **European Journal of Soil Science**, v. 60, p. 240–249, 2009.
- DONAGEMMA, G. K. et al. Caracterização, potencial agrícola e perspectivas de manejo de solos leves no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, p. 1003-1020, set. 2016.
- DURIGAN, M. R. et al. Soil organic matter responses to anthropogenic forest disturbance and land use change in the eastern Brazilian Amazon. **Sustainability**, v. 9, p. 1-16, 2016.
- FERREIRA, A. O. et al. Can no-till grain production restore soil organic carbon to levels natural grass in a subtropical Oxisol? **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 229, p. 13–20, 2016.
- FIGUEIREDO, C. C.; RESCK, D. V. S.; CARNEIRO, M. A. C. Labile and stable fractions of soil organic matter under management systems and native cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 907-916, 2010.
- FIGUEIREDO C. C. et al. Stratification ratio of organic matter pools influenced by management systems in a weathered Oxisol from a tropical agro-ecoregion in Brazil. **Soil Research**, v. 51, p. 133–141. 2013.
- FRANCO, A. L. C. et al. Soil carbon, nitrogen and phosphorus changes under sugarcane expansion in Brazil. **Science of the Total Environment**, v. 515–516, p. 30–38, 2015.
- FRANZLUEBBERS, A.J. Soil organic matter stratification ratio as an indicator of soil quality. **Soil & Tillage Research**, v. 66, p. 95–106, 2002.
- GOLDEMBERG, J. A. N. et al. Meeting the global demand for biofuels in 2021 through sustainable land use change policy. **Energy Policy**, v. 69, p. 14–18, 2014.
- GROPPO, J. D. et al. Changes in soil carbon, nitrogen, and phosphorus due to land-use changes in Brazil. **Biogeosciences**, v. 12, p. 4765-4780, 2015.
- HARRIS, Z. M.; SPAKE, R.; TAYLOR, G. Land use change to bioenergy: A meta-analysis of soil carbon and GHG emissions. **Biomass and Bioenergy**, v. 82, p. 27-39, 2015.

KUMAR S.; GARG A. K.; AULAKH M. S. Effect of Conservation Agriculture Practices on Physical, Chemical and Biological Attributes of Soil Health Under Soybean–Rapeseed Rotation. **Agricultural Research**, v. 5, p. 145–161, 2016.

KUSHWA, V. et al. Long-term Conservation Tillage Effect on Soil Organic Carbon and Available Phosphorous Content in Vertisols of Central India. **Agricultural Research**, v. 5, p. 353–361, 2016.

LAL, R. Soil Carbon Sequestration Impacts on Global Climate Change and Food Security. **Science**, v. 304, n. 5677, p. 1623-1627, 2004.

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

LAL, R. Restoring Soil Quality to Mitigate Soil Degradation. **Sustainability**, v. 7, p. 5875-5895, 2015.

MACEDO, M. C. M. Integração lavoura e pecuária: o estado da arte e inovações tecnológicas. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 38, p. 133-146, 2009.

MAIA, S. M. F. et al. Effect of grassland management on soil carbon sequestration in Rondônia and Mato Grosso states, Brazil. **Geoderma**, v. 149, p. 84–91, 2009.

MAIA, S. M. F. et al. Changes in soil organic carbon storage under different agricultural management systems in the Southwest Amazon Region of Brazil. **Soil & Tillage Research**, v. 106, p. 177–184, 2010.

MELO, F. F. C. et al. Payback time for soil carbon and sugar-cane ethanol. **Nature Climate Change**, v. 4, p. 605-609, 2014.

MORAES, A. et al. Research on Integrated Crop-Livestock Systems in Brazil. **Revista Ciência Agronômica**, v. 45, p. 1024-1031, 2014a.

MORAES, A. et al. Integrated crop–livestock systems in the Brazilian subtropics. **European Journal of Agronomy**, v. 57, p. 4-9, 2014b.

NOGUEIROL, R. C. et al. Effect of no-tillage and amendments on carbon lability in tropical soils. **Soil & Tillage Research**, v. 143, p. 67–76. 2014.

NOVELLI, L. E. et al. Increased cropping intensity improves crop residue inputs to the soil and aggregate-associated soil organic carbon stocks. **Soil & Tillage Research**, v. 165, p. 128–136, 2017.

OLIVEIRA, J. R. A.; MENDES, I. C.; VIVALDI, L. Carbono da biomassa microbiana em solos de cerrado sob vegetação nativa e sob cultivo: avaliação dos métodos fumigação-incubação e fumigação-extração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 25, p. 863-871, 2001.

OLIVEIRA, D. M. S. et al. Soil carbon changes in areas undergoing expansion of sugarcane into pastures in south-central Brazil. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 228, p. 38–48, 2016.

OLIVEIRA-FILHO, A. T.; RATTER, J. A. A study of the origin of central Brazilian forests by the analysis of plant species distribution patterns. **Edinburgh Journal of Botany**, v. 52, p. 141-194, 1995.

PAUSTIAN, K. et al. Management Options for Reducing CO₂ Emissions from Agricultural Soils. **Biogeochemistry**, v. 48, p. 147-163, 2000.

QIN, Z. et al. Soil carbon sequestration and land use change associated with biofuel production: empirical evidence GCB. **Bioenergy**, v. 8, p. 66–80, 2016.

R Core Team (2016). R: A language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

RASSE, D. P.; RUMPEL, C.; DIGNAC, M. Is soil carbon mostly root carbon? Mechanisms for a specific stabilization. **Plant and Soil**, v. 269, p. 341–356, 2005.

REICHERT, J. M. et al. Land use effects on subtropical, sandy soil under sandyization/desertification processes. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 233, p. 370–380, 2016.

SÁ, J. C. M. et al. Organic Matter Dynamics and Carbon Sequestration Rates for a Tillage Chronosequence in a Brazilian Oxisol. **Soil Science Society of America Journal**, v. 65, p. 1486–1499 2001.

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

SÁ, J. C. M. et al. Carbon depletion by plowing and its restoration by no-till cropping systems in oxisols of subtropical and tropical agro-ecoregions in Brazil. **Land Degradation & Development**, v. 26, p. 531–543, 2015.

SÁ, J. C. M. et al. Low-carbon agriculture in South America to mitigate global climate change and advance food security. **Environment International**, v. 98, p. 102–112, 2017.

SALTON, J. C. et al. Integrated crop-livestock system in tropical Brazil: Toward a sustainable production system. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 190, p. 70-79, 2014.

SALVO, L. et al. Soil organic carbon dynamics under different tillage systems in rotations with perennial pastures. **Soil & Tillage Research**, v. 135, p. 41–48, 2014.

SANTOS, A. D. et al. Fracionamento químico e físico da matéria orgânica de um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de uso. **Ciência Rural**, v.43, n.5, p.838-844, 2013.

SILVA, E. N. et al. Management systems and soil use on fractions and stocks of organic carbon and nitrogen total in cerrado latosol. **Bioscience Journal**, v. 32, p. 1482-1492. 2016.

SILVA-OLAYA, A. M. et al. Carbon dioxide emissions under different soil tillage systems in mechanically harvested sugarcane. **Environmental Research Letters**, v. 8, p. 1-8, 2013.

SILVEIRA, M. L. et al. Grazing land intensification effects on soil C dynamics in aggregate size fractions of a Spodosol. **Geoderma**, v. 230–231, p. 185–193, 2014.

SIQUEIRA NETO, M. et al. Soil carbon stocks under no-tillage mulch-based cropping systems in the Brazilian Cerrado: An on-farm synchronic assessment. **Soil & Tillage Research**, v. 110, p. 187–195, 2010.

SIX, J. et al. A history of research on the link between (micro)aggregates, soil biota, and soil organic matter dynamic. **Soil & Tillage Research**, v. 79, p. 7 -31. 2004.

SOMMER, R.; BOSSIO, D. Dynamics and climate change mitigation potential of soil organic carbon sequestration. **Journal of Environmental Management**, v. 144, p. 83-87, 2014.

SOUZA, E. D. Soil quality indicators in a Rhodic Paleudult under long term tillage systems. **Soil & Tillage Research**, v. 139, p. 28-36. 2014.

STRASSBURG, B. B. N. et al. When enough should be enough: Improving the use of current agricultural lands could meet production demands and spare natural habitats in Brazil. **Global Environmental Change**, v. 28, p. 84-97, 2014.

WINGEYER, A. B. et al. Soil Quality Impacts of Current South American Agricultural Practices. **Sustainability**, v. 7, p. 2213-2242, 2015.

UNFCCC. **Adoption of the Paris Agreement**, Draft decision -/CP.21. 2015. Disponível em: <<http://unfccc.int/resource/docs/2015/cop21/eng/109r01.pdf>>

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

3. ARTIGO 2: ALTERAÇÕES DAS PROPRIEDADES FÍSICAS E QUÍMICAS DO SOLO EM FUNÇÃO DO USO DA TERRA NA REGIÃO SUL DO BRASIL

3.1. RESUMO

Avaliar a intensidade das alterações nas propriedades químicas e físicas do solo em função do uso da terra permite estabelecer parâmetros capazes de identificar o grau de degradação e/ou de qualidade do solo. O objetivo deste trabalho foi testar a hipótese de que a intensificação da agricultura através do cultivo da soja ou da cana-de-açúcar pode melhorar os parâmetros físicos e químicos do solo, quando comparados ao uso da terra com pastagem. Amostras de solo foram coletadas em três camadas (0,0 – 0,10; 0,10- 0,20; 0,20 -0,30 m) nos municípios de Londrina, Santo Inácio e São Jorge do Ivaí, região norte do Paraná e analisados quanto as propriedades de acidez e CTC (pH, CTCpH7, saturação de bases, saturação por alumínio e Al+H), macronutrientes (P, K, Ca e Mg), e atributos físicos (densidade e porosidade do solo). Os resultados encontrados concluem que a intensificação da agricultura através do cultivo da soja e da cana-de-açúcar não induz significante degradação química e física em relação a pastagem (especialmente as mal manejadas), e em alguns casos práticas de correção e fertilização podem melhorar a qualidade desses solos, mesmo em solos naturalmente frágeis a degradação.

Palavras chave: Cana-de-açúcar. Integração Lavoura Pecuária. Sistema plantio direto. Pastagem.

PAPER 2: CHANGES IN PHYSICAL AND CHEMICAL PROPERTIES OF SOIL AS A FUNCTION OF LAND USE IN THE SOUTHERN REGION OF BRAZIL

3.2. ABSTRACT

Evaluating the intensity of the changes in the chemical and physical properties of the soil as a function of land use allows establishing parameters capable of identifying the degree of soil degradation and/or quality. The objective of this study was to test the hypothesis that the intensification of agriculture through the cultivation of soybean or sugarcane can improve soil physical and chemical parameters when compared to pasture land use. Soil samples were collected in three layers (0.0 - 0.10, 0.10 - 0.20, 0.20 - 0.30 m) in Londrina, Santo Inácio and São Jorge do Ivaí, northern PR- Brazil were determined by analyzing the acidity and CEC

values, pH, CTCpH7, base saturation, aluminum saturation and Al + H, macronutrients. (P, K, Ca, and Mg), and physical attributes (bulk density and porosity). The results show that the intensification of agriculture through the cultivation of soybean and sugarcane does not induce significant chemical and physical degradation in relation to pasture (especially poorly managed), and in some cases, correction and fertilization practices can improve the quality of these soils, even in naturally fragile soils degradation.

Keywords: Sugarcane. Integrated crop- livestock system. No-tillage. Pasture.

3.3. INTRODUÇÃO

A qualidade do solo depende da manutenção e melhoria das suas propriedades químicas e físicas, porém os diferentes usos da terra ocasionam alterações nestas propriedades do solo (BALOTA et al., 2015). A mudança de uso da terra no Brasil desencadeada pelos aumentos na demanda por alimentos (SÁ et al., 2017) e bioenergia (GOLDEMBERG et al., 2014), tem deslocado a produção de cana-de-açúcar e culturas anuais para áreas anteriormente ocupadas por pastagens, e além disso, para solos marginais (arenosos) (DONAGEMMA et al., 2016).

A intensificação produtiva das áreas ocupadas por pastagens e a utilização de solos marginais e frágeis ao sistema produtivo requer estudos que avaliem o impacto do uso da terra sobre as propriedades químicas e físicas e químicas destes solos (RE ICHERT et al., 2016). O solo das áreas extensivas de pastagens tem sido considerado ácido e com baixa concentração de nutrientes (CHERUBIN et al., 2015), porém, em áreas não extensivas, quando manejados com correções e fertilizações a fertilidade é melhorada (STRASSBURG et al., 2014). Entretanto, o aumento da densidade do solo e da resistência a penetração, acompanhado da redução da porosidade total, devido as altas taxas de lotação tem resultado na redução da qualidade física do solo em áreas de pastagens (PORTUGAL et al., 2010).

A aplicação de corretivos e fertilizantes reduziu a acidez e elevou os níveis de nutrientes no solo em áreas de pastagens convertidas para a produção de cana-de-açúcar (CHERUBIN et al., 2015). Além disso, as reservas e disponibilidade de fósforo são aumentadas no solo cultivado com cana-de-açúcar. Entretanto, elevado nível de compactação em áreas de cana-de-açúcar tem sido observado (SEVERIANO et al., 2010), evidenciando a necessidade de monitoramento destes locais para evitar a perda da qualidade física do solo (CHERUBIN et al., 2016a).

A compactação é a principal causa da degradação estrutural do solo (TORMENA et al., 2017) e práticas de manejo que aliviem este problema terão um papel chave para melhorar a qualidade do solo. Assim, um estudo de longa duração realizado por Moraes et al. (2016) na região Sul do Brasil, apontou que o SPD sem revolvimento do solo, preserva sua qualidade estrutural, sendo maior à medida que aumenta o tempo de adoção deste sistema. Com o tempo de adoção do SPD, também ocorre aumento da saturação de bases, da CTC, dos teores de fósforo disponível no solo (DORNELES et al., 2015), nitrogênio e potássio (MARTÍNEZ et al., 2013). Contudo, além do tempo de adoção, as propriedades químicas e físicas no SPD, são dependentes das culturas utilizadas no sistema (NASCENTE et al., 2015; FERREIRA et al., 2016).

Associado ao manejo do solo sob SPD, os sistemas integrados de produção como a ILP em consórcio ou sucessão ao cultivo de grãos tem demonstrado potencialidades em melhorar os atributos químicos através de uma nova ciclagem de nutrientes e físicos por favorecer maior agregação do solo (MORAES et al., 2014). A ILP tem sido incentivada no Brasil (BRASIL, 2012), contemplando sua utilização em solos frágeis (DONAGEMMA et al., 2016), porém, poucos estudos avaliaram o impacto da ILP sobre as propriedades químicas e físicas em solos arenosos.

Assim, propomos com este estudo avaliar o impacto do uso da terra (vegetação nativa, pastagem, soja cultivada sob SPD e cana-de-açúcar) sobre as propriedades físicas e químicas em solos com diferentes classes texturais. A hipótese deste trabalho é que a intensificação da agricultura através do cultivo da soja ou da cana-de-açúcar pode melhorar as propriedades químicas e físicas do solo, quando comparados ao uso da terra com pastagem na região sul do Brasil, sendo o objetivo do estudo testar esta hipótese.

3.4. MATERIAL E MÉTODOS

A descrição dos locais e usos da terra, amostragem e coleta de solo podem ser consultados no item Materiais e Métodos do Artigo 1 desta dissertação.

3.4.1. Análises das propriedades químicas do solo

Amostras indeformadas foram secas em estufa de circulação de ar forçado a temperatura de 45° C até peso constante. Posteriormente foram passadas em peneira de 2 mm de diâmetro para obtenção da TFSA, estando prontas para a extração dos nutrientes. Os nutrientes Ca^{2+} e Mg^{2+} foram extraídos com solução de KCl na concentração de 1 mol L⁻¹ e as leituras realizadas em espectrofotômetro de absorção atômica. O K^+ e o P foram extraídos pela metodologia Mehlich-1 e as leituras realizadas em fotômetro de chamas e espectrofotômetro, respectivamente. Todas estas metodologias foram realizadas conforme procedimentos descritos por Tedesco et al. (1995).

