



**UNICAMP**

MICHENDER WERISON MOTTA PEREIRA

**MODELAGEM DA VARIAÇÃO CONTÍNUA DO CARBONO ORGÂNICO EM  
PROFUNDIDADE NO SOLO**

**CAMPINAS  
2014**







**UNICAMP**

**UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS**  
**Faculdade de Engenharia Agrícola**

MICHENDER WERISON MOTTA PEREIRA

**MODELAGEM DA VARIAÇÃO CONTÍNUA DO CARBONO ORGÂNICO EM  
PROFUNDIDADE NO SOLO**

Dissertação apresentada à Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas como parte dos requisitos exigidos para obtenção do título de Mestre em Engenharia Agrícola, na área de Água e Solo.

Orientadora: Profa. Dra. Mara de Andrade Marinho

ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA DISSERTAÇÃO DEFENDIDA PELO ALUNO MICHENDER WERISON MOTTA PEREIRA, ORIENTADO PELA PROFA. DRA. MARA DE ANDRADE MARINHO.

Assinatura da orientadora:

**CAMPINAS**  
**2014**

Ficha catalográfica  
Universidade Estadual de Campinas  
Biblioteca da Área de Engenharia e Arquitetura  
Luciana Pietrosanto Milla - CRB 8/8129

P414m Pereira, Michender Werison Motta, 1990-  
Modelagem da variação contínua do carbono orgânico em profundidade no solo / Michender Werison Motta Pereira. – Campinas, SP : [s.n.], 2014.

Orientador: Mara de Andrade Marinho.  
Dissertação (mestrado) – Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Mapeamento do solo. 2. Cana-de-açúcar. 3. Mapeamento digital. 4. Carbono. 5. Pedologia. I. Marinho, Mara de Andrade, 1957-. II. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. III. Título.

Informações para Biblioteca Digital

**Título em outro idioma:** Modeling continuous depth functions of soil organic carbon

**Palavras-chave em inglês:**

Mapping soil  
Sugarcane  
Digital mapping  
Carbon  
Pedology

**Área de concentração:** Água e Solo

**Titulação:** Mestre em Engenharia Agrícola

**Banca examinadora:**


Mara de Andrade Marinho [Orientador]  
Anamaria Gomide  
Fernando César Bertolani


**Data de defesa:** 17-02-2014

**Programa de Pós-Graduação:** Engenharia Agrícola


Este exemplar corresponde à redação final da **Dissertação de Mestrado** defendida por **Michender Werison Motta Pereira**, aprovada pela Comissão Julgadora em 17 de fevereiro de 2014, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.

**FEAGRI**

  
\_\_\_\_\_  
**Profa. Dra. Mara de Andrade Marinho – Presidente e Orientador**  
**Feagri/Unicamp**



\_\_\_\_\_  
**Dr. Fernando César Bertolani**  
**CTC**



\_\_\_\_\_  
**Profa. Dra. Anamaria Gomide – Membro Titular**  
**IC/Unicamp**

**Faculdade de Engenharia Agrícola**  
**Unicamp**



## RESUMO

A aquisição de informação quantitativa acerca da variação espacial e temporal de atributos do solo é fundamental para fins de mapeamento digital e modelagem ambiental. Os relatórios técnicos dos levantamentos pedológicos contêm inúmeros dados, mas referidos a profundidades não coincidentes, uma vez que a diferenciação dos perfis em horizontes segue critérios genético-morfológicos, diferindo entre perfis. Assim, um modelo que permita ajustar uma função descrevendo a variação contínua de atributos edáficos a partir de um pequeno número de dados, caso dos perfis pedológicos, é de grande interesse em mapeamento digital, por permitir estimar valores em qualquer profundidade. Por outro lado, é conhecido que o manejo agrícola é um importante fator de variação da qualidade do solo, esperando-se que um sistema que promova a manutenção dos restos culturais sobre o solo tenha efeito positivo na qualidade, em especial na conservação do carbono orgânico do solo (COS). O objetivo central do trabalho foi desenvolver e testar uma aplicação da função *Spline quadrática de igual área* na modelagem do COS a partir de um pequeno número de observações. Um objetivo específico foi avaliar o efeito do tempo de adoção da colheita mecanizada da cana sem queima (cana crua) nos teores de COS. Foram avaliados perfis de LATOSSOLO VERMELHO textura argilosa em duas áreas com cana-de-açúcar, após 5 e 10 anos de adoção da colheita da cana crua. Em cada área foi aberta uma trincheira, sendo descritos e amostrados lado a lado até 1 m de profundidade dois perfis denominados perfil experimental ( $P_e$ , referência), amostrado a cada 2 cm ( $n=50$ ), e perfil pedológico ( $P_p$ ), amostrado por horizonte ( $n=5$ ). Foi utilizado o programa MATLAB para implementar a função. Determinados os teores de COS foi aplicada a *função spline quadrática de igual área* aos dados e ajustadas as curvas de variação contínua do COS em profundidade. A validação das estimativas deu-se por comparação entre a curva ajustada aos dados do perfil pedológico ( $n=5$ ) e a curva do perfil experimental ( $n=50$ ; referência) e entre valores medidos em amostras independentes e valores estimados, por meio de análises de regressão e correlação linear e cálculo do erro padrão. A função *Spline quadrática de igual área* permitiu não somente descrever com precisão e acurácia a curva de variação do COS em profundidade a partir de um pequeno número de dados, como também estimar o teor de COS em diferentes profundidades, abrindo uma imensa possibilidade de utilização dos dados de levantamento de solos em mapeamento digital e modelagem ambiental. Não foi possível neste caso comprovar efeito positivo do tempo de adoção da colheita da cana crua na conservação do COS. Outros dois

fatores limitantes associados ao manejo da área 2, aplicação de vinhaça diluída e estrutura do solo muito degradada, podem ter mascarado o efeito do maior tempo de adoção da colheita mecanizada (10 anos). Trabalhos futuros com modelagem do COS e de outros atributos em condições diversas de solos, usos e manejos permitirá consolidar a recomendação da *função spline quadrática de igual área* como ferramenta no mapeamento digital do solo.

Palavras-Chave: Mapeamento de solo, cana-de-açúcar, mapeamento digital, carbono, pedologia.

## ABSTRACT

The acquisition of quantitative information about spatial and temporal variations of soil attributes is fundamental to digital soil mapping and environmental modeling. Soil survey reports contain numerous data referred to distinct depths according the differentiation of the soil profiles in horizons. Once this differentiation follows morphogenetic criteria, these depths differ among distinct profiles. Though, a model that allows adjusting a function to describe the continuous variation of soil attributes from a small number of data, like in soil profiles, is of great interest in digital soil mapping, because it make possible to estimate values at any depth. On the other hand, it is well known that agricultural management is an important factor of soil quality variation, being expected that a system promoting the permanence of crop residues above the soil has a positive effect on soil organic carbon (SOC) conservation. The central goal of this work was to develop and test an application of the *spline of equal area* function to model the in-depth variation of the SOC from a small number of data. A specific purpose was to evaluate the effect of the time of adoption of mechanized harvest of sugarcane without burning (raw cane) on the contents of SOC. Profiles of a clayed Rhodic Hapludox in two areas with sugarcane, after 5 and 10 years of mechanized harvest of raw cane were evaluated. In each area, it was dig a trench being described side by side until 1 meter depth two profiles named experimental profile ( $P_e$ , Reference), sampled each 2 cm ( $n=50$ ), and pedological profile ( $P_p$ ), sampled according morphogenetic horizons ( $n=5$ ). For algorithm implementation the Mat Lab software was used. After determining the SOC contents, the spline of equal area function was applied and adjusted the continuous variation in-depth curves of SOC. Validation procedures have included comparisons between adjusted curves from  $P_p$  ( $n=5$ ) and from  $P_e$  ( $n=50$ , Reference) and also comparisons between estimated values and measured values from independent samples employing regression and correlation analyzes and calculating the standard error. The spline of equal area function allowed not only to describe with precision and accuracy the continuous in-depth SOC variation employing a limited number of values, but also to estimate the SOC contents in different depths, opening great possibilities of using legacy data from soil survey reports in digital soil mapping and environmental modeling. It was not possible to demonstrate the positive effect of the time of adoption of mechanized harvest of raw cane on SOC conservation. Other two limiting factors associated with the management of area 2, application of diluted vinasse and soil structure severely degraded, should have masked the effect of the greater

time of adoption of mechanized harvest of raw cane in this area (10 years). Future work with modeling of SOC and other soil attributes will allow consolidating and recommending the spline of equal area function as a tool for digital soil mapping.

Key-words: Mapping Soil, sugarcane, digital mapping, Carbon, pedology.



# SUMÁRIO

Página

<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1. Hipóteses .....	2
1.2. Objetivos geral.....	3
1.2.1. Objetivos específicos.....	3
<b>2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....</b>	<b>5</b>
2.1. Carbono orgânico do solo (COS) e matéria orgânica do solo (MOS).....	5
2.2. Métodos de determinação do C do Solo.....	6
2.3. Estoque de C orgânico do Solo (ECS) .....	10
2.3.1. Estoque de Carbono e sua relação com o clima e uso/manejo do solo .....	11
2.4. A cultura da cana-de-açúcar e a conservação do C no sistema .....	12
2.5. Modelagem do COS em profundidade no solo .....	14
2.5.1. Funções <i>Spline</i> .....	17
<b>3. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>21</b>
3.1. Área de estudo .....	21
3.2. Delineamento experimental e coleta das amostras .....	22
3.3. Caracterização física dos solos .....	24
3.4. Caracterização química dos solos.....	26
3.5. Determinação do carbono orgânico do solo (COS).....	27
3.5.1. Cálculo do estoque de carbono do solo .....	27
3.5.2. Análises estatísticas .....	28
3.6. Modelagem do C em profundidade no solo .....	28
3.6.1. Fundamentação teórica da função <i>spline quadrática de igual área</i> .....	29
<b>4. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>35</b>
4.1. Função <i>Spline quadrática de igual área</i> e a modelagem do COS em profundidade .....	35
4.1.1. Rotina para gerar os gráficos .....	35
4.1.2. Rotina para o cálculo do erro em função de pontos externos (medidos) e obtenção de pontos preditos.....	36
4.1.3. Rotina para calcular a diferença entre dois perfis modelados e extrair atributos de ambos na profundidade desejada .....	37
4.2. Estudo de caso na cultura da cana de açúcar .....	38
4.2.1. Caracterização do COS em profundidade nos perfis experimentais .....	38
4.2.2. Área 1 – Manejo com colheita mecanizada da cana crua há cinco anos .....	45
4.2.2.1. Modelagem da variação contínua do COS em profundidade na área 1 (manejo com colheita mecanizada da cana crua há 5 anos) a partir dos dados do perfil experimental (n=50) ..	50
4.2.2.2. Modelagem da variação contínua do COS em profundidade na área 1 (manejo com colheita mecanizada da cana crua há 5 anos) a partir dos dados do perfil pedológico (n=5).....	52

4.2.2.3. Estoque de COS.....	58
4.2.3. Área 2 – Manejo com colheita mecanizada da cana crua há dez anos .....	59
4.2.3.1. Modelagem da variação contínua do COS em profundidade no solo da área 2 (manejo com colheita mecanizada da cana crua há 10 anos) a partir dos dados do perfil experimental (n=50) .....	63
4.2.3.2. Modelagem da variação contínua do COS em profundidade na área 2 (manejo com colheita mecanizada da cana crua há 5 anos) a partir dos dados do perfil pedológico (n=5).....	65
4.2.3.3. Estoque de COS.....	69
4.2.4. Discussão agrupada dos resultados: Área 1 x Área 2.....	70
<b>5. CONCLUSÕES.....</b>	<b>81</b>
<b>REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>83</b>
<b>APÊNDICE ÚNICO. Algoritmo com a função <i>Spline quadrática de igual área</i> adaptado para a modelagem da variação contínua de atributos do solo. ....</b>	<b>95</b>
<b>ANEXO 1. Carta de solos da fazenda São Pedro (CTC). ....</b>	<b>101</b>
<b>ANEXO 2. Carta de solos da fazenda Aparecida (CTC). ....</b>	<b>103</b>

*Aos meus pais Otávio e Fátima,  
meus irmãos Michel, Michelly e Luik,  
e meus sobrinhos Deyvid e Davi  
DEDICO.*

*Dedico em especial ao meu eterno  
amigo Bruno Mattos (em memória).*

*Brunin, você esteve aqui meu caro,  
aqui em Campinas/SP,  
aqui por mais de um mês!  
Tão perto velho.  
Tão perto que ligou,  
tão perto que saímos, conversamos, rimos!  
E hoje... hoje.... Saudade Irmão!*



## AGRADECIMENTOS

*Existem pessoas que simplesmente passam pelas nossas vidas.*

*Existem também pessoas que passam e deixam saudades/lembranças.*

*E existem aquelas que ficam marcadas em nosso dia-dia. Que nunca passam. Que de alguma forma contribuem para o nosso crescimento. A estas pessoas presto meus sinceros agradecimentos por todo o apoio e amizade que me propiciaram concluir esta dissertação.*

Agradeço inicialmente a DEUS por ter me dado força e paciência nos momentos difíceis.