O pH foi obtido pela leitura em eletrodo de vidro, após a agitação e repouso de 10 ml de solo misturado a 10 ml de água destilada. A acidez potencial (H+Al) foi avaliada pela leitura do pH após a adição da solução tampão SPM e segundo a equação $\log \text{H+Al} = 2,904 - 0,392 * \text{SMP}$ (TEDESCO et al., 1995). A capacidade de troca de cátions a pH 7,0 (CTC_{pH7}) foi calculada pela soma dos cátions trocáveis (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e H^+ + Al^{3+}). A saturação por bases (V) representa a proporção (%) da CTC_{pH7} ocupada por bases trocáveis (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+}). A saturação de alumínio (m) representa a proporção (%) da $\text{CTC}_{\text{efetiva}}$ (Na^+ , K^+ , Ca^{2+} , Mg^{2+} e Al^+) ocupada pelo Al^{3+} .

3.4.2. Análises das propriedades físicas do solo

Amostras de solo não perturbadas foram saturadas durante 48 a 72 horas por capilaridade em uma bandeja. Posteriormente, as amostras foram submetidas a tensão de sucção de 6 kPa por 48 horas em mesa de tensão. Após o equilíbrio do conteúdo de água nesta tensão, foi determinada a massa de solo úmido e então encaminhadas para secagem em estufa a 105 °C, onde permaneceram por 48 horas, e depois foram pesadas novamente.

A densidade do solo foi calculada dividindo-se a massa de solo seco pelo volume do anel. A densidade de partículas foi calculada após a pesagem do solo seco, onde retirou-se uma sub amostra do solo contido no anel volumétrico. Foi utilizada a metodologia do balão volumétrico (EMBRAPA, 2011) a qual visa determinar o volume de álcool gasto para completar a capacidade de um balão, contendo uma amostra de terra fina seca ao ar (TFSA).

A porosidade total foi calculada através da relação existente entre densidade do solo e densidade de partículas ($\text{Pt} = 1 - (\text{Ds}/\text{Dp})$). A microporosidade foi estimada de acordo com o teor de água no solo quando submetido ao potencial hídrico de -6 kPa. A macroporosidade foi calculada como sendo a diferença entre a porosidade total e a microporosidade.

3.2.3. Análise dos dados

Os dados foram testados quanto a normalidade pelo teste de Shapiro – Wilk ($p < 0,05$). A análise de variância foi utilizada para testar os efeitos dos diferentes usos da terra sobre as propriedades químicas e físicas do solo. Quando significativos os valores dos resultados foram comparados usando o teste de Tukey ($p < 0,05$). Para efeitos deste estudo, cada local foi analisado separadamente, visto as diferenças entre os históricos das áreas. Todas as análises foram realizadas através do software R, version 3.3.1 (R Core Team, 2016).

3.5. RESULTADOS

3.3.1. Propriedades químicas do solo

Em Londrina, o uso da terra com pastagem, cana-de-açúcar e soja apresentaram pH menor que a vegetação nativa e inferior a 6,0 nas camadas de 0,0 - 0,10 m e 0,10 – 0,20 m (Tabela 1). Logo, a acidez potencial foi menor na vegetação nativa em comparação aos demais usos nestas duas camadas. De acordo com as classes de interpretação descritas por CQFS RS/SC (2016), a pastagem em Londrina apresentou baixa saturação de bases (<50%) nas três camadas avaliadas, média saturação por alumínio (18%) na camada de 0,0 - 0,10 m e alta saturação por alumínio nas camadas de 0, 10 – 0,20 e 0,20 – 0,30, sendo 37 e 30 % respectivamente. A vegetação nativa apresentou elevada saturação de bases, maior que 80 %, sendo superior aos demais usos da terra e também apresentou maior CTC potencial, resultando na sequência VN>SO>CA>PA (Tabela 1).

No solo arenoso de Santo Inácio, a camada de 0,0 - 0,10 m, apresentou caráter ácido para o uso da terra com cana-de-açúcar, embora o valor de pH ficou próximo a 6,0 (5,8) (Tabela 1), e apresentou saturação de bases menor que o solo sob a vegetação nativa e soja nas camadas de 0,0-0,10 m e 0,10-0,20 m. Além disso, a CTC potencial do solo cultivado com cana-de-açúcar foi menor que a da vegetação nativa na camada de 0,0 – 0,10 m, porém não diferindo do solo cultivado com pastagem e soja. Nas demais camadas não houve diferenças para CTC. Também não foi encontrada saturação de alumínio no solo de nenhum dos usos estudados.

Nas condições de solo franco-arenoso de São Jorge do Ivaí, ao aposto do observado para as condições de Santo Inácio, a saturação de bases no solo cultivado com cana-de-açúcar foi mais elevada nas camadas de 0,0 – 0,10 e 0,20 – 0,30 m (Tabela 1), sendo maior que os valores apresentados no solo sob uso com pastagem e igualando-se a vegetação nativa e ao

uso com soja. Na camada de 0,10 – 0,20 m o solo cultivado com soja apresentou maior saturação de bases. A saturação de bases no solo com pastagem foi menor que os demais usos em todas as camadas, porém apenas na camada de 0,20 – 0,30 os valores foram significativamente diferentes.

Não foram encontradas diferenças significativas para saturação por alumínio e CTC_{pH7} entre os usos da terra em todas as camadas avaliadas em São Jorge do Ivaí. O pH por sua vez, foi superior no solo cultivado com soja na camada de 0,0 – 0,10, quando comparado ao solo cultivado com cana-de-açúcar. Na camada de 0,10 – 0,20 o solo sob os usos pastagem, cana-de-açúcar e soja apresentaram pH superior a 6,0 (Tabela 1). Na camada de 0,20 – 0,30 m, constatou-se um decréscimo no pH do solo sob pastagem (5,3) apresentando caráter ácido.

Em Londrina, os maiores teores de P no solo foram observados nos usos da terra com soja. Na camada de 0,0 - 0,10 m o uso SO2 apresentou o maior valor ($43,4 \text{ mg dm}^{-3}$), seguido por SO1 ($21,8 \text{ mg dm}^{-3}$), SO4 ($18,7 \text{ mg dm}^{-3}$) e SO3 ($15,8 \text{ mg dm}^{-3}$) (Tabela 2). Nesta mesma camada a vegetação nativa apresentou o menor valor de P ($2,3 \text{ mg dm}^{-3}$). O revolvimento do solo nos usos da terra com soja aumentou a concentração de P nas camadas de 0,10 – 0,20 m, onde SO3 ($20,7 \text{ mg dm}^{-3}$) e SO4 ($27,9 \text{ mg dm}^{-3}$) e 0,20 – 0,30 m, onde SO3 ($9,7 \text{ mg dm}^{-3}$) e SO4 ($10,5 \text{ mg dm}^{-3}$). Nestas camadas o solo cultivado com pastagem e sob vegetação nativa apresentaram os teores de P disponível

Da mesma forma, o K foi mais elevado nos solos cultivados com soja (Tabela 2), em todas as camadas com valores considerados altos (CQFS-RS/SC, 2016) para a cultura da soja. O solo cultivado com cana-de-açúcar, pastagem e sob vegetação nativa apresentou as menores concentrações de K em todas as camadas. A concentração de Ca, por outro lado, foi maior no solo sob vegetação nativa e menor no solo dos demais usos da terra em todas as camadas avaliadas (Tabela 2). Assim como o Ca, o Mg, também apresentou maior concentração no solo sob vegetação nativa para as condições de Londrina.

Apesar da alta variabilidade entre os teores de P e K e em alguns casos não apresentar diferença estatística, pode-se observar que tanto na camada de 0,0-0,10 m como na média das camadas do perfil estudado (0,0-0,30 m) esses teores no solo das terras usadas com pastagem e cana-de-açúcar estão abaixo do nível crítico para o estado do Paraná, indicados por Vieira et al. (2012), de $8,0 \text{ mg dm}^{-3}$ e $117,0 \text{ mg dm}^{-3}$, respectivamente. Por outro lado, percebe-se que os usos da terra com soja possuem solos com valores de P e K acima do nível crítico (Tabela 2).

Tabela 1 - Atributos de acidez do solo e CTC para as camadas de 0,0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m sob diferentes usos da terra (VN – vegetação nativa; PA – pastagem; CA – cana-de-açúcar; soja em sistema plantio direto (SPD) e rotação milho (SO1), soja em SPD com rotação trigo (SO2), soja em sistema de preparo convencional (SPC) com rotação milho (SO3), soja em SPC com rotação trigo (SO4) para Londrina, Santo Inácio e São Jorge do Ivaí, Paraná – Brasil.

Uso da Terra	Londrina					Santo Inácio					São Jorge do Ivaí				
	pH	Al+H	m	CTC _{pH7}	V	pH	Al+H	m	CTC _{pH7}	V	pH	Al+H	m	CTC _{pH7}	V
		cmol _c dm ⁻³	%	cmol _c dm ⁻³	%		cmol _c dm ⁻³	%	cmol _c dm ⁻³	%		cmol _c dm ⁻³	%	cmol _c dm ⁻³	%
	0,0 – 0,10 m					0,0 – 0,10 m					0,0 – 0,10 m				
VN	6,5 a	1,9 c	0,0 b	20,8 a	91,0 a	6,1 ab	1,3 ns	0,0ns	5,6 a	76,0ab	5,8 b	1,7 a	2,0ns	5,0 ns	65,0ab
PA	5,1 d	4,4 a	18,0 a	8,2 c	46,0 d	6,3 ab	1,2	4,0	3,9 ab	65,0bc	6,3 ab	1,6 a	8,0	3,6	52,0b
CA	5,6bc	2,9 b	3,0 b	9,0 bc	67,0bc	5,8 b	1,3	3,0	3,0 b	54,0c	5,8 b	1,0 b	0,0	4,3	74,0a
SO1 [§]	5,8 b	2,8 bc	0,3 b	12,4 b	77,0 b	6,6 a	1,1	0,0	5,0 ab	76,0a	6,6 a	1,3 ab	0,0	4,3	67,0ab
SO2	5,5bcd	3,9 a	1,3 b	12,1 bc	67,0bc										
SO3	5,2 cd	4,2 a	5,0 b	9,5 bc	55,0cd										
SO4	5,6 bc	3,4ab	2,0 b	9,7 bc	65,0bc										
	0,10 – 0,20 m					0,10 – 0,20 m					0,10 – 0,20 m				
VN	6,4 a	1,9 d	0,0 b	12,5 a	84,0 a	6,1 ns	1,2 ns	0,0ns	3,5 ns	62,0a	5,4 b	1,8 a	4,0ns	3,5 ns	51,0ab
PA	5,1 c	4 ab	37,0 a	6,0 c	34,0 d	5,8	1,2	4,0	2,6	50,0ab	6,0 ab	2,0 a	10,0	3,2	39,0b
CA	5,7 b	3,1 c	2,0 b	8,3 b	63,0 b	5,6	1,4	3,0	3,0	41,0b	6,4 a	1,2 b	1,0	3,4	59,0ab
SO1	5,2 c	3,8 ab	7,0 b	8,0 bc	53,0bc	6,0	1,3	0,0	3,2	57,0a	6,2 a	1,4 b	0,0	3,9	64,0a
SO2	5,1 c	4,1 a	12,0 b	8,2 b	50,0 c										
SO3	5,2 bc	3,6abc	5,0 b	8,5 ab	58,0bc										
SO4	5,5 bc	3,4 bc	1,0 b	9,4 ab	6,0b										
	0,20 – 0,30 m					0,20 – 0,30 m					0,20 – 0,30 m				
VN	5,8 a	2,8 b	1,0 b	11,4 a	75,0a	6,5 a	1,1 b	2,0ns	2,7 ns	56,0ns	5,3 b	1,7 a	2,0ns	3,1 ns	42,0bc
PA	5,1 c	3,7 a	30,0 a	5,7 c	35,0c	5,5 b	1,4 ab	20,0	2,6	42,0	5,3 b	1,9 a	19,0	3,2	38,0c
CA	5,4 bc	3,4 ab	7,0 b	7,9 b	56,0b	5,6 ab	1,5 ab	8,0	3,2	46,0	6,2 a	1,3 b	6,0	3,3	57,0ab
SO1	5,3 bc	3,1 ab	7,0 b	7,3 b	58,0b	5,4 b	2,2 a	16,0	3,3	32,0	6,2 a	1,3 b	0,0	3,7	64,0a
SO2	5,2 c	3,6 a	8,0 b	8,2 b	56,0b										
SO3	5,4 bc	3,7 a	6,0 b	8,3 b	56,0b										
SO4	5,7 ab	3,1 ab	3,0 b	8,7 b	64,0b										

*Médias seguidas por mesma letra para cada indicador e profundidade do solo não diferiram estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). [§] Para Santo Inácio considerar soja em sistema de integração lavoura pecuária (ILP). Para São Jorge do Ivaí considerar soja sucessão soja. m=saturação por alumínio. V=saturação de bases.

Para as condições de Santo Inácio houve resposta significativa para o teor de P no solo em função do uso da terra apenas na camada de 0,10-0,20 m, sendo verificados os maiores teores de P no uso da terra com soja ($37,0 \text{ mg dm}^{-3}$) (Figura 2). A maior concentração de K foi observada no solo sob vegetação nativa e pastagem na camada de 0,10 – 0,20 m diferindo significativamente do solo cultivado com cana-de-açúcar. Na camada de 0,20 – 0,30 m o solo cultivado com soja e cana-de-açúcar apresentaram a menor concentração de K.

Os teores de Ca foram mais elevados no solo cultivado com soja ($3,2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) em Santo Inácio na camada de 0,0 – 0,10 (Tabela 2). Na camada de 0,10 – 0,20 m o maior valor observado no solo cultivado com soja ($1,4 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$) foi superior apenas ao teor de Ca encontrado no solo cultivado com cana-de-açúcar ($0,77 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$). Na camada de 0,20 – 0,30 não foi observada diferença no teor de Ca no solo entre os usos da terra. O teor de Mg foi mais alto no solo sob vegetação nativa ($1,2 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$), porém, diferindo significativamente apenas do solo cultivado com cana-de-açúcar ($0,3 \text{ cmol}_c \text{ dm}^{-3}$). Na camada de 0,10 – 0,20 m o teor de Mg no solo sob vegetação nativa foi maior aos teores encontrados no solo cultivado com cana-de-açúcar e soja.

No solo franco- arenoso de São Jorge do Ivaí, o uso da terra com soja incrementou os teores de P no solo (Tabela 2), que apresentou valor superior aos demais usos em todas as camadas analisadas. Já o teor de K, quando apresentou diferença significativa, teve níveis mais elevados na vegetação nativa na camada de 0,10 – 0,20 m, onde foi superior aos demais usos da terra e na camada de 0,20 – 0,30, porém sendo significativamente superior apenas a concentração de K no solo cultivado com cana-de-açúcar. Os teores de Ca e Mg não diferiram entre os usos da terra nas camadas de 0,0 – 0,10 m e 0,10 – 0,20 m, sendo diferenças encontradas apenas na camada de 0,20 – 0,30 m. Assim, nesta camada, o teor de Ca foi maior no solo cultivado com soja e menor no solo sob pastagem e vegetação nativa. Para Mg, o menor valor foi observado no solo sob pastagem.

3.3.2. Propriedades físicas do solo

Os menores valores de densidade do solo foram encontrados na vegetação nativa nos três locais do estudo e em todas camadas analisadas (Tabela 3), demonstrando que quanto mais intensificado o uso da terra, maior será a densidade do solo. Em Londrina, na camada de 0,0 – 0,10 m o solo cultivado com cana-de-açúcar ($1,29 \text{ Mg m}^{-3}$), SO1 ($1,29 \text{ Mg m}^{-3}$), SO3 (Mg m^{-3}) apresentaram valores de densidade do solo maiores que pastagem ($1,14 \text{ Mg m}^{-3}$), SO2 ($1,21 \text{ Mg m}^{-3}$) e SO4 ($1,21 \text{ Mg m}^{-3}$). O solo cultivado com cana-de-açúcar apresentou

menor porosidade total ($0,55 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) na camada de 0,0 -0,10 m. Além disso nas três camadas avaliadas o solo cultivado com cana-de-açúcar em Londrina apresentou valores de macroporosidade menor que $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, considerado limitante ao crescimento radicular.

Para as condições de Santo Inácio, não foi encontrado diferenças na densidade do solo cultivado sob pastagem, cana-de-açúcar e soja nas três camadas estudadas, assim como para macroporosidade, microporosidade e porosidade total (Tabela 3). Em São Jorge do Ivaí o solo cultivado com cana-de-açúcar e soja apresentou os maiores valores de densidade, quando comparado a pastagem e vegetação nativa em todas as camadas avaliadas. A porosidade total na camada de 0,0 – 0,10 m foi igual para todos os usos da terra, na camada de 0,10 – 0,20 menor no solo cultivado com cana-de-açúcar e soja, na camada de 0,20 - 0,30 menor no solo sob cana-de-açúcar. O cultivo de cana-de-açúcar apresentou baixo valor de macroporosidade na camada de 0,10 – 0,20 m, correspondendo a $0,08 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, sendo inferior aos demais valores e usos da terra.

Tabela 2 - Macronutrientes para as camadas de 0,0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m sob diferentes usos da terra (VN – vegetação nativa; PA – pastagem; CA – cana-de-açúcar; soja em sistema plantio direto (SPD) e rotação milho (SO1), soja em SPD com rotação trigo (SO2), soja em sistema de preparo convencional (SPC) com rotação milho (SO3), soja em SPC com rotação trigo (SO4) para Londrina, Santo Inácio e São Jorge do Ivaí, Paraná – Brasil.

Uso da Terra	Londrina				Santo Inácio				São Jorge do Ivaí			
	P	K	Ca	Mg	P	K	Ca	Mg	P	K	Ca	Mg
	---mg dm ⁻³ --		---cmol _c dm ⁻³ ---		---mg dm ⁻³ --		---cmol _c dm ⁻³ ---		---mg dm ⁻³ --		---cmol _c dm ⁻³ ---	
	0,0 – 0,10 m				0,0 – 0,10 m				0,0 – 0,10 m			
VN	2,3d*	113,0bc	15,7 a	2,9 a	8,3 ns	72,0 ns	2,8 b	1,2 a	5,7 b	92,0 ns	2,2 ns	0,9 ns
PA	7,8bcd	48,0cd	2,1 c	1,5 b	17,1	47,0	1,6 b	0,8 ab	1,7 b	31,0	1,1	0,7
CA	6,0cd	23,0 d	4,4 bc	1,6 b	29,5	33,0	1,2 b	0,3 b	8,1 b	31,0	1,8	1,5
SO1 [§]	21,8b	248,0a	6,2 b	2,7 a	20,0	24,0	3,2 a	0,6 ab	27 a	46,0	1,8	1,1
SO2	43,4 a	243,0a	5,4 bc	2,1ab								
SO3	15,8bcd	189,0ab	3,4 bc	1,3 b								
SO4	18,7bc	246,0a	4,2 bc	1,4 b								
	0,10 – 0,20 m				0,10 – 0,20 m				0,10 – 0,20 m			
VN	1,6 c	73,0 b	7,8 a	2,5 a	3,0 b	47,0 a	1,3 ab	0,8 a	3,3 b	56,0 a	1,0 ns	0,5 ns
PA	1,9 c	25,0 b	1,3 c	0,6 c	11,0 b	45,0 a	0,8 ab	0,4 ab	1,9 b	26,0 b	0,7	0,4
CA	5,1 bc	17,0 b	3,6 b	1,5 b	13,0 b	9,0 b	0,7 b	0,2 b	4,5 b	21,0 b	1,2	0,7
SO1	12,3abc	187,0 a	2,2 bc	1,5 b	37,0 a	20,0 ab	1,4 a	0,3 b	57 a	24,0 b	1,7	0,7
SO2	16,4abc	176,0 a	2,4 bc	1,2 bc								
SO3	20,7 ab	229,0 a	2,8 bc	1,4 b								
SO4	27,9 a	236,0 a	3,8 b	1,5 b								
	0,20 – 0,30 m				0,20 – 0,30 m				0,20 – 0,30 m			
VN	1,0 c	59,0 b	6,2 a	2,2 a	1,5 ns	79,0 a	0,8 ns	0,5 ns	2,6 b	48,0 a	0,7 b	0,4 ab
PA	1,1 c	20,0 b	1,3 c	0,6 c	6,9	49,0 ab	0,6	0,3	1,4 b	24,0 ab	0,9 b	0,2 b
CA	3,1bc	12,0 b	2,9 b	1,5 b	7,0	3,0 b	0,8	0,5	2,2 b	21,0 b	1,4 ab	0,4 ab
SO1	3,5bc	176,0 a	2,3 bc	1,4 bc	4,0	15,0 b	0,8	0,1	26 a	30,0 ab	1,8 a	0,5 a
SO2	5,7abc	180,0 a	2,7 bc	1,4 bc								
SO3	9,7ab	216,0 a	2,6 bc	1,4 bc								
SO4	10,4 a	218,0 a	3,5 b	1,5 b								

*Médias seguidas por mesma letra para cada indicador e profundidade do solo não diferiram estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). § Para Santo Inácio considerar soja em sistema de integração lavoura pecuária (ILP). Para São Jorge do Ivaí considerar soja sucessão soja.

Tabela 3 - Atributos físicos do solo (Ds -densidade do solo, Pt – porosidade total, Ma- macroporosidade, Mi- microporosidade) para as camadas de 0,0-0,10; 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m sob diferentes usos da terra (VN – vegetação nativa; PA – pastagem; CA – cana-de-açúcar; soja em sistema plantio direto (SPD) e rotação milho (SO1), soja em SPD com rotação trigo (SO2), soja em sistema de preparo convencional (SPC) com rotação milho (SO3), soja em SPC com rotação trigo (SO4) para Londrina, Santo Inácio e São Jorge do Ivaí, Paraná – Brasil.

Uso da Terra	Londrina				Santo Inácio				São José do Ivaí			
	Ds	Pt	Ma	Mi	Ds	Pt	Ma	Mi	Ds	Pt	Ma	Mi
	Mg m ⁻³	-----m ³ m ⁻³ -----			Mg m ⁻³	-----m ³ m ⁻³ -----			Mg m ⁻³	-----m ³ m ⁻³ -----		
	0,0 – 0,10 m				0,0 – 0,10 m				0,0 – 0,10 m			
VN	0,85 d	0,71 a	0,25 a	0,45 bcd	1,24 b	0,52 a	0,34 a	0,20 b	0,95 c	0,64 a	0,44 a	0,18 c
PA	1,14 c	0,61 b	0,11 c	0,49 a	1,58 a	0,40 b	0,14 b	0,26 a	1,44 b	0,43 b	0,16 b	0,26 a
CA	1,29 a	0,55 c	0,08 c	0,48 ab	1,57 a	0,41 b	0,13 b	0,28 a	1,65 a	0,38 b	0,15 b	0,22 bc
SO1	1,29 a	0,58 bc	0,11 c	0,47 abc	1,54 a	0,41 b	0,16 b	0,28 b	1,62 a	0,39 b	0,14 b	0,24 ab
SO2	1,21 b	0,60 b	0,16 bc	0,44 cd								
SO3	1,24 a	0,60 b	0,17 b	0,43 d								
SO4	1,21 b	0,59 b	0,17 b	0,43 d								
	0,10 – 0,20 m				0,10 – 0,20 m				0,10 – 0,20 m			
VN	1,05 c	0,63 a	0,18 a	0,45 ns	1,50 b	0,44 a	0,28 a	0,18 b	1,37 c	0,47 a	0,29 a	0,19 b
PA	1,15 bc	0,60 b	0,12 c	0,48	1,64 a	0,37 b	0,12 b	0,26 a	1,48 b	0,43 b	0,19 b	0,23 a
CA	1,25 ab	0,56 c	0,09 c	0,47	1,61 a	0,39 b	0,12 b	0,27 a	1,78 a	0,32 c	0,08 d	0,24 a
SO1	1,28 a	0,58 bc	0,11 bc	0,41	1,69 a	0,36 b	0,12 b	0,24 a	1,72 a	0,35 c	0,12 c	0,23 a
SO2	1,29 a	0,58 bc	0,13 bc	0,45								
SO3	1,26 ab	0,58 b	0,15 ab	0,44								
SO4	1,27 a	0,59 bc	0,17 a	0,42								
	0,20 – 0,30 m				0,20 – 0,30 m				0,20 – 0,30 m			
VN	1,12 c	0,60 a	0,16 a	0,44 c	1,43 b	0,46 a	0,31 a	0,15 b	1,38 c	0,46 a	0,27 a	0,20 b
PA	1,11 c	0,61 a	0,16 a	0,46 bc	1,66 a	0,38 b	0,11 b	0,25 a	1,55 bc	0,39 b	0,16 b	0,23 a
CA	1,31 a	0,55 c	0,06 b	0,49 a	1,69 a	0,37 b	0,13 b	0,25 a	1,79 a	0,32 c	0,10 b	0,23 a
SO1	1,19 bc	0,61 a	0,13 a	0,48 ab	1,68 a	0,36 b	0,12 b	0,25 a	1,70 ab	0,35 bc	0,11 b	0,24 a
SO2	1,23 b	0,60 ab	0,14 b	0,46 bc								
SO3	1,25 ab	0,59 abc	0,12 b	0,47 abc								
SO4	1,27 ab	0,58 bc	0,11 b	0,46 abc								

*Médias seguidas por mesma letra para cada indicador e profundidade do solo não diferiram estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$). [§] Para Santo Inácio considerar soja em sistema de integração lavoura pecuária (ILP). Para São Jorge do Ivaí considerar soja sucessão soja.

3.6. DISCUSSÃO

3.6.1. Propriedades químicas do solo

A degradação de solos argilosos pelo uso agrícola pode estar ligada a vários fatores, dentre eles, o manejo inadequado pelo uso contínuo com monoculturas (soja e/ou cana-de-açúcar), ou até mesmo pela fertilização inadequada quando cultivado com pastagens, o que foi observado em Londrina, através da elevada saturação de alumínio e baixa saturação de bases no solo sob pastagem.

Os solos da formação Caiuá originalmente apresentam baixa CTC e baixo nível de fertilidade (EMBRAPA, 2011b; DONAGEMMA et al., 2016). Sendo assim, a CTC destes solos é altamente dependente da matéria orgânica. Deste modo, priorizar usos da terra que favoreçam incrementos da matéria orgânica deve ser a principal preocupação (REICHERT et al., 2016).

A pobreza química dos solos usados com pastagem decorre da ausência de correções químicas do solo, que sofre grande ação do pastoreio do gado, além da facilidade de perda dos nutrientes através de erosão laminar (PORTUGAL et al., 2010) quando a pastagem é manejada de forma inadequada, com superlotação animal, pastoreio excessivo, expondo parcialmente o solo, provocando perda da qualidade física e química. Cherubin et al. (2015) reportaram que a conversão da vegetação nativa para pastagem reduz a saturação de bases e o pH do solo, causando certa degradação do mesmo, porém, quando essas áreas passam a ser manejadas com correções e adubações, a fertilidade é recuperada. Desse modo, neste trabalho, a saturação de bases e a CTC apresentaram tendência de aumento nos usos da terra com soja e cana-de-açúcar em Londrina em comparação a pastagem e soja e pastagem em Santo Inácio em comparação a cana-de-açúcar devido as práticas de correção realizadas nestes cultivos. Além disso, nos usos da terra sob SPD, ILP e pastagem manejada projeta-se maior entrada de biomassa vegetal e baixa perturbação do solo, resultando no da CTC e disponibilidade de nutrientes (FERREIRA et al., 2016).

Mudanças de uso e manejo do solo alteraram a dinâmica a dinâmica e disponibilidade de nutrientes no solo. Os maiores teores de K observados no uso da terra com soja em Londrina estão relacionados com as adubações potássicas realizadas nesta cultura, visto sua alta exigência nutricional (FOLONI et al., 2008). Os usos da terra com cana-de-açúcar e pastagem, com exceção para a pastagem de Santo Inácio onde adubações periódicas são realizadas, apresentaram os menores teores de K. Isto se deve à alta exportação pela cultura da

cana (OTTO et al., 2010) e a baixa adubação realizada nas áreas de cultivo, bem como na pastagem de São Jorge do Ivaí que também não foi adubada.

Em geral a adubação realizada no solo cultivado com cana-de-açúcar é menor que a adubação realizada em culturas anuais. Na cana-de-açúcar a adubação é realizada conforme a exportação da cultura, onde no plantio utiliza-se baixas quantidades de nitrogênio e maiores de P e K. Segundo Raij et al. (1997) no plantio aplica-se de 30 a 40 kg ha⁻¹ de nitrogênio, de 60 a 120 kg ha⁻¹ de P₂O₅ e 120 kg ha⁻¹ de K₂O. Associado a elevada exportação da cultura e o ciclo de cultivo de 5 anos, técnicas de manejo como a aplicação de torta de filtro no plantio como fonte de P (SANTOS et al., 2011) e aplicação de vinhaça, com doses variando de 200 a 300 m³ ha⁻¹ (SILVA et al., 2014) como fonte de K em lavouras próximas as usinas, inclusive em solos arenosos são recomendadas. O uso da terra com cana-de-açúcar neste trabalho em nenhum dos locais recebeu adubação com vinhaça, justificando os baixos teores de K no solo.

O efeito das pastagens num sistema ILP, ou apenas no uso da terra com pastagens está em ciclar os nutrientes e/ou traze-los das camadas mais profundas para a superfície do solo promovendo maior disponibilidade a cultura sucessora (FERREIRA et al., 2009) e até mesmo a inclusão de culturas com alta produção de massa seca e sistema de enraizamento intensivo podem favorecer a ciclagem de nutrientes (KUMAR et al. 2016),. Os teores de K podem ser aumentados no sistema ILP devido o retorno deste nutriente via resíduos de palhada na superfície, raízes no perfil do solo e através de resíduos animais (ANGHINONI et al., 2011). Os resultados deste trabalho não apresentaram incrementos na concentração de K no sistema ILP em Santo Inácio, devido a exportação do nutriente através da forragem consumida pelos animais durante o pastejo intenso no inverno e exportação pela cultura de grãos no verão ou até mesmo por perdas através de lixiviação no solo arenoso.

Os teores mais elevados de fósforo disponível nos usos da terra com soja justificam-se pelo uso de adubações fosfatadas, onde há uma adição anual de fertilizantes no solo (PORTUGAL, et al. 2010). Além disso, o uso da terra com pastagem também pode ser manejado com adubações fosfatadas, assim como ocorre em Santo Inácio, elevando os níveis de fósforo no solo, porém, parece não ser uma realidade na maioria das pastagens brasileiras (LOURENTE et al. 2011), as quais assemelham-se a de São Jorge do Ivaí, onde ocorre redução do teor de fósforo, devido à ausência de adubação (CHERUBIN et al., 2016c). Todavia, aliado as adubações fosfatadas, o SPD é responsável pelos maiores teores de fósforo em função da manutenção de resíduos de plantas na superfície do solo, o que favorece a ciclagem deste nutriente ao longo do tempo.

A ciclagem de nutrientes no SPD é dependente da espécie vegetal utilizada no sistema, da quantidade e qualidade dos resíduos produzidos pelas culturas de interesse e de cobertura e pela velocidade de liberação de nutrientes pela fitomassa em decomposição (TORRES et al., 2008). Assim, a braquiária é uma gramínea que apresenta alta produção de fitomassa seca e elevada taxa de decomposição (TORRES et al., 2008), resultando numa rápida disponibilidade de nutrientes como P, K, Ca e Mg no solo. Além disso, o K e o nitrogênio são os nutrientes disponibilizados em mais rapidamente e em maior quantidade no solo pelas gramíneas, enquanto o P e o Ca são liberados de forma gradual (CRUSCIOL et al., 2008). Além disso, a deposição de resíduos da cultura, a rhizodeposição, e o aumento do conteúdo de carbono orgânico na superfície resultam em efeitos significativos da atividade microbiana e consequente aumento na ciclagem de nutrientes (SILVA et al. 2016).

Os maiores teores de Ca foram encontrados na vegetação nativa, seguido pelos usos da terra cultivados com soja e inferiores nos usos com pastagem. O maior acúmulo de Ca observado na vegetação nativa é devido a reciclagem de nutrientes mais eficiente ocorrida neste uso da terra (ARAÚJO et al. 2004). No solo cultivado com soja, por sua vez, atribui-se elevados valores de Ca devido as correções realizadas com carbonato de cálcio (calcário) a fim de reduzir acidez (CHERUBIN et al. 2015).