Aos meus pais, Otávio Celso Pereira e Maria de Fátima Motta Pereira por acreditarem em mim, por todo o apoio desde que saí de casa aos 14 anos de idade e principalmente por me ensinarem a enfrentar a vida de cabeça erguida, com dedicação e coragem mesmo diante das dificuldades. Agradeço pelo exemplo! Por voltarem a estudar depois de anos e me mostrar da melhor forma possível que não existe limite (muito menos idade) para buscar novos conhecimentos e sim metas que se renovam a cada conquista.

Aos meus irmãos Michel, Michelly e Luik pelo companheirismo e amizade de sempre.

Agradeço a minha orientadora Mara pela paciência e ensinamentos nestes dois anos. Obrigado pela oportunidade e principalmente por permitir que eu caminhasse com minhas próprias pernas, sendo apenas guiado e não carregado pela senhora.

Ao Eng. Agrícola Augusto e a prof<sup>a</sup>. Anamaria por nos ajudar a “destrinchar” o algoritmo da *Spline* e implementá-lo no MATLAB<sup>®</sup>.

À Usina Iracema por ceder as áreas e ao amigo Lucas da empresa CSolos por toda ajuda na seleção dos locais e coletas de campo. Ao Fernando Bertolani da CTC por ajudar na escolha das áreas, pela participação e grande contribuição nas bancas de qualificação e defesa dessa dissertação.

À FEAGRI/UNICAMP por toda a infraestrutura de laboratórios, sala de estudos e biblioteca fornecidos para a realização desta dissertação.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela bolsa de Mestrado e ao FAEPEX/UNICAMP pelo aporte financeiro que possibilitou a realização das análises.

À minha namorada e companheira Fabiana por estar ao meu lado e me apoiar em todos os momentos. Este título não faria sentido sem você, te amo!

Agradeço de coração aos amigos e professores do IFSULDEMINAS – Câmpus Inconfidentes, em especial o prof. Oswaldo Francisco Bueno, e as professoras Adriana Dalo Rodrigues e Lilian Vilela de Andrade Pinto, pelos ensinamentos, elogios, e por tudo que me ensinaram na vida. Obrigado por acreditarem que posso voar cada vez mais alto. Obrigado por me aconselharem a seguir nos estudos, por isso estou aqui. Agradeço também ao professor Claudino Ortigara pela sensatez e inúmeras palavras de motivação que me trouxeram até aqui.

Aos meus amigos Luiz, Rafael e Douglas pelos momentos de descontração e boa convivência na república.

A minha grande amiga e irmãzinha de vida Carol simplesmente por ter me feito seu amigo e estar presente em todos os momentos importantes da minha vida.

Aos meus novos amigos e companheiros no dia-a-dia na FEAGRI: Guilherme, Allan, Aline, Maicon, Fabio, Natália, Rose, João Neto, Leandro, Camila e Ana Paula. E àqueles de longas datas: Odilon, Paulo Onetti, Leandro Luiz e Renan. Agradeço por toda força, apoio e amizade.

Ao meu grande Juliano, pelo apoio e amizade nas viagens a Piracicaba, pela troca de experiências e boas conversas. É sempre uma grande satisfação sentar a prostrar com você sobre a faculdade, a vida na roça, nossas pesquisas, os amigos.

Aos Técnicos de laboratório Célia e Júnior pela paciência e competência no auxílio às análises.

Aos Professores Edson, Jansle, Mauro (UNICAMP) e Carlos Eduardo Cerri (ESALQ) pelos ensinamentos que ficarão por toda vida.

Àqueles que não foram citados, mas de alguma forma contribuíram para que esta dissertação fosse concluída, o meu muito obrigado!

*Uma existência sem sonhos é como uma semente sem solo...*

**Augusto Cury**

**Carta do Índio Chefe Seattle, "Manifesto da Terra-Mãe", de 1854**

*Ensinem as suas crianças o que ensinamos as nossas que a terra é nossa mãe. Tudo o que acontecer à terra, acontecerá aos filhos da terra. Se os homens cospem no solo, estão cuspiendo em si mesmos.*





## LISTA DE FIGURAS

	Página
<b>Figura 1.</b> Curva do perfil real (a) e perfil escalonado (b) do solo. ....	15
<b>Figura 2.</b> Curva do perfil real (a) e curva interpolada (c) que passa pelos pontos médios dos horizontes da figura 1. ....	18
<b>Figura 3.</b> Curva do perfil real (a) e uma curva de igual área (d), de tal forma que para cada horizonte $\sum X = \sum Y$ .....	19
<b>Figura 4.</b> Usina Iracema do Grupo São Martinho onde foram realizados os estudos, em Iracemápolis/SP. ....	21
<b>Figura 5.</b> Áreas de cultivo de cana de açúcar e perfis estudadas. a: cana crua colhida mecanicamente há 5 anos (área 1); b: cana crua colhida mecanicamente há 10 anos (área 2). ....	22
<b>Figura 6.</b> a: Vista frontal da trincheira da área 1 com os perfis experimental ( $P_e$ ) e pedológico ( $P_p$ ) lado a lado; b: Detalhe da amostragem de solo para determinação do C de 2 em 2 cm no perfil experimental ( $P_e$ ).....	24
<b>Figura 7.</b> Média dos valores de COS para 5 e 10 anos de colheita mecanizada da cana crua. ....	41
<b>Figura 8.</b> Média dos valores de COS em profundidade (camadas de 10 em 10 cm).....	42
<b>Figura 9.</b> Média dos valores de COS analisados por via úmida e via seca. ....	42
<b>Figura 10.</b> Gráficos da dispersão dos teores de COS determinados por dois métodos, via úmida e via seca, para quatro faixas de profundidade: . a: Superficial (0-30 cm); b: Intermediária (30-70 cm); c: Inferior (70-100 cm); d: Total (0-100 cm). ....	45
<b>Figura 11.</b> Densidade do solo ( $\rho$ , kg dm <sup>-3</sup> ) por horizonte do perfil pedológico $P_p1$ . ....	47
<b>Figura 12.</b> Água disponível e facilmente disponível nos horizontes pedológicos do $P_p1$ .....	49
<b>Figura 13.</b> Curvas experimentais da variação contínua em profundidade do COS para o $P_e1$ (n=50) ajustadas empregando a função <i>spline quadrática de igual área</i> . ....	52
<b>Figura 14.</b> Ilustração das curvas ajustadas aos dados de COS via úmida do perfil experimental (n=50) e ao perfil pedológico (n=5) da área 1. ....	54
<b>Figura 15.</b> Gráfico da dispersão e linha de tendência da regressão linear entre valores COS estimados pela curva do perfil experimental (em X) e os estimados pela curva do perfil pedológico (em Y). ....	55
<b>Figura 16.</b> Gráfico da dispersão de valores medidos e estimados de COS, linha de tendência da regressão linear, e equação de regressão. ....	57
<b>Figura 17.</b> Gráfico de colunas e de pizza representando a distribuição do ECS nas camadas de 0 a 30 cm e 30 a 70 cm na área 1 (5 anos).....	59
<b>Figura 18.</b> Valores de densidade do solo dos horizontes do perfil pedológico da área 2 – $P_p2$ ... ..	60
<b>Figura 19.</b> Representação dos valores de água disponível ( $\theta_{disp}$ ) e água facilmente disponível ( $\theta_{fd}$ ) nos horizontes do perfil pedológico da área 2 – $P_p2$ .....	62

<b>Figura 20.</b> Curvas experimentais da variação contínua em profundidade do COS para o P <sub>e</sub> 2 (n=50) ajustadas empregando a função <i>spline quadrática de igual área</i> .....	64
<b>Figura 21.</b> Ilustração das curvas ajustadas aos dados de COS via úmida do perfil experimental (n=50) e do perfil pedológico (n=5) da área 2.....	65
<b>Figura 22.</b> Gráfico da regressão linear dos dados de COS dos perfis experimental e pedológico da área 2.....	67
<b>Figura 23.</b> Gráfico da dispersão dos valores de COS e linha de tendência da regressão linear entre dados de COS medidos (P <sub>e</sub> 2) e preditos (P <sub>p</sub> 2).....	69
<b>Figura 24.</b> Gráfico de colunas e de pizza representando a distribuição do ECS nas camadas de 0 a 30 cm e 30 a 70 cm na área 2 (10 anos).....	70
<b>Figura 25.</b> Gráfico comparativo dos teores de argila (g kg <sup>-1</sup> ) nos horizontes pedológicos das áreas 1 e 2. ....	71
<b>Figura 26.</b> Densidade das partículas (kg dm <sup>-3</sup> ) nos horizontes pedológicos das áreas 1 e 2. ....	71
<b>Figura 27.</b> Densidade do solo (kg dm <sup>-3</sup> ) nos horizontes pedológicos das áreas 1 e 2. ....	72
<b>Figura 28.</b> Relação entre a densidade do solo e a porosidade total do solo para os perfis das áreas 1 e 2. ....	73
<b>Figura 29.</b> Gráfico de dispersão dos valores de COS e CTC e linha de tendência da regressão linear para os dados dos perfis das áreas 1 e 2. ....	74
<b>Figura 30.</b> Teores de COS (g kg <sup>-1</sup> ) determinados por via úmida nos horizontes pedológicos das áreas 1 e 2. ....	76
<b>Figura 31.</b> Curvas da variação contínua do COS em profundidade das duas áreas: 1 - colheita mecanizada da cana crua há 5 anos e 2 - colheita mecanizada da cana crua há 10 anos. ....	78

## LISTA DE TABELAS

	Página
<b>Tabela 1.</b> Espessuras dos horizontes dos perfis pedológicos das áreas 1 (5 anos de colheita da cana crua) e 2 (10 anos de colheita da cana crua). ....	23
<b>Tabela 2.</b> Análise de variância e teste F ( $p < 0,01$ ) para os dados de COS. ....	39
<b>Tabela 3.</b> Valores médios de COS ( $\text{g kg}^{-1}$ ) e teste de Tukey ( $p < 0,01$ ) realizado. ....	40
<b>Tabela 4.</b> Coeficientes de Correlação ( $r$ ) entre os dados de COS determinados por via úmida e via seca. ....	44
<b>Tabela 5.</b> Coeficientes de determinação ( $R^2$ ), fator de correção e equação da regressão linear dos dados de COS determinados por via úmida e via seca para quatro faixas de profundidade. ....	44
<b>Tabela 6.</b> Caracterização física do $P_p1$ : granulometria, densidade das partículas ( $\rho_s$ ). ....	46
<b>Tabela 7.</b> Caracterização física do perfil pedológico $P_p1$ : porosidade total ( $\alpha$ ), macroporosidade ( $\alpha_{mac}$ ), microporosidade ( $\alpha_{mic}$ ), água disponível ( $\theta_{disp}$ ) e água facilmente disponível ( $\theta_{fd}$ ). ....	48
<b>Tabela 8.</b> Caracterização química de rotina do perfil pedológico da área 1 ( $P_p1$ , após 5 anos com colheita da cana crua). ....	50
<b>Tabela 9.</b> Carbono orgânico do solo ( $\text{g kg}^{-1}$ ) no perfil experimental da área 1 ( $P_e1$ ) determinado por via úmida e seca em 50 amostras, extraídas a cada 2 cm até 1,0 metro de profundidade. ....	50
<b>Tabela 10.</b> Carbono orgânico do solo determinado por via úmida nos horizontes do perfil pedológico da área 1 ( $P_p1$ , manejo com colheita da cana crua há 5 anos). ....	53
<b>Tabela 11.</b> Valores de COS ( $\text{g kg}^{-1}$ ) extraídos das curvas ajustadas aos dados dos perfis experimental ( $P_e1$ ) e pedológico ( $P_p1$ ) em profundidades selecionadas por sorteio. ....	54
<b>Tabela 12.</b> Dados de COS determinados e extraídos do perfil pedológico (preditos). ....	56
<b>Tabela 13.</b> Distribuição do estoque de carbono nos horizontes do perfil pedológico da área 1, manejada com colheita mecanizada da cana crua há cinco anos. ....	58
<b>Tabela 14.</b> Caracterização física do $P_p2$ : granulometria e densidade das partículas ( $\rho_s$ ). ....	60
<b>Tabela 15.</b> Caracterização física do $P_p2$ : porosidade total ( $\alpha$ ), macroporosidade ( $\alpha_{mac}$ ), microporosidade ( $\alpha_{mic}$ ), água disponível ( $\theta_{disp}$ ) e água facilmente disponível ( $\theta_{fd}$ ). ....	61
<b>Tabela 16.</b> Caracterização química perfil pedológico da área 2 – $P_p2$ . ....	62
<b>Tabela 17.</b> Carbono orgânico do solo ( $\text{g kg}^{-1}$ ) no perfil experimental da área 2 ( $P_e2$ ) determinado por via úmida e seca em 50 amostras, extraídas a cada 2 cm até 1,0 metro de profundidade. ....	63
<b>Tabela 18.</b> Carbono orgânico do solo determinado por via úmida nos horizontes do perfil pedológico da área 2 ( $P_p2$ , manejo com colheita da cana crua há 10 anos). ....	65
<b>Tabela 19.</b> Valores de COS ( $\text{g kg}^{-1}$ ) extraídos das curvas ajustadas aos perfis experimental ( $P_e2$ ) e pedológico ( $P_p2$ ) em profundidades definidas por sorteio. ....	66
<b>Tabela 20.</b> Dados de COS determinados por via úmida em amostras independentes (medidos) e dados de COS extraídos da curva ajustada do perfil pedológico da área 2 (preditos). ....	68

<b>Tabela 21.</b> Distribuição do estoque de carbono nos horizontes pedológicos da área 2 – P <sub>p</sub> 2. ....	69
<b>Tabela 22.</b> Conteúdo de água disponível e facilmente disponível nos horizontes pedológicos das áreas 1 e 2. ....	74
<b>Tabela 23.</b> Conteúdo de COS, densidade do solo, espessura da camada e o respectivo ECS nos horizontes dos perfis pedológicos das áreas 1 e 2. ....	77
<b>Tabela 24.</b> Coeficientes de correlação (r) de determinação (R <sup>2</sup> ) e erro padrão das interações perfil experimental (n=50) x perfil pedológico (n=5) e dados medidos x perfil pedológico para as áreas 1 e 2. ....	79

## LISTA DE SIGLAS/ABREVIATURAS

- ✓  $\alpha$  – Porosidade Total do Solo
- ✓  $\alpha_{\text{mac}}$  – Macroporosidade do Solo
- ✓  $\alpha_{\text{mic}}$  – Microporosidade do Solo
- ✓  $\rho$  - Densidade do Solo
- ✓  $\rho_s$  - Densidade das Partículas
- ✓  $\theta_{\text{cc}}$  - Umidade Volumétrica na Capacidade de Campo – 10 kPa
- ✓  $\theta_{\text{cri}}$  - Umidade Volumétrica Crítica – 100 kPa
- ✓  $\theta_{\text{disp}}$  - Água Disponível
- ✓  $\theta_{\text{fd}}$  - Água Facilmente Disponível
- ✓  $\theta_{\text{pmp}}$  - Umidade Volumétrica no Ponto de Murcha Permanente – 1500 kPa
- ✓ 1º ciclo – após 5 anos de colheita mecanizada da cana crua, área 1
- ✓ 2º ciclo - após 10 anos de colheita mecanizada da cana crua, área 2
- ✓ Al – Alumínio
- ✓ Área 1 - após 5 anos de colheita mecanizada da cana crua, 1º ciclo
- ✓ Área 2 - após 10 anos de colheita mecanizada da cana crua, 2º ciclo
- ✓ C – Carbono
- ✓ Ca – Cálcio
- ✓  $\text{CaCO}_3$  - Carbonato de Cálcio
- ✓  $\text{CH}_4$  – Gás Metano
- ✓ CI - Carbono Inorgânico
- ✓ CO - Carbono Orgânico
- ✓  $\text{CO}_2$  - Gás Carbônico
- ✓ COL – Colorimetria
- ✓ CONAB - Companhia Nacional de Abastecimento
- ✓ COS – Carbono Orgânico do Solo
- ✓  $\text{COS}_{\text{med.}}$  = Carbono Orgânico do Solo medido ou extraído do perfil experimental
- ✓  $\text{COS}_{\text{ped.}}$  = Carbono Orgânico do Solo extraído do perfil pedológico (predito)
- ✓ COT - Carbono Orgânico Total
- ✓  $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$  - Dicromato
- ✓ CT - Carbono Total
- ✓ CTC - Centro de Tecnologia Canavieira (Empresa); Capacidade de Troca de Cátions (Atributo Físico do Solo)
- ✓ Cu – Cobre
- ✓ CV = Coeficiente de Variação
- ✓  $\epsilon$  = Erro padrão
- ✓ E - Espessura da Camada
- ✓ ECS – Estoque de Carbono do Solo
- ✓ F = Valor do “F” Obtido (Estatística)
- ✓  $F_{\text{tab.}}$  = Valor de “F” Tabelado
- ✓ GEE - Gases de Efeito Estufa
- ✓ GL - Graus de Liberdade
- ✓ H – Hidrogênio
- ✓ H – Hidrogênio
- ✓  $\text{H}_2\text{O}$  – Água
- ✓ IPCC - Painel Intergovernamental Sobre Mudanças Climáticas
- ✓ K – Potássio
- ✓ LVd - Latossolo Vermelho eutrófico
- ✓ LVdf - Latossolo Vermelho distroférrico
- ✓ LVe - Latossolo Vermelho eutrófico
- ✓  $M_{6\text{kPa}}$  - Massa do Solo Após ser Submetido à Pressão de 6 kPa

- ✓ MAPA - Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento
- ✓ Mg – Magnésio
- ✓ MO - Matéria Orgânica
- ✓ MOS - Matéria Orgânica do Solo
- ✓  $M_s$  - Massa do solo seco
- ✓  $M_{sat}$  - Massa do Solo Saturado
- ✓ N – Nitrogênio
- ✓ n = Número de dados
- ✓  $N_2$  – Gás Nitrogênio, Azoto
- ✓  $N_2O$  – Óxido Nitroso
- ✓  $O_2$  – Oxigênio
- ✓  $O_2$  – Oxigênio
- ✓ P – Fósforo
- ✓  $P_e$  – Perfil Experimental (n=50)
- ✓ pH - Reação do Solo
- ✓  $P_p$  – Perfil Experimental (n=5)
- ✓ PVAd - Argissolo Vermelho-amarelo distrófico
- ✓ QM - Quadrado Médio
- ✓ RQo - Neossolo Quartzarênico órtico
- ✓ SB - Soma de Bases do Solo
- ✓ SP – Estado de São Paulo
- ✓ SQ - Soma do Quadrado
- ✓ TFSA - Terra Fina Seca ao Ar
- ✓ UTM - Universal Transversa de Mercator
- ✓ V - Volume de solo
- ✓ V% - Saturação por Bases do Solo
- ✓ WB - Walkley-Black

## 1. INTRODUÇÃO

O solo, substrato básico para a sobrevivência da vida no planeta, suporta sobre sua superfície os mais variados usos para satisfazer as necessidades humanas, além de fornecer fontes para seu sustento e sobrevivência (BERTONI e LOMBARDI NETO, 2010). Em ecossistemas naturais preservados, mantém-se uma estreita e harmônica integração da cobertura vegetal com o sistema físico, químico e biológico do solo, por meio de processos essenciais, como a ciclagem de nutrientes via formação e decomposição da matéria orgânica, conforme destacado por FERREIRA et al. (2007).

LAL (2004a) destaca que esta harmônica integração solo-vegetação é de grande valia para o planeta, uma vez que os resíduos vegetais são a principal fonte de matéria orgânica para o solo, fazendo com que o C estocado no solo até 1,0 m de profundidade seja em média 4,1 vezes maior que o C estocado na vegetação e 3,0 vezes maior que o C estocado na atmosfera.

Desta forma, a conversão destes ecossistemas preservados em agrossistemas tende a modificar o estoque de carbono do solo (ECS), devido às práticas de preparo do solo e de manejo agrícola alterarem o equilíbrio pré-existente no ecossistema natural. Neste contexto AMADO (2008) destaca que o solo é um grande depósito de C (dreno), entretanto pode tornar-se uma grande fonte de gás carbônico (CO<sub>2</sub>) para a atmosfera.

De acordo com relatórios do IPCC, o uso da terra e as mudanças de uso da terra afetam diretamente as trocas de gases de efeito estufa (GEE) entre os reservatórios de C terrestres e a atmosfera (IPCC, 2001; IPCC, 2006). A conversão de ecossistemas nativos em agrossistemas, somada à agricultura, contribui com aproximadamente 24% das emissões mundiais de CO<sub>2</sub>, 55% das emissões de metano (CH<sub>4</sub>) e 85% do total das emissões de óxido nitroso (N<sub>2</sub>O) para a atmosfera, segundo dados do IPCC (2007). No Brasil, as estimativas de emissões de gases de efeito estufa (GEE) oriundas da mudança de uso da terra e agricultura são bem mais acentuadas percentualmente, representando 75%, 91% e 94% do total de emissões de CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O, respectivamente (CERRI e CERRI, 2007; CERRI et al., 2009).

Considerando que pequenas oscilações no ECS podem produzir grandes efeitos no sistema climático global (SZAKÁCS, 2003), a conservação e/ou incremento do ECS está entre as principais alternativas para a redução da emissão de GEE na atmosfera, conforme destacado por SANDI (2009). Também, as evidências da contribuição do CO<sub>2</sub> atmosférico para o aquecimento global explicam o interesse pela quantificação do COS (CERRI et al., 2003; LAL, 2004b).

Neste sentido, sabe-se que nos solos minerais a distribuição vertical do COS decresce com a profundidade, de forma não linear (HILINSKI, 2001). Em extensa revisão de literatura realizada por SCANDRETT et al. (2010) foi demonstrado que na maioria dos estudos que visam quantificar os efeitos do uso da terra sobre o conteúdo e estoque COS mensura-se apenas as mudanças na camada superficial do solo (0 - 15cm) e que, de fato, pouquíssimos trabalhos quantificam o COS em maiores profundidades. Contrariando estas pesquisas, BATJES (1996); FAO (2001) e JOBBÁGY e JACKSON (2000) indicaram a importância dos estudos em maiores profundidades quando em seus trabalhos demonstraram que para a maior parte dos solos minerais o ECS nas camadas 0-30 cm e 30-100 cm são aproximadamente iguais, revelando ser significativa a quantidade de COS estocada em subsuperfície.

Contudo, MCBRATNEY et al. (2003) e GRIMM e BEHRENS (2010) relatam que a ciência ainda necessita de novas e crescentes formas de aquisição de informação quantitativa acerca da variação espacial e temporal de atributos-chave do solo, como no caso do carbono orgânico do solo (COS). Considera-se, que a modelagem da variação contínua em profundidade de atributos do solo é uma destas novas formas de aquisição de informações através do aproveitamento de dados já disponíveis em levantamentos de solos realizados. Isto porque, nos levantamentos pedológicos, os solos são descritos e classificados com base na subdivisão dos perfis em horizontes ou camadas de acordo com critérios genético-morfológicos.

Sendo assim, este trabalho se insere no esforço para a quantificação da variação do COS, onde duas questões fundamentais serão respondidas: i) qual é a eficiência do uso da uma função *Spline quadrática de igual área* na modelagem da variação contínua do COS em profundidade utilizando poucos dados; ii) qual a influência do tempo de adoção da colheita mecanizada da cana crua na curva característica de variação do COS em profundidade?

### **1.1. Hipóteses**

As hipóteses acreditadas nesta pesquisa são:

- i) a função *Spline quadrática de igual área* descreve com precisão a variação do COS em profundidade a partir de um pequeno número de amostras (dados de horizontes pedológicos);
- ii) os teores e estoque de COS são maiores em áreas com dois ciclos de cana crua (10 anos de colheita mecânica) quando comparado ao uso de um ciclo deste sistema.;



iii) o estoque de carbono do solo em subsuperfície 30 a 100 cm representa pelo menos 50% do estoque total até 1 m de profundidade.

## **1.2. Objetivos geral**

Modelar a variação contínua do carbono orgânico em profundidade no solo utilizando uma função *Spline quadrática de igual área*.

### **1.2.1. Objetivos específicos**

Implementar a função *Spline quadrática de igual área* no MATLAB com as alterações necessárias para uso na modelagem da variação do COS em profundidade.

Modelar a variação contínua do COS em profundidade utilizando dados obtidos de horizontes pedológicos (poucos dados).

Validar a curva de COS ajustada a partir de poucos dados (n=5) através da comparação com a uma curva construída a partir de um maior número de amostras (n=50) e com dados medidos (n=50).

Quantificar o conteúdo e estoque de COS até 1 m de profundidade e avaliar a contribuição da camada subsuperficial (30-100 cm) para o estoque de carbono do solo.