3.4.3. Propriedades físicas do solo

A densidade do solo elevada deve-se à utilização de máquinas pesadas no manejo das culturas, tanto no cultivo da soja em SPD, como no cultivo da cana-de-açúcar e pelo pisoteio animal no solo sob pastagem e ILP. O manejo atual do solo e práticas utilizadas no cultivo da cana-de-açúcar estão causando decréscimo da qualidade estrutural do solo e consequentes efeitos negativos sobre o desenvolvimento e produtividade da cultura (CHERUBIN et al., 2016a). O cultivo da cana-de-açúcar resultou num dos maiores valores de densidade (Tabela 3) no solo argiloso de Londrina, chegando a valores próximos de $1,30 \text{ Mg m}^{-3}$, valor limitante ao crescimento de raízes nestas condições de solo (REYNOLDS et al., 2002; SÁ et al., 2016). Além disso, a macroporosidade apresentou valores inferiores a $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, considerado o limite crítico para boa condição física do solo (XU et al., 2002; SILVA et al., 2004), provavelmente em razão do intenso preparo do solo a cada novo plantio. Para as condições de solo arenoso, o uso da terra com cana-de-açúcar fez a densidade atingir valores superiores a $1,60 \text{ Mg m}^{-3}$ em Santo Inácio e $1,75 \text{ Mg m}^{-3}$ em São Jorge do Ivaí (Tabela 3) nas camadas

subsuperficiais (0,10 - 0,20 e 0,20 - 0,30 m), valor considerado crítico para as culturas agrícolas nestas condições (REYNOLDS et al., 2002; REICHERT et al., 2009).

Além do intenso preparo do solo no plantio da cana-de-açúcar, Cherubin et al. (2016c) apontam que ocorre um aumento da compactação ao longo do período de cultivo da cana-de-açúcar (5 anos). Assim, pode ocorrer um alívio da compactação no início do plantio, porém esse efeito tem curta duração. A medida em que o ciclo de cultivo atinge 3 a 4 cortes o solo volta a compactar-se, talvez de maneira mais intensa a cada ciclo, pela perda de carbono ocasionada no revolvimento do solo. Além disso, o nível de compactação do solo pode alterar a produção de massa seca das raízes de cana-de-açúcar, reduzindo a produção em 50%, quando a densidade atinge valores muito altos (FAGUNDES et al., 2014).

Ao analisar o impacto do uso da terra em sistemas que envolviam ILP e SPD, em Latossolo de cerrado com 62% de argila, Marchão et al. (2007) relataram que a pastagem aliada ao SPD, após 4 anos, ocasionou aumentos da densidade na camada superficial quando comparando à vegetação nativa. Os resultados reportados neste trabalho demonstram que ocorre aumento da densidade do solo quando a vegetação nativa é substituída por uso agrícola, independente do teor de argila no solo, concordando com Trabaquini et al. (2015), que também observaram diferenças significativas entre os atributos físicos do solo quando a vegetação nativa é substituída pelo uso agrícola, sendo que os valores de densidade e porosidade chegaram próximos aos valores críticos em função do maior período de uso agrícola.

Entretanto, a ILP quando conduzida juntamente com o SPD pode ser utilizado sem riscos aos atributos físicos do solo, desde que conduzido em intensidades moderadas de pastejo (altura de manejo do pasto de 0,35 m e 0,45 m) (BONETTI et al., 2015). Os resultados encontrados neste trabalho demonstram que nas áreas de pastagem a intensidade de pastejo pode ser controlada pela carga animal, visto que nas áreas onde a carga é baixa, como por exemplo em Londrina (2,9 UA ha⁻¹) e São Jorge do Ivaí (1,2 UA ha⁻¹), a densidade do solo foi menor na pastagem quando comparado aos usos com soja e cana, principalmente na camada superficial. Logo em Santo Inácio, onde a carga animal é considerada alta (4 UA ha⁻¹), a densidade do solo foi mais elevada, refletindo também na dinâmica de poros, onde a macroporosidade é reduzida e a microporosidade aumentada. Segundo Ortigara et al. (2014) o pisoteio animal é causador de alterações na estrutura do solo, causando aumento nos valores de densidade, resistência a penetração e redução nos valores de macroporosidade.

Da mesma forma, o intenso tráfego de máquinas, aliado ao tráfego com umidade do solo inadequada, tem elevado a densidade do solo manejado sob SPD. Neste trabalho,

elevados valores de densidade foram encontrados em todas os locais de estudo, tanto na camada superficial quanto na camada subsuperficial. Entretanto, o SPD com histórico de longa duração preserva a qualidade estrutural do solo e promove condições físicas adequadas para o crescimento das culturas, onde o nível de compactação encontrado no SPD bem gerido não é crítico para o crescimento e rendimento das culturas (MORAES et al., 2016). Além disso, o SPD ao longo do tempo, é responsável pelo fenômeno de endurecimento por envelhecimento (MORAES et al., 2017), levando a uma maior resistência do solo a degradação física e, é considerado o sistema de manejo ideal, quando bem gerido, para melhorar a qualidade dos solos arenosos (REICHERT et al., 2016).

3.4.4. Estratégias de manejo para sustentar/ melhorar a qualidade química e física do solo

Os solos de textura média e arenosa situados no Noroeste do Paraná constituem-se em um ambiente frágil, do ponto de vista agrícola, não sendo indicados para o cultivo da soja (EMBRAPA, 2011b), devido ao favorecimento dos processos erosivos, sendo indicados para o cultivo de pastagem. Contrariamente, nossos resultados demonstram que além do cultivo com pastagem, os solos sobre a formação Caiuá podem ser cultivados com soja desde que respeitados os princípios da agricultura de conservação, ou seja, sem revolvimento do solo, devendo aplicar corretivos e fertilizantes e manter cobertura permanente sobre o solo. Além disso, o cultivo da soja em sistema de ILP apresentou elevado potencial para aumentar a qualidade do solo, estando de acordo com as recomendações de Donagemma et al. (2016) para manejo de solos arenosos.

Quando a correção do solo é realizada antes da instalação de qualquer uso da terra, os níveis de Ca e Mg são elevados, bem como ocorre redução da acidez (BERTOSSO et al., 2016). Isso explica os resultados encontrados na pastagem em Londrina, onde a correção do solo não foi realizada. Assim, em solos tropicais, o SPD é a principal estratégia de manejo para aumentar a concentração de matéria orgânica no solo (PINHEIRO et al., 2014). Em solos arenosos, além de promover o aumento do teor de carbono e a promoção de maior estabilidade de agregados, a matéria orgânica é o principal determinante da fertilidade do solo (REICHERT et al., 2016). É impossível desenvolver uma solução prioritária, única e simples para mitigar a degradação do solo devido as diferenças de clima e solo, a não ser a melhoria do manejo do carbono (TULLY et al., 2015) e a adoção do SPD e ILP são estratégias fundamentais.

O uso de resíduos orgânicos como a vinhaça (SILVA et al., 2014) e a torta de filtro (SANTOS et al., 2011), correto manejo da adubação, seguindo as recomendações técnicas e a remoção racional de resíduos da superfície do solo são estratégias para aumentar a ciclagem de nutrientes e melhorar a fertilidade do solo cultivado com cana-de-açúcar. Assim como a utilização de plantas de cobertura e de um sistema de rotação de culturas no SPD (FERREIRA et al., 2016). Nas áreas de pastagens o fornecimento de nutrientes através da adubação mineral ou até mesmo adubação orgânica (SCHERER et al., 2010) proporciona maior acúmulo de nutrientes no solo e disponibilidade a forrageira.

O controle do tráfego de máquinas preserva a qualidade física do solo, além de aumentar o desenvolvimento radicular, podendo incrementar em até 18 % a produtividade de cana-de-açúcar (SOUZA et al., 2014). Além disso, quando realizado tráfego na umidade correta do solo os processos de compactação podem ser evitados no SPD (SAFFIH-HDADI et al., 2009). Outras medidas para mitigar a compactação em solos cultivados com cana-de-açúcar são o cultivo mínimo (TAVARES et al., 2010; CHERUBIN et al., 2016c), planos de rotação de culturas, ou culturas de cobertura na entressafra (CHERUBIN et al., 2016), manutenção da palhada na superfície (DALCHIAVON et al., 2013), além do controle de tráfego. Nos sistemas de ILP e pastagens o controle da taxa de lotação animal é fundamental para evitar o processo de compactação no solo., através da manutenção de uma altura de pastejo superior a 10 cm (MORAES et al., 2014).

Em alguns casos, para mitigar os efeitos da compactação do solo no SPD, Nunes et al. (2015) recomendaram o uso de semeadoras equipada com haste fixa, trabalhando a uma profundidade de 17 cm, resultando num pequeno revolvimento do solo na linha de plantio, aliviando a compactação, porém, não descaracterizando o SPD.

3.7. CONCLUSÃO

A intensificação da agricultura através do cultivo da soja e da cana-de-açúcar não induz significativa degradação química e física em relação a pastagem (especialmente as mal manejadas), e em alguns casos práticas de correção e fertilização podem melhorar a qualidade desses solos, mesmo em solos naturalmente frágeis a degradação.

O uso da terra na região sul do Brasil com pastagem, cana-de-açúcar e soja tem alterado a estrutura física do solo, podendo chegar a valores críticos, sendo necessário um profundo monitoramento das propriedades físicas destes solos.

3.8. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- ANGHINONI, I. et al. Ciclagem de nutrientes em Integração Lavoura-Pecuária. **Synergismus Scyentífica**, v. 6, p. 1-8, 2011.
- ARAÚJO, E. A. et al. Uso da terra e propriedades físicas e químicas de Argissolo Amarelo distrófico na Amazônia Ocidental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 307-315, 2004.
- BALOTA, E. L. et al. Soil quality in relation to forest conversion to perennial or annual cropping in southern Brazil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 39, n. 4, p. 1003-1014, 2015.
- BERTOSSI, A. P. et al. Soil cover and chemical and physical attributes in oxisol in the Atlantic Forest Biome. **Revista Árvore**, v. 40, n. 2, p. 219-228, 2016.
- BONETTI, J. A. et al. Influência do sistema integrado de produção agropecuária no solo e na produtividade de soja e braquiária. **Pesquisa Agropecuária Tropical (Agricultural Research in the Tropics)**, v. 45, n. 1, 2015.
- BRASIL. **Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura** © Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2012.
- CHERUBIN, M. R. et al. Sugarcane expansion in Brazilian tropical soils—Effects of land use change on soil chemical attributes. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 211, p. 173-184, 2015.
- CHERUBIN, M. R. et al. Soil physical quality response to sugarcane expansion in Brazil. **Geoderma**, v. 267, p. 156-168, 2016a.
- CHERUBIN, M. R. et al. Assessing soil structural quality under Brazilian sugarcane expansion areas using Visual Evaluation of Soil Structure (VESS). **Soil & Tillage Research**, v. xx, p. xx-xx, 2016b.
- CHERUBIN, M. R. et al. Phosphorus pools responses to land-use change for sugarcane expansion in weathered Brazilian soils. **Geoderma**, v. 265, p. 27-38, 2016c.
- COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. **Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**, SBCS-NRS, 2016. 376 p.
- CRUSCIOL, A. A. C. et al. Taxas de decomposição e de liberação de macronutrientes da palhada de aveia preta em plantio direto. **Bragantia**, v. 67, p. 481-489, 2008.
- DALCHIAVON, F. C. et al. Sugarcane trash management assessed by the interaction of yield with soil properties. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 37, p. 1709-1719, 2013.

DONAGEMMA, G. K. et al. Caracterização, potencial agrícola e perspectivas de manejo de solos leves no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1003-1020, 2016.

DORNELES, E. P. et al. Tillage, fertilization systems and chemical attributes of a Paleudult. **Scientia Agrícola**, v. 72, n. 2, p. 175-186, 2015.

EMBRAPA. **Manual de métodos de análises de solos**. 2.ed. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2011. 230p.

EMBRAPA. **Tecnologias de produção de soja** – Região Central do Brasil 2014. – Londrina: Embrapa Soja, 2013. 265p.; 21cm. – (Sistemas de Produção / Embrapa Soja, ISSN 2176-2902; n.16), 2011b.

FAGUNDES, E. A. A. et al. Desenvolvimento inicial de variedades de cana-de-açúcar em Latossolo submetidas a níveis de compactação do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 18, n. 2, p. 188-193, 2014.

FERREIRA, E. V. O. et al. Concentração do potássio do solo em sistema de integração lavoura-pecuária em plantio direto submetido a intensidades de pastejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 1675-1684, 2009.

FERREIRA, A. O. et al. Can no-till grain production restore soil organic carbon to levels natural grass in a subtropical Oxisol?. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 229, p. 13-20, 2016.

FOLONI, J. S. S; ROSOLEM, C. A. Produtividade e acúmulo de potássio na soja em função da antecipação da adubação potássica no sistema plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 32, n. 4, p. 1549-1561, 2008.

GOLDEMBERG, J. A. N. et al. Meeting the global demand for biofuels in 2021 through sustainable land use change policy. **Energy Policy**, v. 69, p. 14–18, 2014.

KUMAR, S.; GARG, A. K.; AULAKH, M. S. Effect of Conservation Agriculture Practices on Physical, Chemical and Biological Attributes of Soil Health Under Soybean–Rapeseed Rotation. **Agricultural Research**, v. 5, n. 2, p. 145-161, 2016.

LOURENTE, E. R. P. et al. Atributos microbiológicos, químicos e físicos de solo sob diferentes sistemas de manejo e condições de cerrado. **Pesquisa Agropecuária Tropical** v. 41, n. 1, p. 20-28, 2011.

MARCHÃO, R. L. et al. Qualidade física de um Latossolo Vermelho sob sistemas de integração lavoura-pecuária no Cerrado. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 42, n. 6, p. 873-882, 2007.

MARTÍNEZ, E. et al. Chemical and biological properties as affected by no-tillage and conventional tillage systems in an irrigated Haploxeroll of Central Chile. **Soil & Tillage Research**, v. 126, p. 238-245, 2013.

MORAES, A. et al. Integrated crop–livestock systems in the Brazilian subtropics. **European Journal of Agronomy**, v. 57, p. 4-9, 2014.

MORAES, M. T. et al. Soil physical quality on tillage and cropping systems after two decades in the subtropical region of Brazil. **Soil and Tillage Research**, v. 155, p. 351-362, 2016.

MORAES, M. T. et al. Age-hardening phenomena in an oxisol from the subtropical region of Brazil. **Soil & Tillage Research**, v. 170, p. 27-37, 2017.

NASCENTE, A. S.; STONE, L. F.; CRUSCIOL, A. C. Soil chemical properties affected by cover crops under no-tillage system. **Revista Ceres**, v. 62, n.4, p. 401-409, 2015.

NUNES, M. R. et al. Mitigation of clayey soil compaction managed under no-tillage. **Soil and Tillage Research**, v. 148, p. 119-126, 2015.

ORTIGARA, C. et al. Uso do solo e propriedades físico-mecânicas de Latossolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 619-626, 2014.

OTTO, R. et al. Manejo da adubação potássica na cultura da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 4, p. 1137-1145, 2010.

PINHEIRO, É. F. M. et al. Tillage systems effects on soil carbon stock and physical fractions of soil organic matter. **Agricultural Systems**, v. 132, p. 35-39, 2014.

PORTUGAL, A. F.; COSTA, O. D. V.; COSTA, L. M. Propriedades físicas e químicas do solo em áreas com sistemas produtivos e mata na região da Zona da Mata mineira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa**, v. 34, n. 2, p. 575-585, 2010.

R Core Team (2016). R: A language and environment for statistical computing. **R Foundation for Statistical Computing**, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

RAIJ, B. V. et al. **Recomendações de adubação e calagem para o Estado de São Paulo**. 2.ed. rev. e atual. Campinas: Instituto Agrônomo/Fundação IAC, 1997. 285p. (Boletim Técnico, 100).

REICHERT, J. M. et al. Reference bulk density and critical degree-of-compactness for no-till crop production in subtropical highly weathered soils. **Soil and Tillage Research**, v. 102, n. 2, p. 242-254, 2009.

REICHERT, J. M. et al. Land use effects on subtropical, sandy soil under sandzation/desertification processes. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 233, p. 370-380, 2016.