Avaliar o efeito do tempo de adoção da colheita mecanizada da cana-de-açúcar não queimada sobre a variação do conteúdo e estoque de COS em profundidade.

Determinar fatores de correção para resultados de COS do método oxidação úmida para o método de combustão seca.



## 2. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. Carbono orgânico do solo (COS) e matéria orgânica do solo (MOS)

O carbono (C) é armazenado na Terra principalmente em cinco compartimentos: oceânico, geológico, pedológico (solo), biótico (biomassa vegetal e animal) e atmosférico. Segundo LAL (2004b) todos esses compartimentos estão interconectados, e o C “circula” entre eles.

O compartimento geológico ou crosta terrestre é o maior reservatório, com cerca de  $90.000 \times 10^3$  Pg de C (SUNDQUIST, 1993). Apesar dessa grande quantidade, a maior parte do C de natureza geológica não participa da ciclagem, a não ser uma pequena fração, a qual constitui um reservatório de  $5 \times 10^3$  Pg de C, onde  $4 \times 10^3$  Pg de C encontram-se sob a forma de carvão, outros  $0,5 \times 10^3$  Pg de C sob a forma de óleo e mais  $0,5 \times 10^3$  Pg de C na forma de gás (LAL, 2004b). Ainda segundo o autor, no compartimento oceânico há em torno de  $38 \times 10^3$  Pg de C, principalmente na forma inorgânica. O reservatório biótico é estimado em  $0,56 \times 10^3$  Pg de C e o compartimento atmosférico em  $0,76 \times 10^3$  Pg. CARVALHO et al. (2010) destacam que uma menor quantidade de C no compartimento atmosférico não o torna menos importante, dada a sua grande interferência nas mudanças climáticas.

O solo, ou reservatório pedológico, contém  $2,5 \times 10^3$  Pg de C divididos em  $1,55 \times 10^3$  Pg na forma de C orgânico e  $0,95 \times 10^3$  Pg de C inorgânico. Para SEGNINI (2007), a entrada de C no sistema, ou o seu sequestro no solo, acontece quando o  $\text{CO}_2$  é capturado pelas plantas no processo de fotossíntese, que em presença de água e minerais, transformam esse gás em biomassa vegetal.

De acordo com CERRI et al. (2007), uma considerável parte do C orgânico do solo se encontra na matéria orgânica do solo (MOS). O restante estaria presente em minerais carbonatados e na forma de gases (CAMARGO et al., 1986). Já MILLIOLI (2009); THENG (1987); MOREIRA e SIQUEIRA (2006) destacam que todo o conteúdo de C orgânico do solo encontra-se na forma de MOS, sendo que 98 % deste estão na matéria orgânica morta (substâncias húmicas: ácido fúlvico, húmico e humina e substâncias não húmicas: carboidratos, lipídeos, proteínas, etc.) e 2 % está na matéria orgânica viva (raízes de plantas, macro e microrganismos).

Na literatura, o exame dos termos usados para descrever a MOS revela a falta de definições precisas sobre o que a MOS e suas várias frações representam. Tal dificuldade existe devido a heterogeneidade do material orgânico encontrado no solo em termos de suas fontes, composição química e física, diversidade de funções, e dinâmica, sempre mudando de caráter (BALDOCK e NELSON, 2000). De modo sintético, o termo matéria orgânica do solo (MOS) engloba todos os materiais orgânicos encontrados no solo (STEVENSON, 1994), excluindo carvão vegetal (OADES, 1988). A Enciclopédia de Ciência do Solo (LAL, 2006) apresenta uma definição mais ampla para o termo MOS como segue: a MOS compreende todos os derivados de materiais vegetais e animais incorporados ao solo ou dispostos sobre sua superfície, na forma viva ou nos vários estágios de decomposição, excluindo-se a parte aérea das plantas.

CERRI et al. (2007) destacam que quando se realizam práticas de manejo não conservacionistas o material orgânico no solo é facilmente perdido, em um processo de decomposição onde o C presente na matéria orgânica é oxidado a CO<sub>2</sub> e emitido para a atmosfera. Por outro lado, o aumento do estoque de MOS é um processo lento, que necessita de um manejo adequado, principalmente em regiões de clima tropical, onde a taxa de decomposição é mais acentuada devido às altas temperaturas e umidade do solo (SIX et al., 2002). A esse respeito, MOREIRA e SIQUEIRA (2006) indicam que são necessários aproximadamente 100 anos para elevar o teor de MOS de 3,0 para 4,0%, em um sistema que receba anualmente 2 Mg ha<sup>-1</sup> de resíduo.

## **2.2. Métodos de determinação do C do Solo**

O Carbono do solo se divide em duas frações: carbono orgânico (CO) e carbono inorgânico (calcário, carvão, resíduos). A quantificação do C tem sido realizada empregando-se métodos que determinam o carbono orgânico total do solo (COT) e o carbono total do solo (CT), que corresponde ao carbono orgânico + carbono inorgânico. Contudo, o carbono inorgânico (CI) do solo pode ser determinado por diferença das duas formas (GATTO et al., 2009). Segundo TABATABAI (1996), o CT do solo se encontra em três tipos de materiais: formas condensadas de composições próximas do carbono elementar (nas formas de carvão vegetal, mineral e grafite); resíduos de plantas, animais e microrganismos alterados e bastante resistentes, denominados às vezes de “húmus” e “humatos”; e resíduos orgânicos pouco alterados de vegetais, animais e microrganismos vivos e mortos, que sofrem decomposição.

Diversos métodos têm sido utilizados para determinação do C ( $\text{g kg}^{-1}$  ou  $\text{g dm}^{-3}$ ) do solo, sendo que NELSON e SOMMERS (1996) apresentam uma revisão dos métodos atualmente utilizados, que incluem oxidação da MOS por via seca ou úmida para determinação do CT e métodos de oxidação via úmida para determinação do COT. Tendo em vista que comumente o CI está presente nos solos em teores muito baixos ou desprezíveis, vários autores consideram  $\text{CT} = \text{COT}$ , empregando o método de combustão a seco (analisador elementar) para determinação do COT (CONCEIÇÃO et al., 1999; SILVA et al., 1999; SCHUMACHER, 2002; MACHADO et al., 2003; RHEINHEIMER et al., 2008; GATTO et al., 2009; SOTOMAYOR, 2009; NASCIMENTO et al., 2010; COSER et al., 2012; TOMASI et al., 2012).

Na determinação do COT do solo por oxidação da matéria orgânica via úmida enquadram-se os métodos WALKLEY e BLACK (1934); Walkley-Black, modificado por TEDESCO et al. (1995) sem fator de correção; captura de  $\text{CO}_2$ , descrito por NELSON e SOMMERS (1996); Mebius modificado por NELSON e SOMMERS (1996); e, Mebius adaptado para bloco de digestão (Mebius no bloco), descrito por YEOMANS e BREMNER (1988) e colorimétrico (Walkley-Black adaptado) descrito por CANTARELLA et al. (2001).

De acordo com RODELLA e ALCARDE (1994) e PIMENTEL et al. (2006), os métodos de combustão úmida são mais acessíveis, entretanto utilizam reagentes bastante tóxicos. O método Walkley-Black (WALKLEY e BLACK, 1934) é o que vem sendo utilizado pela maioria dos laboratórios no Brasil.

O método de combustão a seco atualmente é considerado padrão, pelo qual a amostra é oxidada em presença de dicromato ( $\text{Cr}_2\text{O}_7^{2-}$ ) e  $\text{CO}_3\text{O}_4/\text{Ag}$  em forno, à temperatura de 1.020 – 1.500 °C, alimentado com  $\text{O}_2$  sob pressão de 30 kPa. As moléculas orgânicas são oxidadas na forma  $\text{N}_x\text{O}_y$  e  $\text{CO}_2 - \text{H}_2\text{O} + \text{O}_2$ , que são carregadas, nas formas de gás, para um forno de redução, sob fluxo de hélio. O forno de redução contém íons Cu, à temperatura de 750°C, de onde o N sai na forma de  $\text{N}_2$ . Posteriormente, o  $\text{N}_2$  e o  $\text{CO}_2$  são separados em uma coluna cromatográfica e determinados em detector apropriado (RHEINHEIMER et al., 2008).

Outros métodos de determinação do COT incluem ainda cromatografia (DEAN JÚNIOR, 1974); gravimetria por incineração em mufla (BALL, 1964; BEN-DOR e BANINI, 1984; JACKSON, 1982); termogravimetria (WENDLANDT, 1986; BELTRAN et al. 1988).

SCHUMACHER (2002), em um levantamento de diferentes métodos, concluiu que o analisador elementar (combustão a seco) é o mais indicado para análises quantitativas devido a

fatores tais como: ausência de etapa adicional de preparação da amostra, além de remoção de sua umidade, garantia de destruição de todas as formas de carbono devido a alta temperatura aplicada, curto tempo de análise (5 a 7 minutos por amostra), e maior precisão dos sistemas automatizados quando comparados aos manuais.

No Brasil, CONCEIÇÃO et al. (1999), em um estudo comparativo de métodos de determinação do teor de matéria orgânica em solos orgânicos do estado do Rio de Janeiro, analisaram os métodos: a) Walkley-Black modificado (método volumétrico pelo dicromato de potássio e titulação pelo sulfato ferroso) para determinação do COT; b) combustão em mufla a 400°C durante a noite (LYN et al., 1974), em amostras de terra fina seca ao ar (TFSA) e maceradas para determinação da perda de massa; c) combustão em mufla a 600°C por seis horas (KAMPF e SCHNEIDER, 1989), em amostras indeformadas e em amostras de TFSA e maceradas para determinação da perda de massa e; d) analisador elementar CHN, em amostras de TFSA e maceradas para determinação do COT. Os autores destacam que os métodos de combustão em mufla determinam a perda de massa por ignição, relacionando-se com a MOS e não com o C em si. Observaram ainda que os teores médios de COT determinados empregando os métodos Walkley-Black e analisador elementar foram respectivamente de 118,2 e 140,8 g kg<sup>-1</sup>. Ainda, CONCEIÇÃO et al. (1999) encontraram alto coeficiente de correlação ( $r^2 = 0,968$ ) entre o teor médio de COT determinado pelo método Walkley-Black e a perda de massa por incineração em mufla em amostras de solo maceradas.

MACHADO et al. (2003) estudaram os métodos de combustão por via úmida com dicromato, aquecimento por 5 minutos e determinação por titulometria (WB); combustão por via úmida com dicromato, aquecimento por 5 minutos e determinação por colorimetria (COL); e, combustão por via seca de amostras moídas a granulometria < 0,177mm em aparelho Perkin Elmer CHN 2400 Series II (CHN). Os autores encontraram uma estreita correlação positiva entre os métodos, pois os coeficientes de determinação ( $R^2$ ) foram de 0,921 entre CHN e WB; 0,924 para COL e WB; e 0,899 para COL e CHN. Os autores destacaram ainda que na presença de CaCO<sub>3</sub> (solos carbonáticos ou com carbonatos de cálcio) houve uma tendência dos valores determinados com o método CHN serem maiores que os obtidos por titulometria (método WB) e colorimetria (método COL).

RHEINHEIMER et al. (2008) avaliaram os métodos Walkley-Black modificado por TEDESCO et al. (1995), sem o fator de correção, o de captura de CO<sub>2</sub> descrito por NELSON e

SOMMERS (1996), o de Mebius modificado por NELSON e SOMMERS (1996) e o de Mebius adaptado para bloco de digestão (Mebius no bloco) descrito por YEOMANS e BREMNER (1988). Os autores verificaram que todos os métodos mostraram-se sensíveis, refletindo as variações naturais dos teores de COT decorrentes das diferentes condições de uso e da camada de amostragem. Além disso, a precisão dos métodos na determinação de COT foi alta, apresentando coeficientes de variação inferiores a 10%. Os teores de COT obtidos pelo método Mebius no bloco não diferiram daqueles obtidos pelos métodos Walkley-Black e Mebius modificado.

Segundo RHEINHEIMER et al. (2008) o método da captura de CO<sub>2</sub> apresenta menor precisão e exatidão, subestimando significativamente os teores de COT do solo, comparado aos demais métodos de combustão úmida. Já o método Mebius no bloco apresenta tendência de maior precisão em relação aos métodos Walkley-Black e Mebius modificado na determinação de COT em solos com condições variadas de uso, porém subestima os valores em relação ao método padrão (combustão via seca – analisador elementar). Além disso, os autores determinaram o fator de correção que deve ser aplicado aos resultados obtidos pelo método Mebius no bloco para equivaler aos teores obtidos pelo analisador elementar de C, como sendo igual a 1,14. Este valor é muito próximo do obtido por TEDESCO et al. (1995), de 1,12, para o método Walkley-Black.

Em um estudo realizado em solos do Rio Grande do Sul, FRATTINI e KALCKMANN (1967) encontraram um coeficiente de correlação de 0,936 entre os métodos de combustão seca e úmida.

Tendo em vista a revisão de literatura e os objetivos do presente trabalho, empregar-se-ão dois métodos analíticos de determinação do COS: Walkley-Black (método de referência até passado recente, com muitos dados publicados sobre C no solo empregando esse método) e o de combustão/oxidação via seca com analisador elementar (método padrão atual com uso crescente na literatura). Este último tem sido crescentemente adotado nos laboratórios devido a alta precisão e exatidão dos resultados, conforme atestam SOON e ABBOUD (1991) e NELSON e SOMMERS (1996) e eliminação dos resíduos tóxicos decorrentes da análise pelo método Walkley-Black. Entretanto, o custo da análise é ainda elevado, limitando sua ampla adoção como método de rotina.

### 2.3. Estoque de C orgânico do Solo (ECS)

Existem na literatura diversas abordagens sobre os processos de entrada e saída de C no solo e suas relações com o ECS. Segundo o IPCC (2001), o ECS é o balanço entre a adição de C via fotossíntese e a perda de C devido à sua oxidação a CO<sub>2</sub> pelos organismos heterotróficos ou por erosão.

LAL et al. (1997) destacam que os principais processos responsáveis pelo depósito de carbono no solo são humificação, agregação e sedimentação e os processos responsáveis pela perda do carbono do solo são a erosão, decomposição, volatilização e lixiviação, sendo que a magnitude desses processos é influenciada pelas condições climáticas locais. Considerando-se esta abordagem a mais completa, o ECS é definido pelo balanço entre os processos de entrada e de saída de C do solo descritos por LAL et al. (1997).

De acordo com GATTO et al. (2010), o estoque de carbono orgânico do solo (ECS) é obtido pela soma dos estoques em cada camada de solo. BAYER e MIELNICZUK (2008) descrevem que o ECS de cada camada pode ser determinado pelo produto entre o teor de carbono orgânico do solo (COS, g kg<sup>-1</sup>) pela densidade do solo ( $\rho$ , kg dm<sup>-3</sup>) e pela espessura da camada (E, cm), de acordo com a equação 1:

$$ECS = \frac{COS * \rho * E}{10} \quad (\text{Eq. 1})$$

Sendo:

ECS = estoque de carbono do solo (Mg ha<sup>-1</sup>);

COS = teor de carbono orgânico total do solo (g kg<sup>-1</sup>);

$\rho$  = densidade do solo (kg dm<sup>-3</sup>); e

E = espessura da camada do solo sob consideração (cm).

GIRARDELLO et al. (2007) considera primordial a adoção de uma metodologia de cálculo dos estoques de C que represente com exatidão as alterações provocadas pelos sistemas de manejo do solo e das culturas, desconsiderando aquelas provenientes da modificação das características físicas do solo.

Tradicionalmente, os resultados são expressos em função de camadas de solo com mesma espessura, mas diferentes massas, denominando-se método da camada equivalente. Este método, no entanto, superestima os estoques de C em solos adensados ou compactados. ELLERT e BETTANY (1995) descrevem que pelo método da massa equivalente, pelo qual as espessuras



das camadas de solo são ajustadas de modo que a massa de solo dentro das camadas comparadas seja equivalente. Além disso, deve ser escolhido um tratamento controle (por exemplo, o campo nativo) para se determinar a massa de solo que servirá de referência para comparação, e a partir desse critério a espessura das camadas dos demais tratamentos são corrigidas.

Este método (massa equivalente) elimina o efeito do adensamento ou da compactação do solo na estimativa dos estoques de C orgânico, o que foi comprovado por BAYER et al. (2006), que observaram que a utilização do método da camada equivalente conduziu a uma superestimava de até 51 % dos estoques de C em áreas compactadas (Plantio Direto) em comparação com o método da massa equivalente.

### **2.3.1. Estoque de Carbono e sua relação com o clima e uso/manejo do solo**

A transformação dos ecossistemas naturais em áreas agrícolas, onde o manejo pode incluir o emprego do fogo para a queima da vegetação e o preparo intensivo do solo, condicionou uma queda nos estoques de carbono orgânico do solo (ECS), transformando o solo numa fonte de CO<sub>2</sub> para a atmosfera (LOVATO, 2001).

DUXBURY et al. (1989); FEIGL et al. (1995); HOUGHTON (1995) descrevem que a substituição de ecossistemas naturais por agroecossistemas com culturas introduzidas causa a redução no teor e estoque de C no solo, além de alterar sua qualidade. Entretanto, dependendo do manejo aplicado, pode ocorrer equilíbrio, com recuperação e até mesmo acumulação, o que seria ecologicamente vantajoso, do ponto de vista da diminuição do CO<sub>2</sub> da atmosfera, reduzindo-se a intensificação do efeito estufa e os impactos da atividade agrícola no ambiente (SIQUEIRA, 1993; LAL et al., 1995).

Destaca-se ainda que além das mudanças do uso do solo, no caso do uso agrícola as práticas de manejo também possuem grande influência nos estoques de carbono. ALVAREZ (1999), em experimentos realizados no Pampa Úmido, verificou que é possível estimar um aumento de 4 a 5 Mg C ha<sup>-1</sup> ao passar do sistema convencional de preparo de solo para o sistema conservacionista, principalmente para o sistema plantio direto, em um período de 10 anos.

Em regiões de clima temperado, metade do estoque inicial de carbono é perdido durante os primeiros 50 a 100 anos de cultivo, enquanto que em ambiente tropical as perdas podem ser muito maiores (FELLER e BEARE, 1997), devido à decomposição da matéria orgânica ser bastante acelerada, havendo situações em que os ECS são reduzidos em mais de 50% em menos

de 10 anos de cultivo (SHANG e TIESSEN, 1997). No entanto, deve-se também considerar o potencial de adições de C via fotossíntese, que pode ser duas ou três vezes superior em ambientes tropicais e subtropicais em relação ao temperado seco. ESWARAN et al. (1993) destacam que os solos de clima tropical estocam 32% do total de C orgânico contido nos solos do planeta.

#### **2.4. A cultura da cana-de-açúcar e a conservação do C no sistema**

O Brasil é o maior produtor mundial de cana-de-açúcar, com registro de aumentos da área de cultivo e de produção ano a ano (MAPA, 2008). Embora na safra 2011/2012 tenham sido registradas reduções respectivamente de 2,1% e de 9,1% na área cultivada e na produção em relação à safra 2010/2011 (CONAB, 2011; CONAB, 2012), estima-se a recuperação na safra 2012/2013, com uma produção acima de 8,5 milhões de Mg (5,1% superior à safra 2011/2012) em aproximadamente 602 milhões de hectares cultivados (2,4% superior à safra 2011/2012)<sup>1</sup>.

O Estado de São Paulo é o maior produtor nacional, detendo 52,2% da área plantada na safra 2011/2012 (4,37 milhões de hectares), seguido por Minas Gerais com 8,87% (CONAB, 2011). Para a safra 2012/2013, a CONAB (2012) estima-se que o estado de São Paulo será responsável por 51,66% da área plantada (4,42 milhões de hectares), seguido por Minas Gerais com 8,97% (0,76 milhões de hectares) e por Goiás com 8,54% (0,73 milhões de hectares)<sup>1</sup>.

No sistema de produção da cana-de-açúcar, a queima da biomassa foliar foi por muito tempo uma prática comum, visando facilitar as operações de corte, carregamento e transporte dos colmos, devido à forma de colheita ser essencialmente manual. No entanto, a queima da biomassa além de liberar fuligem, que causa incômodos e danos à saúde da população circunvizinha às áreas de produção (CANÇADO et al., 2006; BARROS e SILVA, 2011), também acarreta emissões de gases como CO<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub> e N<sub>2</sub>O, principais responsáveis pelo agravamento do efeito estufa e aquecimento global da Terra.

Por força da Lei estadual nº 11.241, de 19 de setembro de 2002, a queima dos canaviais vem sendo progressivamente erradicada segundo um cronograma, condicionando o aumento das áreas com colheita mecânica e o desenvolvimento de máquinas e implementos adequados à colheita da cana crua (SÃO PAULO, 2002).

Alguns trabalhos indicam que a supressão da queima com manutenção da palhada sobre o solo resulta em maior concentração de MOS e, conseqüentemente, de C, conforme WOOD

---

<sup>1</sup> Todos os dados apresentados nestes parágrafos referem-se à cana-de-açúcar destinada à atividade sucroalcooleira.

(1991), BLAIR (2000), e NOBLE et al. (2003) na Austrália; DOMINY et al. (2002) e GRAHAM et al. (2002) na África do Sul, e VILLEGAS et al. (1998) em Cuba. Estudos realizados no Brasil mostram que esses efeitos ocorreram em solo de textura muito argilosa (ORLANDO FILHO et al., 1998) e de textura média (SOUZA et al., 2005), mas não em solo de textura arenosa (BALL-COELHO et al., 1993), evidenciando que além do tipo de solo (classe taxonômica) a classe textural influencia a conservação ou sequestro do C.

LUCA et al. (2008) citaram que no processo de decomposição, parte da palhada é incorporada ao solo, fazendo com que funcione como um compartimento sequestrador de C atmosférico, uma vez que a palhada foi produzida no processo fotossintético de assimilação de CO<sub>2</sub> do ar.

SOUZA et al. (2005) estudando o sistema de manejo e colheita da cana-de-açúcar, observaram que no sistema de manejo de cana crua a adição de resíduos orgânicos foi, em média, de 12 Mg ha<sup>-1</sup>. LUCA et al. (2008), estudando o estoque de C em diferentes profundidades de um Argissolo Vermelho-amarelo distrófico (PVAd) e de um Neossolo Quartzarênico órtico (RQo), manejados com e sem queima da palhada, encontraram uma taxa de entrada de resíduos orgânicos de 13,3 Mg ha<sup>-1</sup> ano<sup>-1</sup> em ambos os solos. Os autores observaram ainda que a supressão da queima resultou em aumentos nos estoques de C de 6,3 Mg ha<sup>-1</sup> no Latossolo Vermelho distroférrico (LVdf) e 4,7 Mg ha<sup>-1</sup> no Neossolo Quartzarênico órtico (RQo), ambos para a camada até 20 cm. GALDOS et al. (2009) verificou que a adoção do sistema de manejo sem queima apresentou maiores teores e estoques de C em relação ao manejo com queima.

Segundo BRODOWSKI (2005), em áreas com queima de biomassa vegetal, o aporte de carbono na forma de carvão pode ser significativo. Contudo, este deve ser analisado em estudos de teores e/ou estoques de C do solo em manejos com e sem queima de palhada.

CANELLAS et al. (2007) analisando o estoque de C de um Cambissolo Háplico Ta eutrófico vértico cultivado por longo tempo sob diferentes manejos da cana-de-açúcar observaram que após 55 anos de cultivo com a queima da palha na colheita, o solo apresentou estoque de C de 36,12 Mg ha<sup>-1</sup>, sendo aproximadamente 40% inferior à área sem a queima (59,36 Mg ha<sup>-1</sup>) na camada superficial do solo (20 cm). Já na camada subsuperficial de 20 - 40 cm, o manejo com queima proporcionou um estoque de C de 37,27 Mg ha<sup>-1</sup>, cerca de 35% inferior ao manejo sem queima (56,40 Mg ha<sup>-1</sup>).

No entanto, tendo em vista que a adoção da colheita mecanizada na cultura da cana-de-açúcar é um fato relativamente novo, mas crescente no estado de SP, é imperativo conhecer o efeito temporal da colheita da cana crua no sequestro de carbono no solo, razão pela qual um dos objetivos deste trabalho é de investigar a variação do C em profundidade no solo após um ciclo (5 anos) e após dois ciclos de colheita mecanizada (10 anos).