REYNOLDS, W. D. et al. Indicators of good soil physical quality: density and storage parameters. **Geoderma**, v. 110, p. 131-146, 2002.

SÁ, M. A. C. et al. Qualidade física do solo e produtividade da cana-de-açúcar com uso da escarificação entre linhas de plantio. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1610-1622, 2016.

SÁ, J. C. M. et al. Low-carbon agriculture in South America to mitigate global climate change and advance food security. **Environment International**, v. 98, p. 102-112, 2017.

SAFFIH-HDADI, K. et al. A method for predicting soil susceptibility to the compaction of surface layers as a function of water content and bulk density. **Soil & Tillage Research**, v. 105, p. 96-103, 2009.

SANTOS, D. H. et al. Qualidade tecnológica da cana-de-açúcar sob adubação com torta de filtro enriquecida com fosfato solúvel. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 15, n. 5, p. 443-449, 2011.

SCHERER, E. E.; NESI, C. N.; MASSOTI, Z. Atributos químicos do solo influenciados por sucessivas aplicações de dejetos suínos em áreas agrícolas de Santa Catarina. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, p. 1375-1388, 2010.

SEVERIANO, E. C. et al. Compactação de solos cultivados com cana-de-açúcar: I - Modelagem e quantificação da compactação adicional após as operações de colheita. **Engenharia Agrícola**, v. 30, n. 3, p. 404-413, 2010.

SILVA, A. P. M.; BONO, J. A. M.; PEREIRA, F. A. R. Aplicação de vinhaça na cultura da cana-de-açúcar: Efeito no solo e na produtividade de colmos. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v.18, n. 1, p. 38-43, 2014.

SILVA, G. N. et al. Management systems and soil use on fractions and stocks of organic carbon and nitrogen total in cerrado Latosol. **Bioscience Journal**, v. 32, n. 6, p. 1982-1982, 2016.

SOUZA, G. S. et al. Effects of traffic control on the soil physical quality and the cultivation of sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 38, p. 135-146, 2014.

STRASSBURG, B. B. N. et al. When enough should be enough: Improving the use of current agricultural lands could meet production demands and spare natural habitats in Brazil. **Global Environmental Change**, v. 28, p. 84-97, 2014.

TAVARES, O. C. H.; LIMA, E.; ZONTA, E. Crescimento e produtividade da cana planta cultivada em diferentes sistemas de preparo do solo e de colheita. **Acta Scientiarum Agronomy**, v. 32, n. 1, p. 61-68, 2010.

TEDESCO, M. J. et al. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. 2.ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (Boletim Técnico, 5)

TORMENA, C. A. et al. Corn stover harvest and tillage impacts on near-surface soil physical quality. **Soil and Tillage Research**, v. 166, p. 122-130, 2017.

TORRES, J. L. R.; PEREIRA, M. G.; FABIAN, A. J. Produção de fitomassa por plantas de cobertura e mineralização de seus resíduos em plantio direto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 43, n. 3, p. 421-428, 2008.

TRABAQUINI, K.; FORMAGGIO, A. R.; GALVÃO, L. S. Changes in physical properties of soils with land use time in the Brazilian savanna environment. **Land Degradation & Development**, v. 26, n. 4, p. 397-408, 2015.

TULLY, K. et al. The state of soil degradation in Sub-Saharan Africa: Baselines, trajectories, and solutions. **Sustainability**, v. 7, n. 6, p. 6523-6552, 2015.

VIEIRA, R. C. B. et al. Critérios de calagem e teores críticos de fósforo e potássio em Latossolos sob plantio direto no Centro-Sul do Paraná. **Revista brasileira de Ciência do solo**. Vol. 37, n. 1, p. 188-198, 2012.

XU, X.; NIEBER, J. L.; GUPTA, S. C. Compaction Effect on the Gas Diffusion Coefficient in Soils. **Soil Science. Society. America. Journal**, v. 56, p. 1743-1750, 1992.

4. ARTIGO 3: SOIL MANAGEMENT ASSESSMENT FRAMEWORK (SMAF) COMO ESTRATÉGIA DE CARACTERIZAÇÃO DO USO DA TERRA

4.1. RESUMO

O uso da terra no Brasil deve ser guiado por princípios sólidos de sustentabilidade, uma vez que as alterações climáticas, a segurança alimentar e energética, e a conservação da biodiversidade estão em pauta. Para que estes princípios sejam alcançados, promover e avaliar a qualidade do solo é a base para a gestão sustentável do uso da terra. Dessa maneira, os objetivos deste estudo foram aplicar a SMAF como estratégia para avaliar a qualidade do solo em função de diferentes usos da terra (vegetação nativa, pastagem, cana-de-açúcar e soja) na região Sul do Brasil. Amostras de solo foram coletadas em três camadas (0,0 – 0,10; 0,10-0,20; 0,20 -0,30 m) nos municípios de Londrina, Santo Inácio e São Jorge do Ivaí, região norte do PR, analisados os atributos químicos (pH, fósforo e potássio), físico (densidade do solo) e biológico (carbono orgânico do solo), e calculado o índice de qualidade do solo. A SMAF foi capaz de quantificar alterações na qualidade do solo em função de diferentes usos da terra. A capacidade potencial de uso foi 78, 62, 61 e 51 % para vegetação nativa, agricultura sob sistema plantio direto, pastagem e cana-de-açúcar respectivamente. Sistemas conservacionistas, como a agricultura sob sistema plantio direto, o manejo das pastagens e o sistema de integração lavoura-pecuária demonstraram potencial para melhorar a qualidade do solo.

PALAVRAS-CHAVE: indicadores da qualidade do solo, mudança de uso da terra, plantio direto

PAPER 3: SOIL MANAGEMENT ASSESSMENT FRAMEWORK (SMAF) AS A LAND USE CHARACTERIZATION STRATEGY

4.2. ABSTRACT

Agricultural land use in Brazil should be guided by principles of sustainability, since it is directly related to climate change, food and energy security, and biodiversity conservation. For these principles to be achieved, promoting and assessing soil quality is the basis for sustainable land use management. In this way, the aim of this study was to apply the SMAF guidelines as a strategy to evaluate land use (native vegetation, pasture, sugarcane and soybean) effects on soil quality in the southern region of Brazil. Soil was sampled in three layers (0.0 - 0.10, 0.10 - 0.20, 0.20 - 0.30 m) in Londrina, Santo Inácio and São Jorge do Ivaí, Northern, PR – Brazil. The soil quality indicators analyzed were: chemical attributes (pH, phosphorus and potassium), physical (bulk density) and biological (soil organic carbon). Using SMAF scoring curves that measured values were transformed (0 to 1 range) and an overall soil quality index was calculated. The results of this study suggest that native vegetation soils presented a higher soil quality index, functioning at 78% of its potential capacity. The conversion from native vegetation to pasture, soybean cultivated under no-tillage system and sugarcane may reduce the soil's capacity to perform its functions to 61, 62 and 51%, respectively. Therefore, better management practices such as no-tillage system should be adopted in tropical soils to tackle soil degradation problems, food insecurity and climate changes.

Keywords: Soil Quality Indicators. Land use change. No-till system.

4.3. INTRODUÇÃO

A qualidade do solo (QS) pode ser definida como a capacidade de o solo funcionar dentro de um ecossistema natural ou manejado, a fim de sustentar a produtividade animal e vegetal, manter a qualidade da água e do ar e promover a saúde humana (KARLEN et al. 1997). Assim, QS é a integração das propriedades biológicas, físicas e químicas, que habilita o solo a exercer suas funções na plenitude (VEZZANI; MIELNICZUK, 2009).

O uso da terra no Brasil deve ser guiado por princípios sólidos de sustentabilidade, uma vez que as alterações climáticas, a segurança alimentar e energética, e a conservação da biodiversidade estão em pauta (LAPOLA et al., 2014). Para que estes princípios sejam alcançados, promover e avaliar a qualidade do solo é a base para a gestão sustentável do uso da terra (KARLEN; RICE 2015).

As maiores áreas de uso da terra no Brasil são ocupadas por pastagens (DIAS-FILHO, 2014), cultivo de grãos, como soja e milho, principalmente sob SPD (SÁ et al., 2017) e cana-de-açúcar. Atualmente, o aumento da demanda por bioenergia, tem ocasionado a expansão das áreas de cana-de-açúcar na região centro sul (GOLDEMBERG et al., 2014; FRANCO et al., 2015) e, o aumento da demanda por alimentos tem expandido as áreas de produção de grãos para solos marginais (ou seja, arenosos), sendo considerado a última fronteira agrícola brasileira (DONAGEMMA et al., 2016). Além disso, a necessidade de aumento na produção de carne bovina (BARRETO et al., 2013), tem refletido numa intensificação das áreas de pastagens (STRASSBURG et al., 2014) e na incorporação do sistema ILP em consorcio nas áreas cultivadas com grãos sob SPD (SALTON et al., 2014; MORAES et al., 2014).

A maioria dos estudos que avaliam a SQ busca sumarizar as informações em um índice de QS, que possa ser um indicador útil para o monitoramento de mudanças no ambiente e sensível aos efeitos das práticas de manejo ou usos da terra, responsáveis pela degradação do solo (ANDREWS et al., 2004) No entanto, devido a heterogeneidade do solo e clima, associado a questões ambientais, sociais e políticas que afetam o manejo do solo, a busca por um índice universal de SQ mostra-se inviável (PRADO et al., 2016). Desta forma, diversas estratégias, *frameworks*, modelos e sistemas têm sido extensivamente desenvolvidas e testadas ao redor do mundo para elaborar compreensivos índices de QS que possam ser utilizadas para propósitos e condições edafoclimáticas específicas (por exemplo, ANDREWS et al., 2002; 2004; LIMA et al., 2013; MUKHERJEE; LAL, 2014; ASKARI; HOLDEN, 2015; SWANEPOEL et al., 2015; CHERUBIN et al., 2016b).

Dentre as diversas ferramentas disponíveis na literatura, destaca-se a *Soil Management Assessment Framework* (SMAF) descrita por ANDREWS et al. (2004). A SMAF é baseada em três etapas: seleção de indicador, interpretação do indicador e integração de indicadores em um índice de qualidade do solo (ANDREWS et al., 2004), sendo uma ferramenta precisa, sensível e dinâmica (KARLEN et al., 2008) para avaliação das mudanças no solo induzidas por diferentes usos e manejos do solo (ANDREWS et al. 2004). Essa ferramenta foi inicialmente desenvolvida e usada em solos norte-americanos (WIENHOLD et al., 2009) e

mais recentemente tem sido usada por cientistas de outras partes do mundo, como por exemplo África do Sul (SWANEPOEL et al., 2015) e Nepal (KALU et al., 2015).

No Brasil o uso da SMAF foi introduzido por Cherubin et al. (2016), em estudo que visou avaliar os impactos da mudança de uso da terra (*i.e.*, vegetação nativa – pastagem-cana-de-açúcar) em solos tropicais do Cerrado. Mais recentemente, Cherubin et al. (2017) testou essa ferramenta para diversos usos e manejos em solos subtropicais com contrastante textura no sul do Brasil. Os resultados foram promissores, demonstrando que a SMAF pode ser usada como uma ferramenta para avaliar a qualidade dos solos brasileiros, ajudando agricultores, gestores de terras e políticos a tomar melhores decisões sobre práticas sustentáveis de uso e manejo do solo. Diante da potencialidade do uso da SMAF no Brasil, novos estudos sob condições edafoclimáticas contrastantes e sistemas de manejo ainda não estudados, como por exemplo sistema ILP, principalmente em solos mais frágeis em processo de expansão da agricultura, devem ser encorajados para ajustar e validar os algoritmos presentes na SMAF, expandindo seu uso no país. Assim, as hipóteses testadas nesse trabalho foram que a expansão da cana-de-açúcar sobre áreas de pastagem não degrada o solo e que sistemas conservacionistas podem melhorar a qualidade desses solos. As mudanças na QS poderão ser quantificadas adequadamente usando SMAF. Portanto, o objetivo deste trabalho foi utilizar SMAF para avaliar a SQ em função de diferentes usos da terra (vegetação nativa, pastagem, cana-de-açúcar, soja cultivado sob SPD) em três locais com solos contrastantes na região Sul do Brasil.

4.4. MATERIAL E MÉTODOS

A descrição dos locais e usos da terra, amostragem e coleta de solo para determinação da densidade do solo, carbono orgânico, pH, fósforo e potássio podem ser consultados no item Materiais e Métodos do Artigo 1 desta dissertação.

Para este artigo foram realizadas as seguintes alterações: em Londrina os usos da terra SO3 e SO4 passaram a constituir o uso SPM (soja em sistema de preparo mínimo). Os usos da terra SO1 e SO2, além do uso da terra com soja em Santo Inácio e São Jorge do Ivaí passaram a constituir o uso SPD (soja sob sistema plantio direto).

4.4.1. Indicadores analisados

A densidade do solo foi calculada dividindo-se a massa de solo seco a 105 °C por 48 horas em estufa, pelo volume do anel conforme metodologia descrita por Embrapa (2011). Para as análises de P e K as amostras deformadas foram secas em estufa de circulação de ar forçado a temperatura de 45° C. até peso constante, posteriormente foram passadas em peneira de 2 mm de diâmetro para obtenção da TFSA. Os elementos foram extraídos pelo método Mehlich⁻¹, onde K foi determinado em fotômetro de chamas e o P em espectrofotômetro conforme metodologia descrita por Tedesco et al. (1995). O conteúdo de carbono orgânico do solo (COS) foi determinado por combustão seca através de analisador elementar (*Flash 2000 Organic Elemental Analyzer*).

4.4.2. Avaliação da qualidade do solo

A *Soil Management Assessment Framework* (SMAF) foi utilizado para avaliar os efeitos do uso da terra sobre a qualidade do solo. Na etapa I os parâmetros que compuseram o conjunto mínimo de indicadores foram selecionados baseados na literatura associado a experiência dos pesquisadores. Os parâmetros utilizados foram pH, P, K, COS e Ds, compreendendo pelo menos um indicador de cada componente do solo (i.e., químicos, físicos e biológicos), conforme recomendado por Karlen et al. (2008) e Cherubin et al. (2017). Além disso, a utilização de um conjunto mínimos de indicadores (como aqueles aqui selecionados), englobando parâmetros chaves para o funcionamento do solo também foi testada e recomendada por Cherubin et al. (2016b).

Na etapa II, os valores medidos dos indicadores de solo expressos em diferentes unidades foram transformados em valores (scores) variando de 0 a 1 usando os algoritmos (scoring curves) presentes na planilha de cálculos da SMAF. Os algoritmos foram desenvolvidos para cada indicador, baseados na taxonomia do solo, mineralogia, textura, temperatura típica e regimes de precipitação para a área de amostragem, declive da área, época de amostragem, cultura dominante e métodos analíticos utilizados, conforme descrito por Andrews et al. (2004) e Wienhold et al. (2009) e apresentado na tabela 1.

Tabela 1 - Algoritmos de interpretação dos indicadores de qualidade do solo; pH (pH), P (mg dm⁻³), K (mg dm⁻³), COS (%) e Ds (Mg m⁻³).