## **2.5. Modelagem do COS em profundidade no solo**

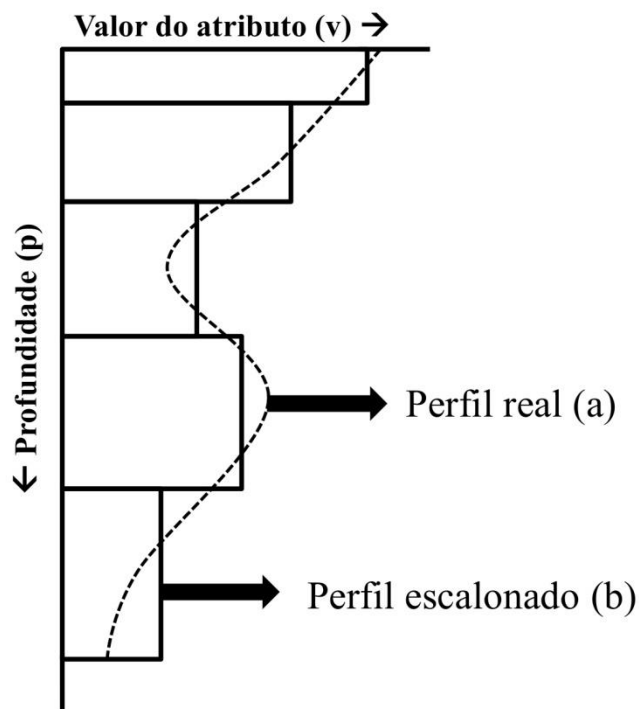
A maioria dos trabalhos que visam analisar o teor de COS estudam apenas as camadas superficiais. SCANDRETT et al. (2010) destacam que tem sido analisados os primeiros 15 cm do solo. Segundo JONES et al. (2005), no continente europeu estas mensurações tem sido realizadas para os primeiros 30 cm do solo. Já LUCA et al., (2008) e CANELLAS et al. (2007) trabalharam na camada de até 40 cm de profundidade.

Entretanto, muitos estudos do perfil dos solos sugerem que as camadas mais profundas contêm quantidades significativas de COS. Na camada de 30-100 cm de profundidade, por exemplo, o teor de CO pode ser igual ao conteúdo presente nos 30 cm superficiais (BATJES, 1996; FAO, 2001; JOBBÁGY e JACKSON, 2000).

BODDEY et al., (2010) estudando LATOSSOLOS na região subtropical do Sul do Brasil observou que, em média, a estimativa de acúmulo de C em 100 centímetros de profundidade foi 59% maior do que o C acumulado nos primeiros 30 cm. BATJES (1996) estudando a camada de 200 centímetros de profundidade do solo, obteve em seus resultados que 29% do CO está localizada na camada de 0-30 cm, 33% na camada de 30-100 cm, e 38% na camada de 100-200 cm. JOBBÁGY e JACKSON (2000) estimou a distribuição vertical de CO do solo em 64% para 0-100 cm, 21% para a camada de 100-200 cm de profundidade e 15% para a camada de 200-300 cm.

Para determinação dos teores de CO e de outros atributos do solo, o perfil de solo é subdividido em horizontes ou camadas para descrição e coleta de amostras. Sendo assim, normalmente toda a profundidade de cada horizonte é amostrada e misturada, tomando-se uma porção que é encaminhada para análise. Assume-se que o resultado obtido corresponde a um valor médio para o referido horizonte ou camada (PONCE-HERNANDEZ et al., 1986). Como resultado deste processo, o perfil é representado por camadas descontínuas ou escalonadas (b), diferentes do perfil verdadeiro (a), conforme demonstra a figura 1.

O perfil escalonado (b) representado na figura 1 é demasiadamente desajeitado para representar adequadamente a variação vertical de um atributo do solo, não sendo possível calcular, com muita confiança, o valor de um dado atributo a uma dada profundidade (ponto de profundidade), ou o seu valor médio ao longo de um intervalo de profundidade (PONCE-HERNANDEZ et al., 1986).



**Figura 1.** Curva do perfil real (a) e perfil escalonado (b) do solo. (adaptado de PONCE-HERNANDEZ et al., 1986).

De acordo com BISHOP et al. (1999), devido a possíveis inadequações em tentar representar com acurácia funções de profundidade para atributos edáficos a partir de dados disponíveis por horizonte do perfil de solo, os cientistas de solo têm empregado vários métodos para modificar os dados disponíveis para os horizontes, de modo a torna-los mais contínuos.

MCBRATNEY et al. (2003) indicam a importância de desenvolver funções que estimem a distribuição contínua do conteúdo de carbono orgânico (CO) em profundidade no perfil do solo, pois esta é uma informação essencial para estimar o estoque de carbono no solo em bases mais realistas. Segundo esses autores, uma função contínua em profundidade no perfil pode ser definida e ajustada aos dados de carbono no solo, em que o teor de carbono em diferentes profundidades pode ser estimado. Os autores destacam ainda que este ajuste de funções é útil

quando se necessita estimar o CO até determinadas profundidades, sendo que a vantagem da utilização de uma função de profundidade (por exemplo, uma exponencial negativa) é que esta permite derivar funções empíricas para prever os parâmetros da função usando mais facilmente os dados medidos ou amplamente disponíveis em bancos de dados.

A vantagem destas técnicas é um melhor aproveitamento das informações contidas nos bancos de dados de solo, uma vez que as camadas ou horizontes não são amostrados em profundidades coincidentes de perfil para perfil, tornando difícil a comparação e discussão dos resultados (ARROUAYS e PELISSIER, 1994).

Para desenvolver tais funções/modelos, é fundamental o conhecimento dos fatores que podem influenciar a variação do CO em profundidade no solo. HIEDERER (2009) destaca que as principais condições que influenciam CO em profundidade do solo, independentemente das condições climáticas são o uso da terra (cobertura), o conteúdo de CO (solo mineral ou orgânico), a profundidade do solo e o teor de argila.

JONES (1973), em trabalho realizado na Savana da África Ocidental empregando regressão linear simples e múltipla, encontrou relação entre o teor de carbono e de nitrogênio com o teor de argila do solo (fator interno), precipitação anual e altitude (fatores externos). JOBBÁGY e JACKSON (2000) comparando diferentes modelos “log-log” para ajustar os dados de carbono orgânico do perfil do solo a bancos de dados globais descobriram que o modelo descrito na Equação 2 foi o que melhor ajustou os dados.

$$\log C = b * \log z + a \quad (\text{Eq. 2})$$

Sendo:

C = conteúdo de carbono

z = profundidade de referência

a e b = parâmetros empíricos

Já no trabalho de MINASNY et al. (2006), o modelo exponencial de CO em profundidade foi o mais amplamente aceito. Este modelo foi também utilizado por MESTDAGH et al. (2004) na Bélgica e por MIKHAILOVA e POST, (2006) na Rússia. HILINSKI (2001) adaptou a função de profundidade exponencial negativa para o modelo CENTURY matéria orgânica do solo.

De acordo com WEBSTER (1978); MCBRATNEY et al. (2000), uma desvantagem de usar a função de profundidade exponencial negativa é que qualquer variação local no perfil do solo afeta a qualidade de ajuste em qualquer outro lugar no perfil. Portanto, falta flexibilidade

para as funções de ajuste de profundidade, além do fato que a qualidade de ajuste pode ser muito variada.

Um método flexível e preciso para a montagem de funções contínuas de dados sobre o solo é o uso de funções de suavização referidas por *Spline* (ERH 1972). De acordo com BISHOP et al. (1999), o uso de funções *Spline* pode solucionar a problemática destacada no parágrafo anterior.

### **2.5.1. Funções *Spline***

Uma função *Spline* fornece uma aproximação do comportamento das funções que proporcionam estimativas de mudanças locais e abruptas (TADANO et al., 2009). Nos *Splines*, ao invés de se utilizar apenas um polinômio para todo o conjunto de dados, definem-se alguns intervalos e estima-se uma função polinomial para cada um dos intervalos (CHAPRA e CANALE, 1987).

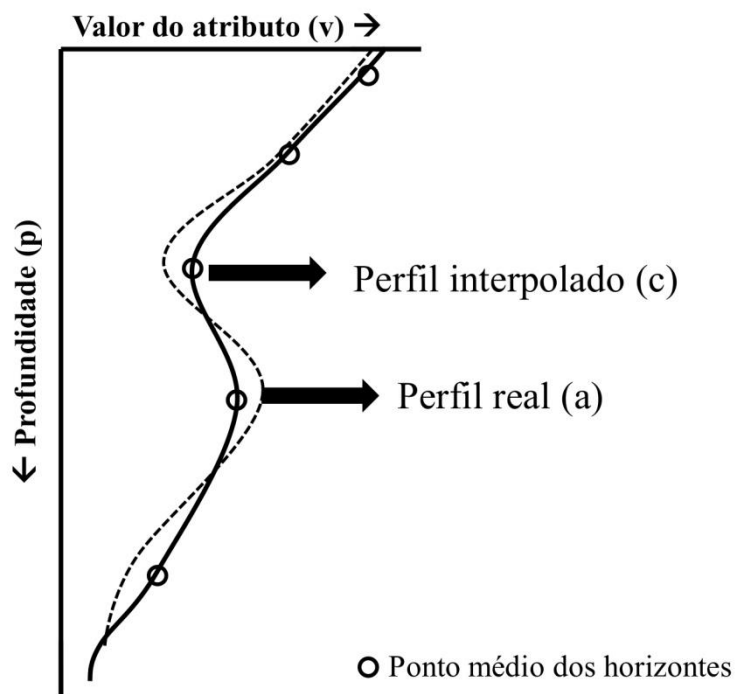
ODGERS et al. (2012) cita que para produzir-se uma *Spline*, é necessário: 1) os valores do atributo do solo para um número de camadas do perfil do solo e 2) os limites superior e inferior das camadas de entrada. De acordo com os estes autores, as camadas não precisam ser contínuas com a profundidade (isto é, pode ser 0-7 cm, 10-20 cm), mas não devem sobrepor-se.

JAUREGUI e PARIS (1985) citam que uma função *Spline* pode ajustar curvas suaves através de um conjunto de pontos e peças de encaixe de uma série de funções locais independentes em pequenos intervalos do perfil do solo.

De acordo com PONCE-HERNANDEZ et al., (1986) nas funções *Spline* que descrevem perfis como o perfil real (a) da Figura 1, a profundidade (p) é independente, e o valor de um atributo do solo (v) é a variável dependente. Contudo, para construir uma função *Spline*, a sequência de pontos deve ser dividida em grupos ao longo da direção da variável independente. Os grupos ou "intervalos" são separados por 'nós', que são especificados pelos valores da variável independente.

Para cada intervalo, é ajustado um polinômio, sob as condições de que os dois polinômios que se interceptam no mesmo nó devem ter os mesmos valores neste ponto e que os valores das suas primeira e segunda derivadas são também iguais (ou seja, mesmo declive e mesma curvatura). Juntas, estas condições asseguram a suavidade de toda a curva (PONCE-HERNANDEZ et al., 1986).

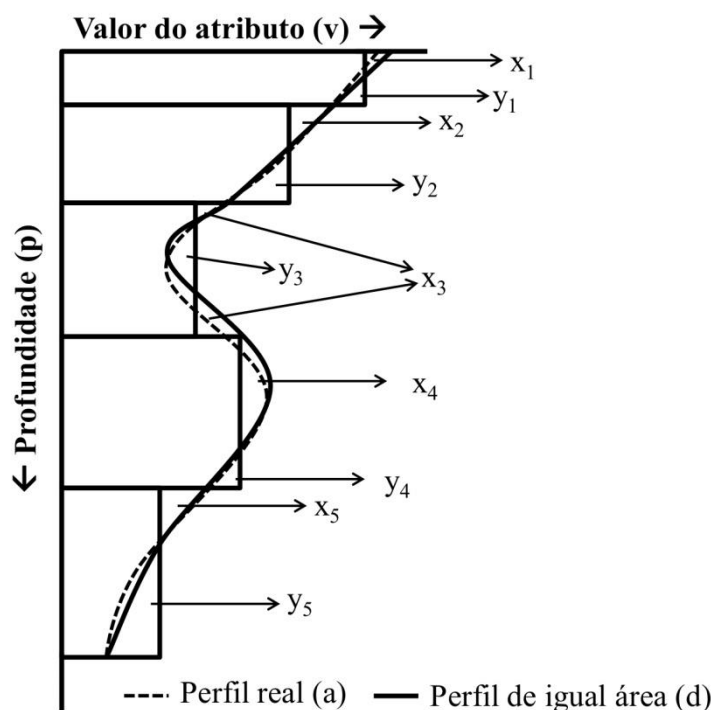
Apesar disso, segundo BISHOP et al., (1999) e PONCE-HERNANDEZ et al. (1986) o ajuste das curvas ocorre empregando valores médios de horizontes ou camadas do solo, onde se assume que esta média corresponde ao valor da propriedade ( $v$ ) na profundidade ( $p$ ) média (ou no ponto médio) do horizonte em questão e portanto, tendem a produzir funções mais suaves do que a realidade, uma vez que os máximos e mínimos já foram amortecidos pela média (Figura 2), mesmo para a função *Spline*.



**Figura 2.** Curva do perfil real (a) e curva interpolada (c) que passa pelos pontos médios dos horizontes da figura 1 (adaptado de PONCE-HERNANDEZ et al., 1986).

Como alternativa a esta suavização, PONCE-HERNANDEZ et al. (1986) propuseram a utilização de uma função *Spline* modificada para modelar atributos do solo em função da profundidade, referida por *Spline quadrática de igual área*. Esta função consiste de vários polinômios quadráticos que se juntam nos nós localizados nas transições (limites) entre horizontes. Para cada camada ou horizonte do solo, a área ( $x$ ) acima e à esquerda da curva interpolada é igual à área ( $y$ ) abaixo e à direita da curva, assegurando assim que o valor médio do horizonte seja mantido (Figura 3).





**Figura 3.** Curva do perfil real (a) e uma curva de igual área (d), de tal forma que para cada horizonte  $\sum X = \sum Y$  (adaptado de PONCE-HERNANDEZ et al., 1986).

BISHOP et al. (1999) testaram a habilidade da *Spline quadrática de igual área* para prever funções do solo em profundidade com base em dados de três perfis de solo, avaliando entre outros atributos o conteúdo de carbono orgânico. Os resultados indicam claramente a superioridade de *Splines de igual área* na predição de funções em profundidade no solo. BISHOP et al. (1999) observaram ainda que as melhores predições foram obtidas quando duas amostras adicionais foram utilizadas, sendo uma na parte superior (0-2 cm) e outra na parte inferior do perfil do solo (98-100 cm).

Tendo em vista o exposto na literatura especializada, o foco central do trabalho reside no desenvolvimento de uma aplicação da função *Spline quadrática de igual área* para modelagem da variação contínua do COT em profundidade no solo.



### 3. MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1. Área de estudo

O estudo foi desenvolvido em lavouras de cana-de-açúcar pertencentes à usina Iracema do grupo São Matinho, localizadas na cidade de Iracemápolis/SP (Figura 4).

#### Iracemápolis/SP



#### Usina Iracema

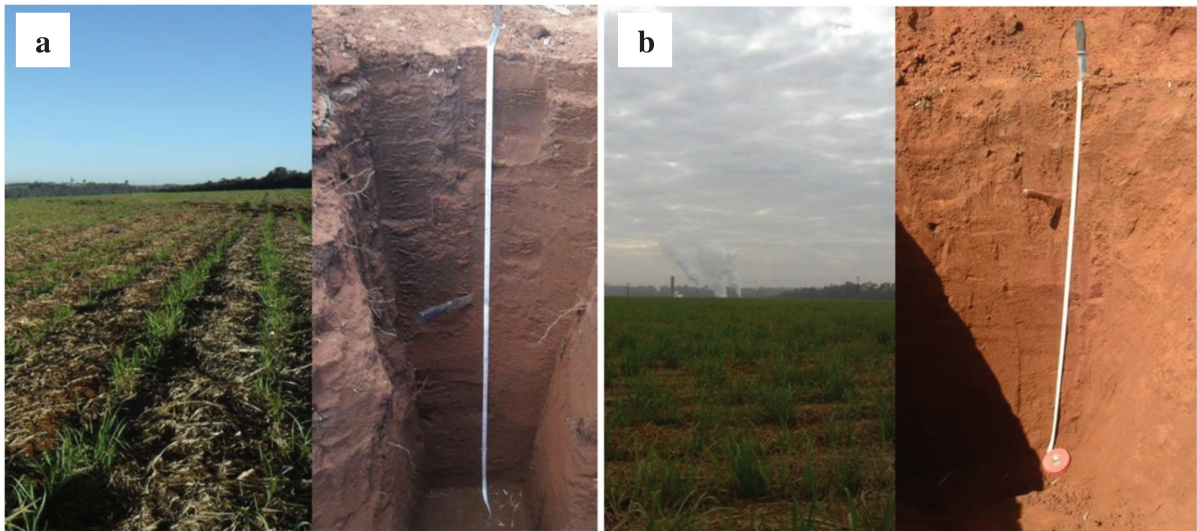


**Figura 4.** Usina Iracema do Grupo São Matinho onde foram realizados os estudos, em Iracemápolis/SP.

A área de estudo está localizada na depressão periférica do estado de São Paulo, especificamente em afloramentos de rochas máficas em relevo plano à suave ondulado. Foram selecionadas duas áreas para análise de perfis de solo até 1,0 m de profundidade, sendo área de colheita mecanizada da cana crua em 1º ciclo: 5 anos (área 1) e área de colheita mecanizada da cana crua em 2º ciclo: 10 anos (área 2).

Destaca-se que ambas as áreas recebem aplicações de vinhaça regularmente em área total, sendo que na área 1 é realizada a aplicação da vinhaça concentrada e na área de 2 a vinhaça é diluída em água residual de lavagens da cana, de equipamentos, sobras do processo, etc..

A área 1 (5 anos) mostrada na figura 5a localiza-se na fazenda São Pedro sob as coordenadas UTM 7489386,69 m à Norte e 244256,90 m à Leste e altitude de 571 m, em área de relevo suave ondulado. A área 2 mostrada na figura 5b está localizada na fazenda Aparecida sob as coordenadas UTM 7499849,62 m à Norte e 238736,70 m à Leste e altitude de 619,9 m, em relevo suave ondulado.



**Figura 5.** Áreas de cultivo de cana de açúcar e perfis estudadas. a: cana crua colhida mecanicamente há 5 anos (área 1); b: cana crua colhida mecanicamente há 10 anos (área 2).

Os anexos 1 e 2 apresentam a carta de solos das fazendas São Pedro e Aparecida, respectivamente, com indicação do local de abertura das trincheiras para estudo dos perfis. Conforme é demonstrado no anexo 2 o solo do local onde foi aberta a trincheira na área 2 foi mapeado como Latossolo Vermelho eutrófico (LVe), entretanto na análise química apresentada na tabela 16 a saturação por bases deste solo em todos os horizontes pedológicos é menor que 50%, logo, trata-se de uma inclusão de Latossolo Vermelho distrófico (LVd). O solo da área 1 foi mapeado como Latossolo Vermelho distrófico (LVd) conforme o anexo 1, comprovado pela análise química apresentada na tabela 8.

A escolha de representantes da ordem dos Latossolos se deve ao fato desta ser amplamente cultivada e representativa das áreas de produção e de expansão da cana-de-açúcar no estado de São Paulo. A esse respeito, o Centro de Tecnologia Canavieira (CTC), que já realizou o mapeamento de solos em mais de 1.800.000 ha no Centro – Sul do Brasil, verificou que em torno de 70% da área mapeada é de ocorrência de LATOSSOLOS, corroborando para a escolha desta classe taxonômica.

### **3.2. Delineamento experimental e coleta das amostras**

Para o estudo dos perfis de solo foi necessária a abertura de trincheiras de 1,5 m de comprimento x 1,0 m de largura x 1,40 m de profundidade, utilizando enxada, enxadão e pá-reta. Destaca-se que foi aberta uma trincheira em cada área, alocada de tal forma que o seu

comprimento fosse perpendicular à linha de plantio, permitindo que os perfis de solo fossem estudados nas entrelinhas de plantio, exatamente no centro da entrelinha (corredor).

Em cada trincheira definiram-se dois perfis: um perfil denominado experimental ( $P_e$ ), que foi amostrado de 2 cm em 2 cm até 100 cm de profundidade, perfazendo 50 amostras ( $n=50$ ) e, ao lado, na mesma parede, um perfil pedológico ( $P_p$ ), que foi subdividido em horizontes de acordo com os critérios genético-morfológicos empregados em Pedologia (SANTOS et al., 2013). A Figura 6a ilustra a trincheira e o posicionamento dos perfis experimental e pedológico, lado a lado. No perfil experimental foram coletadas amostras deformadas para determinação do COS e no perfil pedológico foram coletadas amostras deformadas e indeformadas em cada horizonte pedogenético. A tabela 1 relaciona as espessuras dos horizontes pedogenéticos dos perfis pedológicos das áreas 1 e 2, sendo  $P_{p1}$  (após 5 anos com colheita da cana crua) e  $P_{p2}$  (após 10 anos com colheita da cana crua).

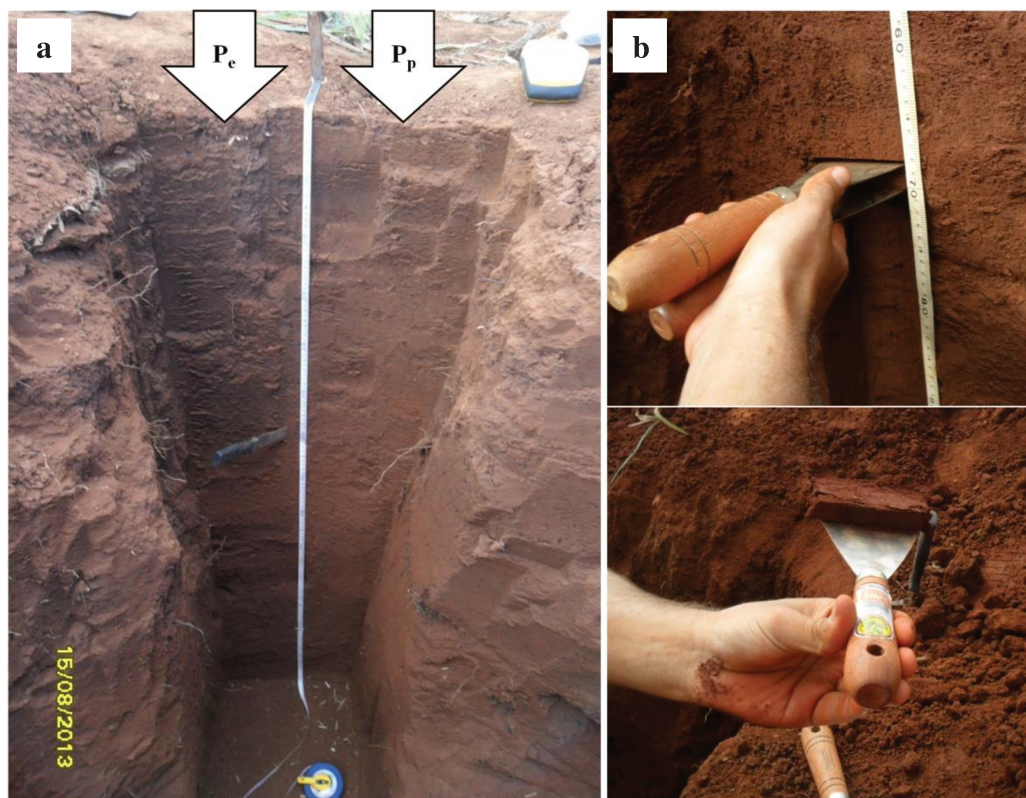
**Tabela 1.** Espessuras dos horizontes dos perfis pedológicos das áreas 1 (5 anos de colheita da cana crua) e 2 (10 anos de colheita da cana crua).

<b>P<sub>p1</sub> – 5 anos de colheita Mecanizada</b>		<b>P<sub>p2</sub> – 10 anos de colheita mecanizada</b>	
<b>Horizonte</b>	<b>Espessura cm</b>	<b>Horizonte</b>	<b>Espessura cm</b>
Ap1	0 a 23	Ap1	0 a 20
Ap2	23 a 40	Ap2	20 a 30
AB	40 a 50	BA	30 a 50
BA	50 a 65	Bw1	50 a 70
Bw	65 a 100+	Bw2	70 a 100+

As amostras com estrutura deformada foram empregadas nas análises de granulometria -  $G_r$ ; densidade de partículas -  $\rho_s$  e para a caracterização química de rotina do solo. As amostras indeformadas, coletadas utilizando-se um castelo, marreta de borracha e anéis de aço inox do tipo Koepeck de aproximadamente 5 cm de altura, foram utilizadas para determinação da densidade do solo ( $\rho$ ), macroporosidade ( $\alpha_{mac}$ ), água disponível ( $\theta_{disp}$ ) e água facilmente disponível ( $\theta_{fd}$ ). Essas amostras de solo foram coletadas exatamente no centro da camada (horizonte), sendo três anéis por horizonte, totalizando 15 amostras por perfil.

Para estimativa da variação “real” do COS em profundidade, no perfil experimental foram coletadas amostras deformadas a cada 2,0 cm (50 amostras por perfil). Estas coletas foram

realizadas de baixo para cima, ou seja, partindo-se da profundidade 100,0 cm em direção à superfície do solo (profundidade 0,0 cm) utilizando espátulas e martelo (Figura 6b).



**Figura 6.** a: Vista frontal da trincheira da área 1 com os perfis experimental ( $P_e$ ) e pedológico ( $P_p$ ) lado a lado; b: Detalhe da amostragem de solo para determinação do C de 2 em 2 cm no perfil experimental ( $P_e$ ).

### 3.3. Caracterização física dos solos

Para a caracterização física do solo dos perfis pedológicos foram determinadas a granulometria ( $G_r$ ), densidade do solo ( $\rho$ ), densidade das partículas ( $\rho_s$ ), porosidade total ( $\alpha$ ), macroporosidade ( $\alpha_{mac}$ ), microporosidade ( $\alpha_{mic}$ ), água disponível ( $\theta_{disp}$ ) e água facilmente disponível ( $\theta_{fd}$ ), conforme métodos e procedimentos descritos a seguir.