Indicador	Algoritmo*	Constante	Fator local específico
pH	$y = a * \exp [-(pH-b)^2 / (2 * c^2)]$	$a = 1,0$	$b, c = f(\text{cultura})$
P	Se $P \leq \max(\text{para cultura e método})$, então $y = (a * b + c * P^d) / (b + P^d)$	$a = 9,26 \times 10^6$; $c = 1,0$; $d = 3,06$	$b = f(\text{cultura, COS, textura, método})$
	Se, $P > \max(\text{para declividade e método})$, então $y = a - b \exp(-c * P^d)$, mais $y = 1$	$a = 9,26 \times 10^6$; $c = 1,0$; $d = 3,06$	$b = f(\text{cultura, COS, textura, método})$
K	$y = 1,06 * (1 - \exp^{-0,0122 * K})$	$a = 1,07 / 1,20$, $b = -0,016 / -0,02$	$a, b = f(\text{cultura, textura})$
COS	$y = a / [1 + b * \exp(-c * COS)]$	$a = 1$; $b = 50,1$	$c = f(\text{classe, textura, clima})$
Ds	$y = a - b * \exp(-c * Ds^d)$	$a = 0,994$;	$b, c, d = f(\text{textura, mineralogia})$

*Adaptado de Andrews et al. (2004) e Wienhold et al. (2009)

O fator de classe de matéria orgânica (baseado na classificação do solo e utilizado para a pontuação de COS) foi de 4 (matéria orgânica do solo baixa) para todos os locais de estudo. O fator de classe de textura (utilizado para a pontuação de Ds, COS) foi de 4 (solo argiloso) para Londrina, 1 para Santo Inácio (solo arenoso) e 2 para São Jorge do Ivaí (solo franco-arenoso). O fator clima (utilizado para a pontuação de COS) foi de 1 (≥ 170 graus dia e ≥ 550 mm de precipitação anual média) para os três locais de estudo. Os fatores de classe de mineralogia, utilizados para a pontuação de Ds, foram 3 (argila 1: 1 e óxidos de Fe e Al) e os fatores de inclinação e classe de intemperismo, utilizados para pontuar P, foram 2 (2-5% de inclinação) e 2 para grau de intemperismo), novamente, para todos os locais. O método utilizado para medir P extraível foi Mehlich-1 (classe 1). Recomendações de pH, P e K para solos do sul do Brasil (CQFS-RS/SC, 2016) foram utilizadas para definir os limites (nível crítico) desses indicadores dentro dos seus respectivos algoritmos.

Por fim, na etapa III os scores indicadores individuais foram integrados em um índice de qualidade do solo (IQS) ponderado, somando os escores dentro de cada componente [químicos (pH, P e K), físico (Ds) e biológico (COS)] e dividindo-os pelo número de componentes. A contribuição de cada componente no índice final também foi calculada. Os índices foram calculados individualmente para cada camada de solo (0,0 – 0,10; 0,10 – 0,20 e 0,20 – 0,30 m) e também, ponderado para a camada 0,0 - 0,30 m.

4.4.3. Análise dos dados

A análise de variância (Anova) foi calculada através da rotina PROC GLM para testar a influência do uso da terra em cada local em escores individuais do SMAF, e para os índices de qualidade do solo. Quando significativos os valores dos resultados da análise de variância ($F= p<0.05$), as médias foram comparadas com o teste de Tukey ($p <0,05$). Todos os procedimentos estatísticos foram concluídos usando o software Statistical Analysis System - SAS 9.3 (SAS Inc, Cary, EUA).

4.5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

As funções de pontuações para cada indicador de qualidade do solo são tem sua forma definida de acordo com o indicador e sua relação com as funções do solo relacionadas (ANDREWS et al., 2004). Assim, para aqueles indicadores onde altos valores são considerados “bons” a curva é conhecida como “mais é melhor” e aplica-se a P, K e COS. Já para os indicadores onde os valores baixos são considerados “bons” a curva é conhecida como “menos é melhor”, como é o caso da Ds. Por fim, a indicadores como o pH que apresenta um valor ótimo, sendo a curva conhecida como “ponto ótimo”. Portanto, o algoritmo para pH do solo é dependente de um valor ótimo para cada cultura, o qual, para a maioria das espécies agrícolas é considerado 6,0. Para as áreas deste estudo o pH variou de 5 a 7, sendo mais próximos de 5 no solo argiloso de Londrina e mais elevados nos solos arenosos e franco-arenosos de Santo Inácio e São Jorge do Ivaí (Figura 1).

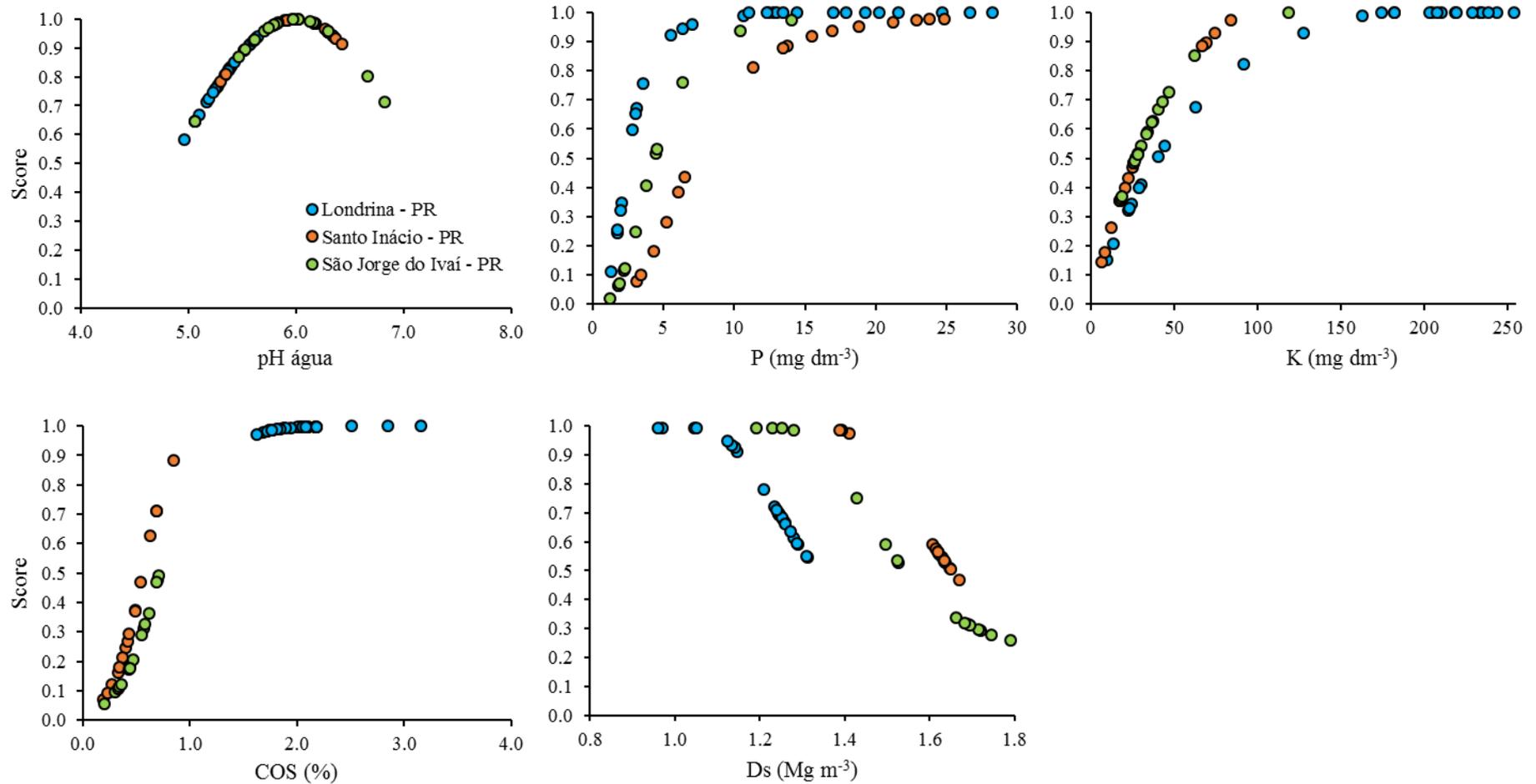
O algoritmo para a interpretação do índice em função de P, considera além da cultura de interesse, a textura e a concentração de COS no solo. A disponibilidade de P no solo está associada a sua adsorção em partículas de argila. Assim, solos argilosos com uma menor concentração de P atingem score maior que solos arenosos com a mesma concentração de P. Está relação é observada na Figura 1, onde 5 mg dm⁻³ de P representa um score de 0,9 para os usos da terra em Londrina e score de 0,3 para os usos da terra no solo arenoso de Santo Inácio.

As funções de pontuação para COS e Ds também considera em seus algoritmos o fator específico textura (Tabela 1). Como a textura é variável nas condições deste estudo, é possível verificar que em solos arenosos o conteúdo de COS necessário para atingir scores elevados, próximos a um, é inferior ao conteúdo de C necessário para solos argilosos. Além disso os

usos da terra em Santo Inácio e São Jorge do Ivaí apresentaram baixo conteúdo de C, reduzindo o score de qualidade do solo relacionado a este atributo biológico, enquanto em Londrina praticamente todos os usos da terra atingiram scores máximos (Figura 1). A mesma relação textural foi observada para a densidade, onde o valor de $1,2 \text{ Mg m}^{-3}$, resultou para a classe de solo argilosa um score de 0,7, enquanto nas classes arenosa e franca-arenosa atingiu o score máximo (1,0). Por sua vez, as diferenças entre solos arenosos e franco-arenosos são observadas em densidades mais elevadas, onde o valor de $1,4 \text{ Mg m}^{-3}$ corresponde a um índice de 0,75 para a classe franca-arenosa e 1,0 para a classe arenosa.

Além disso, as funções de pontuação indicaram elevada amplitude de scores para a densidade, variando de 0,27 a 1,0 (Tabela 3), ou seja, $1,78 \text{ Mg m}^{-3}$ a $0,85 \text{ Mg m}^{-3}$ (Figura 1). Conforme a função de pontuação “menos é melhor” e a textura do solo, foram observadas notáveis variações em todos os locais, confirmando a sensibilidade da densidade, como indicador da qualidade do solo em função de diferentes usos da terra, corroborando com Almeida et al. (2016), uma vez que a densidade é bastante sensível ao manejo do solo e está diretamente relacionada a porosidade, infiltração de água e ao crescimento radicular das plantas.

Figura 1 - Funções de pontuação (scoring functions) para cada indicador de qualidade do solo avaliado nos diferentes sistemas de uso da terra, destacando os três locais de estudo. *As formas das curvas variam de acordo com o indicador, sendo: “mais é melhor” (more is better) para COS, P e K; “menos é melhor” (less is better) para Ds; e ponto ótimo (mid-point optimum) para pH do solo.



O solo sob pastagem em Londrina, apresentou moderada acidez com pH de 5,1 (Tabela 2) e correspondente score de 0,66 (Tabela 3). Por outro lado, os scores de P e K alcançaram valores máximos (1,0) no uso da terra com soja (Tabela 2). Esta condição é alicerçada no uso de adubações fosfatadas e potássicas na cultura da soja, onde a uma adição anual de fertilizantes ao solo (PORTUGAL et al., 2010). O baixo score de P calculado para a vegetação nativa, chegando a valor inferior a 0,10 na camada de 0,20 – 0,30 m, evidencia a baixa fertilidade natural de P nos solos originados de basalto e a elevada adsorção em solos argilosos. Entretanto, o baixo aporte de potássio na pastagem, aliado com a alta exportação pela cana-de-açúcar (OTTO et al., 2010), resultou menores scores, com valores inferiores a 0,30 (Tabela 3). Além disso, o solo cultivado com cana-de-açúcar e com soja, apresentaram os menores scores para densidade do solo, em comparação a vegetação nativa e a pastagem. Por outro lado, o componente biológico, apresentou scores de qualidade superior a 0,9 em todos os usos da terra, caracterizando a relação intrínseca entre carbono orgânico e argila, reportada por Conceição et al. (2013).

Em Santo Inácio, o elevado score ($>0,80$) observado para o pH em todas as camadas (Tabela 2), reitera a existência de uma aproximação do valor ótimo (6,0) para todos os usos da terra. O P, novamente apresentou baixa pontuação na vegetação nativa, chegando próximo ao limite inferior (0,01) nas camadas mais profundas (Tabela 3). Os menores scores de potássio foram observados na cana-de-açúcar e na soja, sendo a densidade por sua vez, menor na vegetação nativa, o que constituiu maior scores de qualidade do solo em relação aos demais usos. O uso histórico da pastagem em Santo Inácio com adubações periódicas justifica o score elevado para potássio neste uso.

Tabela 3 - Scores dos indicadores de qualidade do solo para as camadas de 0,0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m sob diferentes usos da terra (VN – vegetação nativa; PA – pastagem; CA – cana-de-açúcar; SPD – soja sob sistema plantio direto; e SCM – soja em sistema de plantio convencional) em Londrina, Santo Inácio e São Jorge do Ivaí, Paraná – Brasil.

Uso da Terra	Londrina					Santo Inácio					São Jorge do Ivaí				
	Indicadores de qualidade do solo (scores)														
	pH	P	K	Ds	COS	pH	P	K	Ds	COS	pH	P	K	Ds	COS
	0,0 – 0,10 m					0,0 – 0,10 m					0,0 – 0,10 m				
VN	0,86a*	0,44b	0,84a	0,99a	1,00ns	0,97ns	0,52b	0,90 ^a	0,99a	0,52a	0,93a	0,47ab	0,84ns	0,99a	0,67a
PA	0,69b	0,90a	0,56b	0,92a	1,00	0,90	0,73a	0,70ab	0,65b	0,68a	0,94a	0,08b	0,55	0,72b	0,40ab
CA	0,91a	0,92a	0,32c	0,57c	0,99	0,93	0,95a	0,48ab	0,67b	0,10b	0,68b	0,61ab	0,55	0,35c	0,23b
SPD	0,92a	1,00a	1,00a	0,69b	1,00	0,82	0,95a	0,45b	0,74b	0,52a	0,98a	1,00a	0,70	0,39c	0,26b
SCM	0,84ab	1,00a	1,00a	0,74b	0,99										
	0,10 – 0,20 m					0,10 – 0,20 m					0,10 – 0,20 m				
VN	0,90a	0,23b	0,67b	0,98a	0,99a	0,98ns	0,10b	0,72a	0,83a	0,29ns	0,77ns	0,30b	0,81a	0,85a	0,33a
PA	0,64c	0,31b	0,35c	0,89a	1,00a	0,89	0,54ab	0,67ab	0,51b	0,19	0,97	0,13b	0,47b	0,62b	0,32a
CA	0,92a	0,82a	0,25c	0,68b	0,97ab	0,92	0,79a	0,19c	0,59b	0,15	0,89	0,51ab	0,40b	0,27c	0,08b
SPD	0,71bc	0,99a	0,99a	0,60b	0,95b	0,92	0,99a	0,39bc	0,43b	0,39	0,98	0,90a	0,46b	0,30c	0,12b
SCM	0,81ab	1,00a	1,00a	0,65b	0,99a										
	0,20 – 0,30 m					0,20 – 0,30 m					0,20 – 0,30 m				
VN	0,96a	0,09c	0,53b	0,93a	0,98a	0,85ns	0,01b	0,84a	0,95a	0,76a	0,80bc	0,18b	0,71ns	0,83a	0,23ab
PA	0,64c	0,10c	0,30bc	0,95a	0,98a	0,76	0,40a	0,68ab	0,49b	0,13b	0,76c	0,05b	0,45	0,51b	0,25a
CA	0,80abc	0,45bc	0,18c	0,54d	0,98a	0,90	0,47a	0,08c	0,43b	0,11b	0,95ab	0,27b	0,40	0,27b	0,09c
SPD	0,74bc	0,75b	0,97a	0,78b	0,89b	0,80	0,21a	0,30bc	0,45b	0,27b	0,98a	0,92a	0,54	0,31b	0,10bc
SCM	0,87ab	0,97a	1,00a	0,65c	0,97a										

*Médias seguidas por mesma letra para cada indicador e profundidade do solo não diferiram estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

O cultivo da cana-de-açúcar pode estar comprometendo o acúmulo de C nos solos arenosos, muito provavelmente devido ao revolvimento, o qual acelera os processos de perda de C no sistema, como pode ser visto pelo baixo conteúdo de COS na camada superficial (0,0 – 0,10 m) ($2,4 \text{ g kg}^{-1}$) (Tabela 2), verificando-se um decréscimo superior a 50% em relação aos demais usos, correspondendo a um score de 0,10, valor considerado muito baixo para que o solo atinja a mínima qualidade possível, principalmente devido ao preparo intensivo do solo, com arações profundas a cada quatro ou cinco anos. Os efeitos do uso da terra com cana-de-açúcar na redução da qualidade do solo podem ser vistos pela redução dos scores de densidade do solo em Santo Inácio, bem como a redução dos scores de carbono, chegando a 50%, quando comparados aos usos da terra com pastagem e vegetação nativa (Tabela 3).

O índice de qualidade do solo e a contribuição dos componentes físicos, químicos e biológicos para todas as camadas (Figura 2), indicam maior contribuição do componente químico para a qualidade do solo nos usos SPD e SPM em Londrina, sendo superior a contribuição do componente químico nos demais usos (vegetação nativa, pastagem e cana-de-açúcar). A importância da fertilização em sistemas agrícolas, para aumentar o índice de qualidade do solo, foi reportado por Cherubin et al. (2016b), visto que o aporte de nutrientes (fósforo e potássio), além do manejo em SPD, tem contribuído enormemente para os elevados índices de qualidade do solo no uso da terra cultivado com soja em todos os locais deste estudo.

O índice de qualidade do solo para a camada de 0,0 - 0,30 m indicou maior qualidade na vegetação nativa (0,88), pastagem (0,83), soja em SPD (0,87) e SPM (0,87) e índice menor na cana-de-açúcar (0,74) no solo argiloso de Londrina (Figura 3). Estes resultados reportam que após 23 anos de cultivo agrícola com a leguminosa, o solo está funcionando próximo a sua capacidade máxima, ou ao menos, atingiu qualidade semelhante a vegetação nativa. Por outro lado, o uso da terra com cana-de-açúcar num período de 40 anos reduziu a qualidade do solo. O menor índice de qualidade do solo para a cana-de-açúcar foi observado também em São Jorge do Ivaí (0,34). Em Santo Inácio, o índice de qualidade na cana-de-açúcar, apesar de inferior aos demais usos do solo, não apresentou diferença significativa (Figura 3), mesmo assim, é observado uma condição de solo menos estável e suscetível aos processos de degradação quando a cana-de-açúcar é cultivada em solos arenosos.

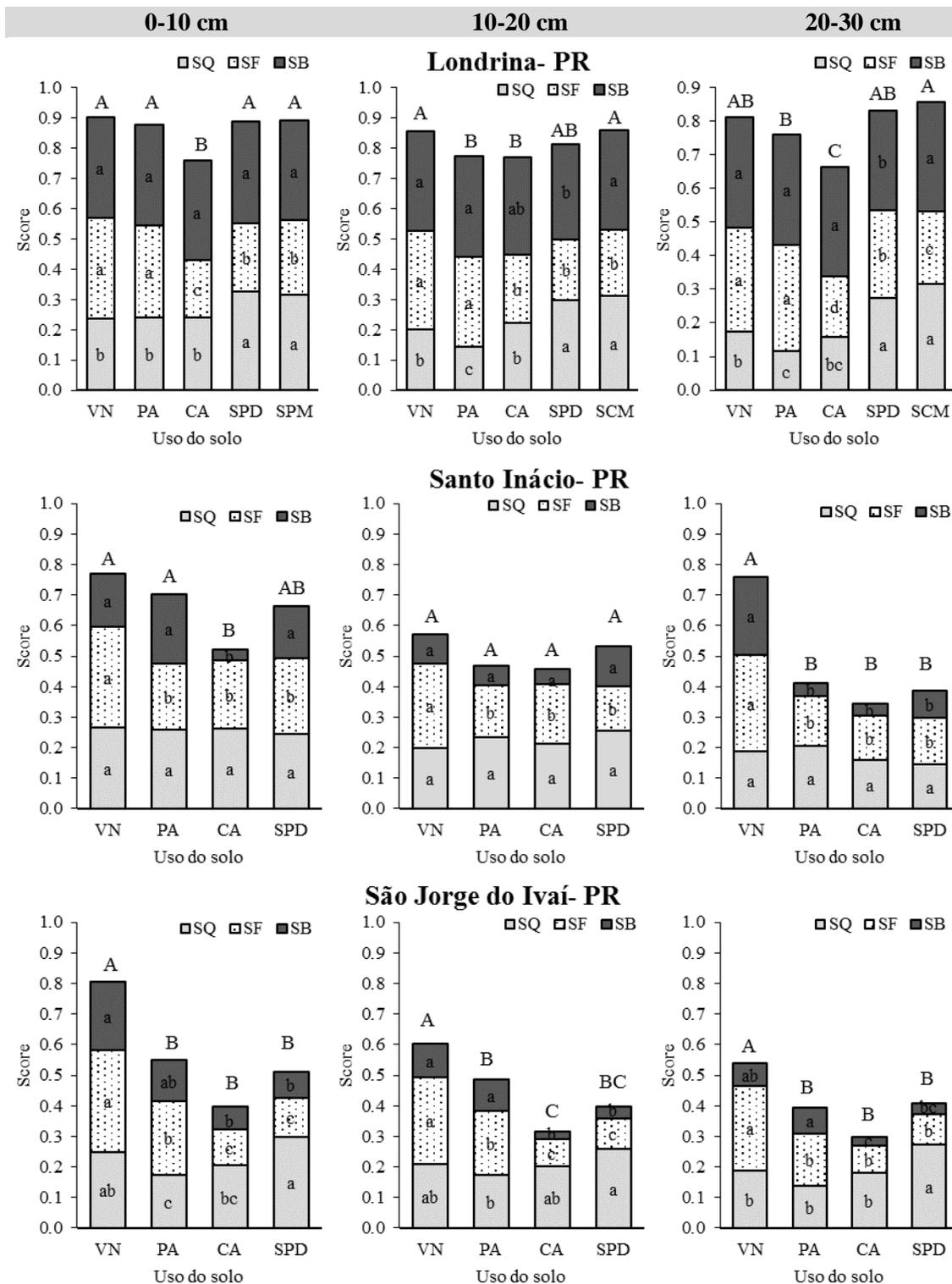
A maior contribuição para redução do score de qualidade do solo no uso da terra com cana-de-açúcar em Londrina é devido ao componente físico (Figura 3), visto que está limitando o IQS a 0,6. O intenso tráfego de máquinas no preparo do solo para o plantio e na colheita da cultura aumentam a densidade, elevando o nível de compactação do solo. Além do

componente físico, para as condições arenosas, o componente biológico também contribui para o menor IQS na cana-de-açúcar. Estes resultados estão atrelados ao menor acúmulo de C no solo cultivado com cana-de-açúcar (FRANCO et al, 2015), devido ao balanço negativo entre entradas e saídas de C nesse sistema. A aplicação de fertilizantes, juntamente com a deposição de resíduos na superfície sem o revolvimento do solo eleva os níveis de carbono orgânico do solo (BARRETO et al., 2009) e aumenta a sua qualidade geral do solo (REICHERT et al., 2016), porém, o intenso preparo do solo, com revolvimentos, realizado antes do plantio da cana-de-açúcar, tem contribuído para as reduções de C nos solos arenosos. Estes resultados reforçam a hipótese que o componente biológico é, potencialmente, o indicador mais sensível para discriminar diferenças na qualidade do solo entre os usos da terra em solos arenosos.

Práticas de fertilização com base na recomendação técnica para os diferentes usos da terra aumentam a produção de massa seca das plantas e, conseqüentemente, melhoram ou mantêm os teores de carbono no solo. Em São Jorge do Ivaí, a melhoria do componente químico do solo compensou os impactos negativos dos indicadores biológicos da qualidade do solo, principalmente para o uso da terra com soja. A compensação de um componente pelo outro para manter a qualidade do solo foi reportada por Cherubin et al. (2016b).

Práticas de manejo como a ILP, tem sido incentivada nas diversas regiões brasileiras (BRASIL, 2012), e consideradas promissoras na melhoria da qualidade do solo (SALTON et al., 2014). Porém poucos estudos foram desenvolvidos em solos arenosos. Assim, os resultados deste trabalho demonstram que a ILP, associada ao SPD, possui potencial para melhorar a qualidade do solo, possuindo um IQS 10% maior que o solo cultivado com cana-de-açúcar (Figura 3). A melhoria do componente biológico neste sistema, onde não diferiu da vegetação nativa (Figura 3) tem contribuído para a elevação do IQS. Além disso, aspectos relacionados ao componente físico podem estar limitando a qualidade do solo, como por exemplo, a taxa de lotação animal acima do recomendado, o que eleva o estado de compactação do solo.

Figura 2 - Índice de qualidade do solo e a contribuição ponderadas dos componentes químicos (SQ), físicos (SF) e biológicos (SB) do solo para as camadas de 0,0-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m sob diferentes usos da terra (VN – vegetação nativa; PA – pastagem; CA – cana-de-açúcar; SPD – soja sob sistema plantio direto; e SCM – soja em sistema de cultivo mínimo) em Londrina, Santo Inácio e São Jorge do Ivaí, Paraná – Brasil.

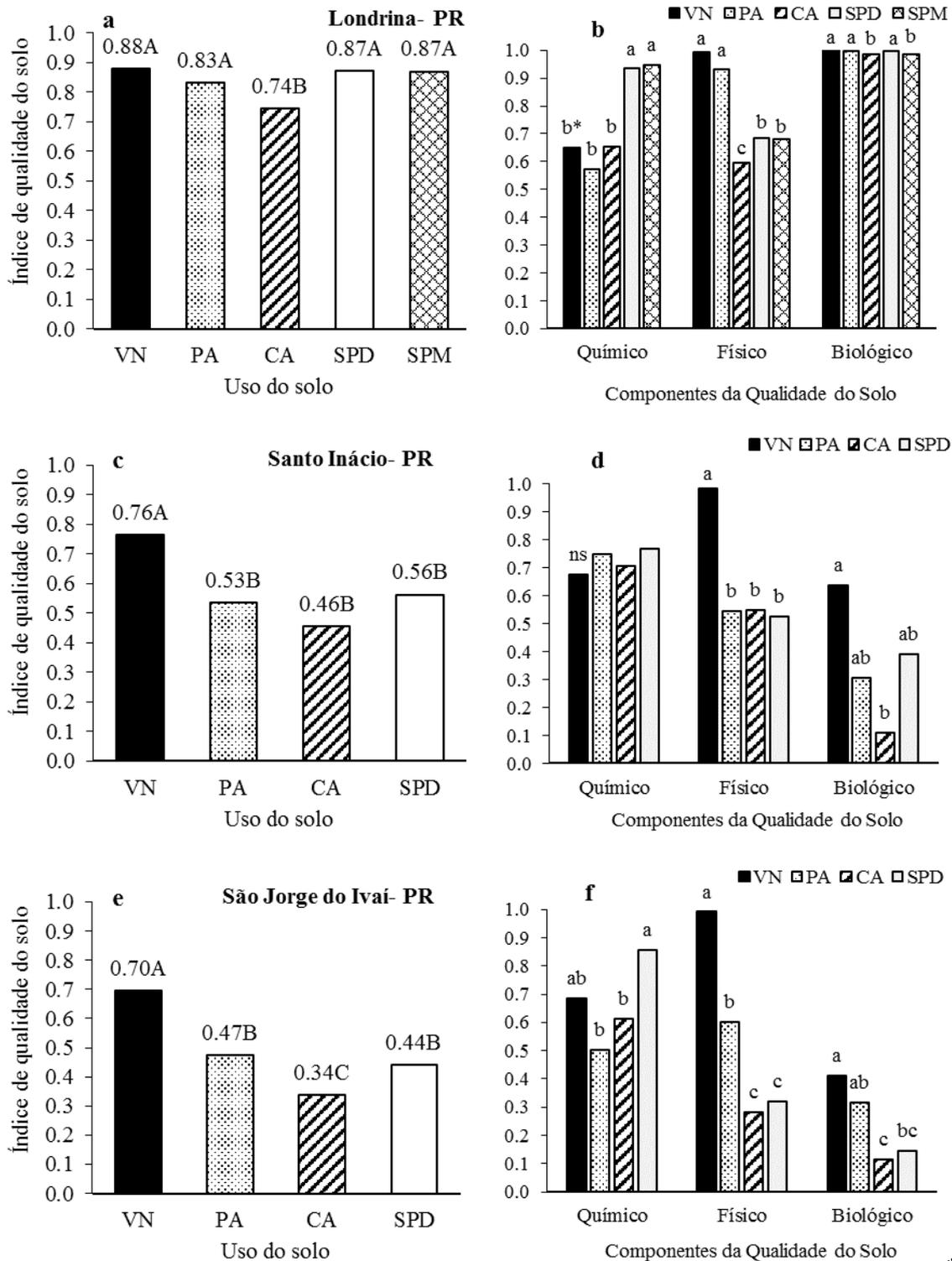


*Médias seguidas por mesma letra (maiúscula para índice de qualidade do solo e minúscula para os componentes do solo) não diferiram estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Apesar do manejo, com revolvimento anual do solo no cultivo da soja em Londrina (SPM), o IQS permaneceu elevado, onde o solo está funcionando a 87% da sua capacidade potencial (Figura 3), não diferindo da soja cultivada em SPD, da vegetação nativa e da pastagem. A explicação para este resultado controverso pode ser dada pelas seguintes razões. As características do solo argiloso, através da relação orgâno-mineral entre argila e matéria orgânica (NGUYEN et al., 2004), não reduz o score de qualidade do solo para o componente biológico em comparação aos demais usos da terra, onde os valores de COS permanecem próximos a 20 g kg^{-1} (Tabela 2), e os escores acima de 0,9 (Figura 1), além de não diferir significativamente na camada de 0,0 – 0,10 m (Tabela 3), cuja, apresenta as maiores diferenças de COS entre os usos da terra. A segunda razão pela qual, se explica estes valores é pelo componente químico, que devido ao elevado aporte de nutrientes fosfatados e potássicos, o uso da terra com soja manteve o score de qualidade próximo a 1 (Figura 2). Além disso, e aliado a elevada densidade do solo observada na cana-de-açúcar (Figura 1), o componente químico também explica o motivo pelo qual o cultivo de soja com preparo convencional apresentou índice de qualidade do solo superior, funcionando a 87 % da capacidade potencial, frente a 74% da cana-de-açúcar em Londrina. Segundo Cherubin et al. (2016a), a acidez do solo e os baixos níveis de fósforo e potássio disponíveis para as plantas são condições limitantes para a produção de cana-de-açúcar em solos degradados na região centro sul do Brasil, sugerindo o manejo adequado da adubação para sustentar a produtividade da cultura.

O IQS geral de apresentado na Figura 4, levando em consideração os três locais de coleta dos dados reporta que a vegetação nativa está funcionando a 78% da sua capacidade potencial, valor significativamente superior aos demais usos da terra, ou seja, pastagem (61%), cana-de-açúcar (51%) e agricultura sob SPD (62%). Os resultados deste trabalho apontam que a expansão da cana-de-açúcar sobre áreas de pastagem que não possuem caráter de degradação pode comprometer a qualidade do solo. Entretanto, é importante salientar que esta diminuição da qualidade do solo no cultivo de cana-de-açúcar, não foi observada por Cherubin et al. (2016b), quando avaliou a expansão da cultura sobre pastagens degradadas.

Figura 3 - Índice de qualidade do solo (a, c, e) e os scores dos componentes químicos, físicos e químicos do solo (b, d, f) para as camadas de 0,0-0,30 m sob diferentes usos da terra (VN – vegetação nativa; PA – pastagem; CA – cana-de-açúcar; e SPD – soja sob sistema plantio direto) em Londrina, Santo Inácio e São Jorge do Ivaí, Paraná – Brasil.

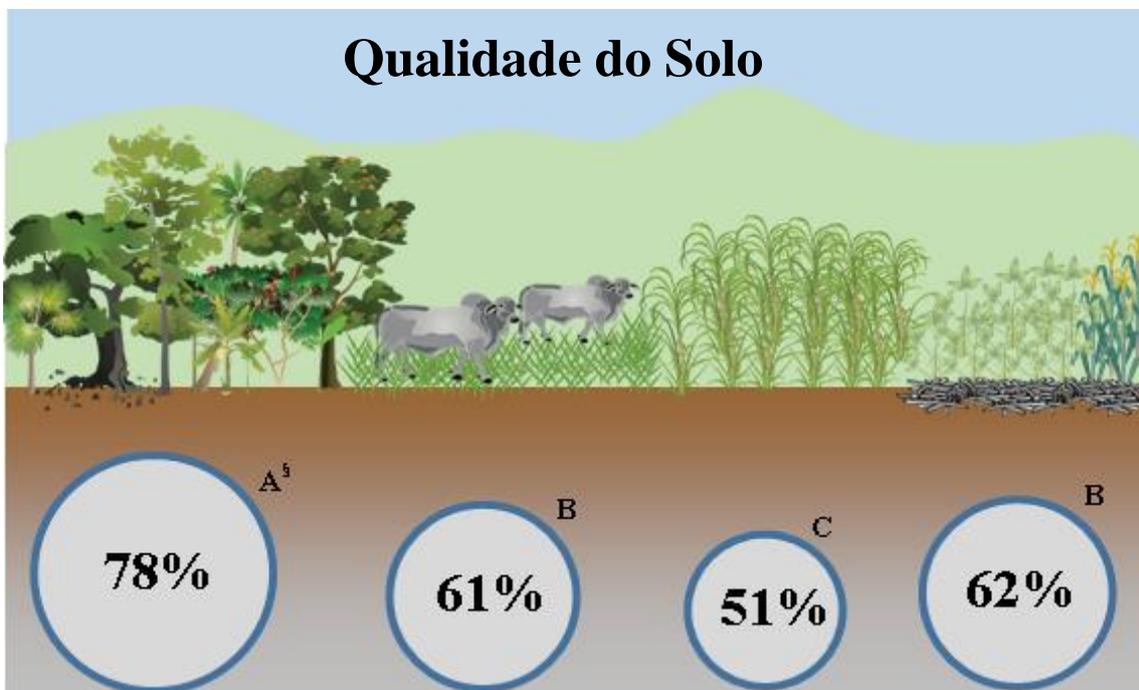


*Média

s seguida por mesma letra (maiúscula para índice de qualidade do solo e minúscula para os componentes do solo) não diferiram estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$).

Os resultados encontrados neste trabalho reforçam que a intensificação das pastagens, através do manejo da calagem e adubação, controle da taxa de lotação, utilização de gramínea com elevada produção forrageira e controle de plantas daninhas (STRASSBURG et al., 2014) eleva a qualidade do solo, quando comparado ao cultivo de cana-de-açúcar. Além disso, o uso da terra sob SPD, associado a ILP em solos arenosos das regiões subtropicais brasileiras, contribuem para a melhoria da qualidade do solo, onde ele possa funcionar acima de 60% da sua capacidade potencial (Figura 4). Outra constatação importante a ser feita, diz respeito aos usos da terra com pastagem, cana-de-açúcar e agricultura sob SPD, onde a compactação do solo, através do aumento da densidade, tem contribuído para o decréscimo da qualidade do solo. Portanto, mitigar seus efeitos é fundamental como estratégia de gestão para recuperação da qualidade do solo em áreas agrícolas (CHERUBIN et al., 2017). Além de mitigar os efeitos da compactação, o aumento do aporte de resíduos vegetais através de biomassa, é fundamental para elevar o score do componente biológico e a qualidade dos solos arenosos em geral (DONAGEMMA et al., 2016; REICHERT et al., 2016).

Figura 4 - Alterações na qualidade do solo (0,0-0,30 m) devido ao uso do solo (vegetação nativa, pastagem, cana-de-açúcar e agricultura sob plantio direto) no estado do Paraná, Brasil.



§Médias seguidas por mesma letra não diferiram estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ($p < 0,05$), considerando cada local como um bloco.

O uso da terra através de práticas conservacionistas de manejo do solo, como o SPD contribui para a elevação da qualidade do solo, melhorado os processos vitais do ecossistema (SÁ et al., 2016). Na área de abrangência deste estudo, o solo sob SPD foi capaz de funcionar a 87% de sua capacidade potencial (Figura 3), num sistema consolidado com mais de 20 anos em Londrina. Segundo Karlen et al. (2013), o desenvolvimento de sistemas de cultivo menos agressivos ao solo, como o plantio direto, pode melhorar significativamente a qualidade do solo, sendo capaz de funcionar entre 75 a 85% da sua capacidade potencial em condições de clima temperado. Além disso, apesar do menor IQS da agricultura sob SPD em solo arenoso (56%) e franco-arenoso (44%) que o SPD em solo argiloso, esses valores foram superiores ao manejo com revolvimento do solo no cultivo da cana-de-açúcar para as condições dos solos arenosos das regiões subtropicais brasileiras.

4.6. CONCLUSÕES

A SMAF foi capaz de quantificar alterações na qualidade do solo em função de diferentes usos da terra. A capacidade potencial de uso foi 78, 62, 61 e 51 % para vegetação nativa, agricultura sob sistema plantio direto, pastagem e cana-de-açúcar respectivamente.

O baixo índice de qualidade do solo indicou que o cultivo da cana-de-açúcar está causando degradação do solo, principalmente em áreas arenosas do Sul do Brasil. Sistemas conservacionistas, como a agricultura sob sistema plantio direto, o manejo das pastagens e o sistema de integração lavoura-pecuária demonstraram potencial para melhorar a qualidade do solo.

4.7. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALMEIDA, L. S. et al. Indicadores da qualidade do solo em cultivos irrigados de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, n.9, p.1539-1547, 2016.

ANDREWS, S. S.; KARLEN, D. L.; MITCHELLB, J. P. A comparison of soil quality indexing methods for vegetable production systems in Northern California. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 90, p. 25–45, 2002.

ANDREWS, S. S.; KARLEN, D. L.; CAMBARDELLA, C. A. The soil management assessment framework: A quantitative soil quality evaluation method. **Soil Science Society America Journal**, v. 68, p. 1945-62, 2004.

ASKARI, M. S.; HOLDEN, M. N. Quantitative soil quality indexing of temperate arable management systems. **Soil & Tillage Research**, v. 150, p. 57-67, 2015.

BARRETO, R. C. et al. The impact of soil management on aggregation, carbon stabilization and carbon loss as CO₂ in the surface layer of a Rhodic Ferralsol in Southern Brazil. **Agriculture, ecosystems & environment**, v. 132, n. 3, p. 243-251, 2009.

BARRETTO, A. G. O. P. Agricultural intensification in Brazil and its effects on land-use patterns: an analysis of the 1975–2006 period **Global Change Biology**, v. 19, p. 1804–1815, 2013.

BRASIL. **Plano setorial de mitigação e de adaptação às mudanças climáticas para a consolidação de uma economia de baixa emissão de carbono na agricultura** © Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2012.

CHERUBIN, M.R., et al. A Soil Management Assessment Framework (SMAF) evaluation of Brazilian sugarcane expansion on soil quality. **Soil Science Society America Journal**, v. 80, p. 215–226, 2016a.

CHERUBIN, M. R., et al. Soil Quality Indexing Strategies for Evaluating Sugarcane Expansion in Brazil. **Plos One**, v. 11(3), 2016b.

CHERUBIN, M. R.; TORMENA, C. A.; KARLEN, D. L. Soil Quality Evaluation Using the Soil Management Assessment Framework (SMAF) in Brazilian Oxisols with Contrasting Texture. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 41, 2017.

COMISSÃO DE QUÍMICA E FERTILIDADE DO SOLO - RS/SC. **Manual de adubação e calagem para os Estados do Rio Grande do Sul e Santa Catarina**, SBCS-NRS, 2016. 376 p.

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

DIAS-FILHO, M. B. Diagnóstico das pastagens no Brasil. **Embrapa Amazônia Oriental**, 2014.

DONAGEMMA, G. K. et al. Caracterização, potencial agrícola e perspectivas de manejo de solos leves no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 51, n. 9, p. 1003-1020, 2016.

FRANCO, A. L. C. et al. Soil carbon, nitrogen and phosphorus changes under sugarcane expansion in Brazil. **Science of the Total Environment**, v. 515–516, p. 30–38, 2015.

GOLDEMBERG, J. et al. Meeting the global demand for biofuels in 2021 through sustainable land use change policy. **Energy Policy**, v. 69, p. 14–18, 2014.

KALU, S. et al. Soil Quality Assessment for Different Land Use in the Panchase Area of Western Nepal. **International Journal of Environmental Protection**, v. 5, p. 38-43, 2015.

KARLEN, D. L. et al. Soil quality response to long-term tillage and crop rotation practices. **Soil & Tillage Research**, v. 133, p. 54-64, 2013.

KARLEN D. L. Soil quality: A concept, definition, and framework for evaluation. **Soil Science Society America Journal**, v. 61, p. 4-10, 1997.

KARLEN, D. L. et al. Soil Quality Assessment: Past, Present and Future. **Electronic Journal of Integrative Biosciences**, v. 6, p. 3-14, 2008.

KARLEN, D. L.; RICE, C. W. Soil Degradation: Will Humankind Ever Learn? **Sustainability**, v. 7, p. 12490-12501, 2015.

LAPOLA, D. M. et al. Pervasive transition of the Brazilian land-use system. **Nature Climate Change**, v. 4, n. 1, p. 27-35, 2014.

LIMA, A. C. R. et al. A functional evaluation of three indicators sets for assessing soil quality. **Applied Soil Ecology**, v. 64, p. 194-200, 2013.

MORAES, A. et al. Integrated crop–livestock systems in the Brazilian subtropics. **European Journal of Agronomy**, v. 57, p. 4-9, 2014.

MUKHERJEE, A.; LAL, R. Comparison of Soil Quality Index Using Three Methods. **Plos One**, v. 9, p. e105981, 2014.

NGUYEN, V. B.; OLK, D. C.; CASSMAN, K. G. Nitrogen mineralization from humic acid fractions in rice soils depends on degree of humification. **Soil Science Society of America Journal**, v. 68, n. 4, p. 1278-1284, 2004.

OTTO, R. et al. Manejo da adubação potássica na cultura da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 34, n. 4, p. 1137-1145, 2010.

PORTUGAL, A. F.; COSTA, O. D. V.; COSTA, L. M. Propriedades físicas e químicas do solo em áreas com sistemas produtivos e mata na região da Zona da Mata mineira. **Revista Brasileira de Ciência do Solo, Viçosa**, v. 34, n. 2, p. 575-585, 2010.

PRADO, R. B. et al. Current overview and potential applications of the soil ecosystem services approach in Brazil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v.51, n.9, p.1021-1038, 2016.

REICHERT, J. M. et al. Land use effects on subtropical, sandy soil under sandzation/desertification processes. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 233, p. 370-380, 2016.

SÁ, J. C. M. et al. Low-carbon agriculture in South America to mitigate global climate change and advance food security. **Environment International**, v. 98, p. 102–112, 2017.

SALTON, J. C. et al. Integrated crop-livestock system in tropical Brazil: Toward a sustainable production system. **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 190, p. 70-79, 2014.

STRASSBURG, B. B. N. et al. When enough should be enough: Improving the use of current agricultural lands could meet production demands and spare natural habitats in Brazil. **Global Environmental Change**, v. 28, p. 84-97, 2014.

SWANEPOEL, P. A. et al. Assessment of tillage effects on soil quality of pastures in South Africa with indexing methods. **Soil Research**, v. 53, p. 274–285, 2015.

TEDESCO, M. J. et al. **Análises de solo, plantas e outros materiais**. 2.ed. Porto Alegre, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995. 174p. (Boletim Técnico, 5)

VEZZANI, F. M.; MIELNICZUCK, J. Uma visão sobre qualidade do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 33, p. 743-755, 2009.

WIENHOLD B.J. et al. Protocol for Soil Management Assessment Framework (SMAF) soil indicator scoring curve development. **Renewable Agriculture Food Systems**, v. 24, p. 260-266, 2009.

5. CONSIDERAÇÕES FINAIS

Com encerramento deste trabalho e com base na discussão apresentada nos três artigos faz-se as seguintes considerações finais:

O uso da terra com pastagem através de práticas de correção e fertilização periódica a fim de manter um nível adequado de produção vegetal, controle da taxa de lotação, controle de pragas e plantas daninhas, utilização de gramínea com alta produção forrageira, além do manejo sem revolvimento do solo, mostrou potencial para acumular carbono e elevar a qualidade do solo, principalmente em áreas arenosas da região Sul do Brasil.

A busca pela qualidade do solo passa pelo uso conservacionista da terra. Assim, a agricultura sob o sistema plantio direto tem sido capaz de aumentar a concentração de carbono no solo e favorecer a ciclagem de nutrientes. Além disso, quando integrado em consorcio ou sucessão ao sistema de integração lavoura pecuária tem elevado a qualidade do solo em áreas arenosas, sendo um sistema indicado para as áreas marginais da região Sul.

Outros estudos devem ser encorajados a avaliar a sustentabilidade do uso da terra com cana-de-açúcar em solos arenosos, visto que este trabalho apontou a redução da qualidade do solo para esta condição de solo. Porém, como havia apenas um local de coleta e análise de dados, este trabalho ainda não é conclusivo, devido as condições intrínsecas de clima e manejo que ocorre em Santo Inácio- PR. Por outro lado, para os solos argilosos o que limita a sustentabilidade do uso da terra com cana-de-açúcar são as práticas de revolvimento do solo associada a intensiva mecanização (trafego de máquinas), especialmente na colheita. Devido a isto, pesquisas que apresentem alternativas para o manejo de implantação e renovação dos canaviais são recomendadas.

O revolvimento do solo, mesmo não reduzindo o índice de qualidade deste, como visto para a situação de Londrina no Artigo 3, através do uso da terra com soja em sistema de cultivo mínimo, continua a não ser uma prática recomendada para solos tropicais. Este valor elevado foi discutido e justificado no referido artigo. Além disso, no Artigo 1 visualizou-se que a dinâmica do carbono orgânico é prejudicada nos usos da terra com revolvimento do solo, reduzindo o acúmulo de carbono em comparação aos demais usos.

Por fim, a avaliação da qualidade do solo utilizando os procedimentos e algoritmos da SMAF é recomendada para caracterizar o uso da terra no Brasil, em razão que até então poucos estudos haviam aplicado esta ferramenta. Neste trabalho foi possível concluir através da capacidade potencial de uso do solo gerado pela SMAF, que o uso da terra sob sistema plantio direto possui total condições para manter e/ou elevar a qualidade dos solos tropicais, bem como, mitigar as mudanças climáticas.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMI, M. et al. Remote Sensing Time Series to Evaluate Direct Land Use Change of Recent Expanded Sugarcane Crop in Brazil. **Sustainability**, v. 4, p. 574-585, 2012.

BARRETTO, A. G. O. P. et al. Agricultural intensification in Brazil and its effects on land-use patterns: an analysis of the 1975–2006 period **Global Change Biology**, v. 19, p. 1804–1815, 2013.

CERRI, C. C. et al. Brazilian greenhouse gas emissions: The importance of agriculture and livestock. **Scientia Agricola**. v.66, n.6, p.831-843, 2009.

DIAS-FILHO, M. B. Diagnóstico das pastagens no Brasil. **Embrapa Amazônia Oriental**, 2014.

DONAGEMMA, G. K. et al. Caracterização, potencial agrícola e perspectivas de manejo de solos leves no Brasil. **Pesquisa Agropecuária Brasileira.**, v.51, n.9, p.1003-1020, set. 2016.

FRANCO, A. L. C. et al. Soil carbon, nitrogen and phosphorus changes under sugarcane expansion in Brazil. **Science of the Total Environment**, v. 515–516, p. 30–38, 2015.

GOLDEMBERG, J. et al. Meeting the global demand for biofuels in 2021 through sustainable land use change policy. **Energy Policy**, v. 69, p. 14–18, 2014.

HARRIS, Z. M.; SPAKE, R.; TAYLOR, G. Land use change to bioenergy: A meta-analysis of soil carbon and GHG emissions. **Biomass and Bioenergy**, v. 82, p. 27-39, 2015.

KARLEN, D. L; RICE, C. W. Soil Degradation: Will Humankind Ever Learn? **Sustainability**, v. 7, p. 12490-12501, 2015.

LAL, R. Restoring Soil Quality to Mitigate Soil Degradation. **Sustainability**, v. 7, p. 5875-5895, 2015.

LAPOLA, D. M. et al. Pervasive transition of the Brazilian land-use system. **Nature Climate Change**, v. 4, n. 1, p. 27-35, 2014.

POWLSON, D. S. et al. Does Conservation agriculture deliver climate change mitigation through soil carbon sequestration in tropical agro-ecosystems? **Agriculture, Ecosystems and Environment**, v. 220, p. 164–174, 2016.

REICHERT, J. M. et al. Land use effects on subtropical, sandy soil under sandyization/desertification processes. **Agriculture, Ecosystems & Environment**, v. 233, p. 370-380, 2016.

SÁ, J. C. M. et al. Low-carbon agriculture in South America to mitigate global climate change and advance food security. **Environment International**, v. 98, p. 102–112, 2017.

WINGEYER, A. B. et al. Soil Quality Impacts of Current South American Agricultural Practices. **Sustainability**, v. 7, p. 2213-2242, 2015.