As análises granulométricas foram realizadas no Laboratório de Solos da FEAGRI/UNICAMP empregando-se o método da Pipeta modificado conforme descrito em DOURADO et al. (2012). Para determinação da densidade do solo ( $\rho$ ), as amostras com estrutura indeformada coletadas no anel de Koepeck foram levadas à estufa à 105°C até atingir peso constante (solo seco), conforme descrito em EMBRAPA (1997). A  $\rho$  foi calculada utilizando a equação 3.

$$\rho = \frac{M_s}{V} \quad (\text{Eq. 3})$$

Sendo:

$\rho$  = Densidade do solo ( $\text{kg dm}^{-3}$ );

$M_s$  = Massa do solo seco (kg);

$V$  = Volume de solo ( $\text{dm}^3$ ), que corresponde ao volume interno do anel de Koepeck utilizado na coleta das amostras.

A densidade de partículas ( $\rho_s$ ) foi determinada pelo método do balão volumétrico com álcool, conforme descrito por CAMARGO et al. (1986). A porosidade total ( $\alpha$ ) foi calculada pelo método indireto, conforme a equação 4.

$$\alpha = \left(1 - \frac{\rho}{\rho_s}\right) \quad (\text{Eq. 4})$$

Sendo:

$\alpha$  = porosidade total ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ );

$\rho$  = densidade do solo ( $\text{kg dm}^{-3}$ );

$\rho_s$  = densidade das partículas ( $\text{kg dm}^{-3}$ ).

Para a mensuração da macroporosidade do solo ( $\alpha_{\text{mac}}$ ), as amostras indeformadas foram saturadas e colocadas em painéis de pressão de Richards a 6,0 kPa. A diferença de peso da amostra saturada para a amostra submetida a esta pressão após 48 horas, dividida pelo volume total representa a macroporosidade do solo, conforme é mostrado na equação 5. A microporosidade do solo ( $\alpha_{\text{mic}}$ ) corresponde à diferença entre  $\alpha$  e  $\alpha_{\text{mac}}$  (Equação 6).

$$\alpha_{\text{mac}} = \frac{M_{\text{sat}} - M_{6\text{kPa}}}{V} \quad (\text{Eq. 5})$$

$$\alpha_{\text{mic}} = \alpha - \alpha_{\text{mac}} \quad (\text{Eq. 6})$$

Sendo:

$\alpha_{\text{mac}}$  = macroporosidade do solo ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ );

$M_{\text{sat}}$  = massa do solo saturado (g);

$M_{6\text{kPa}}$  = massa do solo após ser submetido à pressão de 6kPa (g);

$V$  = Volume do solo ( $\text{cm}^3$ );

$\alpha_{\text{mic}}$  = microporosidade do solo ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ );

$\alpha$  = Porosidade total do solo ( $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ).



A água disponível e água facilmente disponível foram mensuradas através de três pontos da curva de retenção de água no solo (10, 100 e 1500 kPa). Para tanto, calculou-se a umidade volumétrica do solo após submeter às amostras indeformadas às referidas pressões em painéis Richards com placas porosas específicas (RICHARDS, 1947). Depois de atingido o equilíbrio com a pressão aplicada, as amostras foram pesadas. Ao final do ensaio, levou-se as amostras à estufa à 105°C até atingir peso constante, para determinação da umidade volumétrica ( $\theta$ ).

Desta forma, a água disponível ( $\theta_{\text{disp}}$ ) foi calculada conforme metodologia de VAN LIER (2010), assumida como a água presente entre a capacidade de campo e o ponto de murcha permanente, conforme é demonstrado na equação 7.

$$\theta_{\text{disp}} = (\theta_{\text{cc}} - \theta_{\text{pmp}}) * 10 * E \quad (\text{Eq. 7})$$

Sendo:

$\theta_{\text{disp}}$  = água disponível (mm);

$\theta_{\text{cc}}$  = umidade volumétrica na capacidade de campo – 10 kPa ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ );

$\theta_{\text{pmp}}$  = umidade volumétrica no ponto de murcha permanente – 1500 kPa ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ );

E = espessura da camada do solo sob consideração (cm).

Pelo mesmo princípio determinou-se a água facilmente disponível ( $\theta_{\text{fd}}$ ), sendo a água compreendida entre a capacidade de campo e o conteúdo crítico de água, este último estabelecido neste trabalho como 100 kPa (Equação 8).

$$\theta_{\text{fd}} = (\theta_{\text{cc}} - \theta_{\text{cri}}) * 10 * E \quad (\text{Eq. 8})$$

Sendo:

$\theta_{\text{fd}}$  = água facilmente disponível (mm);

$\theta_{\text{cc}}$  = umidade volumétrica na capacidade de campo – 10 kPa ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ );

$\theta_{\text{cri}}$  = umidade volumétrica crítica – 100 kPa ( $\text{m}^3 \text{m}^{-3}$ );

E = espessura da camada do solo sob consideração (cm).

### 3.4. Caracterização química dos solos

Para caracterização química e de fertilidade do solo dos perfis pedológicos determinou-se a matéria Orgânica (MO), reação do solo (pH), a acidez potencial dada por Hidrogênio + Alumínio (H+Al), os teores de macronutrientes Fósforo (P), Potássio (K), Cálcio (Ca), Magnésio (Mg), a Capacidade de troca de cátions (CTC), a Soma de bases (SB) e a Saturação por bases (V%), conforme metodologias descritas em VAN RAIJ et al. (2001).



### **3.5. Determinação do carbono orgânico do solo (COS)**

Os teores de COS das amostras coletadas nos perfis experimentais - P<sub>e</sub> (n=50) foram determinados utilizando dois métodos, combustão seca empregando um analisador elementar (Truspec CN) e oxidação úmida pelo método Walkley-Black modificado por CANTARELLA et al. (2001).

Os teores de COS dos perfis pedológicos - P<sub>p</sub> (n=5) foram calculados a partir dos resultados de MO obtidos na caracterização química e de fertilidade do solo, dividindo o conteúdo de MO pelo fator de conversão 1,724 conforme recomendado em CANTARELLA et al. (2001).

Para a determinação do C do solo por via seca as amostras de solo foram secas em baixa temperatura (30°C), moídas em almofariz e passadas na totalidade pela peneira de 150 mesh. Posteriormente, 1 mg de terra da amostra foi colocada no recipiente de amostras do analisador elementar (Truspec CN), onde ocorre a combustão e conseqüentemente a transformação do C em CO<sub>2</sub> que é detectado por infravermelho próximo.

Para a determinação do COS por via úmida (Walkley-Black modificado por CANTARELLA et al., 2001), transferiu-se 1 cm<sup>3</sup> de terra para um frasco cilíndrico de 100 mL e em seguida, realizou-se uma prova em branco completa sem terra. Adicionou-se 10 mL da solução Na<sub>2</sub>Cr<sub>2</sub>O<sub>7</sub> em ácido sulfúrico e agitou-se por 10 minutos com movimento circular horizontal a aproximadamente 180 rpm (em agitador). Passados 60 minutos, foi adicionado 50 mL de água com jato forte para promover a mistura das soluções e deixou-se decantando por 12 horas. Passadas às 12 horas, o líquido sobrenadante foi transferido para cela de medida do colorímetro com filtro de transmissão máxima de 650 nm. O zero do aparelho foi acertado com a prova em branco completa. Então, os resultados foram calculados a partir da curva padrão preparada com solos analisados por Walkley Black.

#### **3.5.1. Cálculo do estoque de carbono do solo**

O estoque de carbono do solo (ECS) foi calculado conforme a equação 1, utilizando os teores de COS dos perfis pedológicos. Calculou-se o ECS para cada horizonte pedológico, para o perfil todo (0 a 100 cm) e para as camadas 0 a 30 cm e 30 a 100 cm.

### 3.5.2. Análises estatísticas

Os dados de COS obtidos a partir das amostras de 2 em 2 cm (n=50) foram organizados em esquema de sub-subparcela para análise estatística, sendo o fatorial 2 x 10 x 2 x 5, representando 2 áreas ou condições de colheita da cana crua (Áreas 1 e 2), 10 profundidades (0 a 10, 10 a 20, 20 a 30, 30 a 40, 40 a 50, 50 a 60, 60 a 70, 70 a 80, 80 a 90, 90 a 100), 2 métodos de determinação e 5 repetições (amostras de 2 cm coletadas dentro de cada espaçamento de 10 cm). Os dados foram submetidos à análise de variância e posteriormente as interações significativas submetidas ao teste de Tukey para comparação de médias com  $p < 0,05$  e  $p < 0,01$ .

Os resultados de COS (n=50) obtidos por via úmida e via seca também foram submetidos à análises de correlação e regressão linear para posterior obtenção do fator de correção. Para tanto, o COS determinado por oxidação úmida foi assumido como variável independente e os perfis experimentais  $P_{e1}$  e  $P_{e2}$  foram subdivididos em camadas, superficial (0-30 cm), intermediária (30-70 cm) e inferior (70-100 cm) devido aos diferentes conteúdos de COS influenciarem os resultados e fornecerem fatores de correção distintos, conforme destacado por GATTO et al. (2009). Esse fator de correção foi calculado com o objetivo futuro de aproveitar dados já publicados em levantamentos pedológicos, em geral determinados por via úmida.

A partir dos dados de COS dos horizontes pedológicos dos perfis pedológicos (n=5) e das camadas de 2 em 2 cm dos perfis experimentais (n=50) realizou-se a modelagem do COS em profundidade utilizando a função *spline quadrática de igual área*, conforme descrito a seguir.

Os dados foram avaliados estatisticamente utilizando-se o *Software Assistat 7.6 beta* (SILVA e AZEVEDO, 2009).

### 3.6. Modelagem do C em profundidade no solo

Uma importante etapa deste trabalho consistiu em ajustar os procedimentos descritos por MALONE et al. (2009) na abordagem da função *spline quadrática de igual área*, visto terem sido observadas algumas inconsistências no texto daqueles autores. No tópico 3.7.1 a seguir é apresentada a fundamentação teórica dessa função. O algoritmo para rodar o modelo foi implementado no software MATLAB<sup>®</sup>, assim como as rotinas para gerar as curvas da variação do COS em profundidade e para determinar o conteúdo de COS em uma dada profundidade desejada a partir das curvas ajustadas pela função *spline*.

A validação da função *Spline quadrática de igual área* para a aplicação desenvolvida, deu-se a partir dos seguintes procedimentos:

- a) As curvas do COS em profundidade ajustadas aos perfis pedológicos, construídas, portanto, a partir de um pequeno número de valores (n=5), foram comparadas com as curvas ajustadas aos perfis experimentais (n=50), assumidas como sendo as que descrevem as condições “reais” de variação do carbono em profundidade no solo;
- b) Valores de COS em amostras independentes (medidos) foram comparados aos valores estimados pelo modelo ajustado ao perfil pedológico (n=5).

As comparações foram feitas por meio de regressão e correlação linear entre dados reais/medidos e preditos. Calculou-se ainda a raiz do erro quadrado médio, ou erro padrão conforme a equação 9.

$$e = \sqrt{\frac{\sum(\text{COS}_{\text{med.}} - \text{COS}_{\text{ped.}})^2}{n}} \quad (\text{Eq. 9})$$

Sendo:

$e$  = Erro padrão;

$\text{COS}_{\text{med.}}$  = COS medido ou extraído do perfil experimental ( $\text{g kg}^{-1}$ );

$\text{COS}_{\text{ped.}}$  = COS extraído do perfil pedológico (predito) ( $\text{g kg}^{-1}$ );

$n$  = número de valores sob consideração.

### 3.6.1. Fundamentação teórica da função *spline quadrática de igual área*

A teoria descrita abaixo<sup>2</sup> foi adaptada do trabalho apresentado originalmente por MALONE et al. (2009).

---

<sup>2</sup> Créditos pela descrição da teoria: Professora ANAMARIA GOMIDE, Instituto de Computação, UNICAMP.

# Modelagem matemática

## Polinômios

Nesta seção vamos demonstrar dois resultados sobre polinômios que serão usados nas seção (3)

**Teorema 2.1:** Seja  $p(x) = a(x-t)^2 + b(x-t) + c$  um polinômio no intervalo  $[t, u]$ , então

$$p(x) = \bar{p} - \frac{p'(u) + 2p'(t)}{6}(u-t) + p'(t)(x-t) + \frac{p'(u) - p'(t)}{2(u-t)}(x-t)^2$$

onde  $p'(t)$ ,  $p'(u)$  são as derivadas de  $p(x)$  nos pontos  $t$  e  $u$   $\bar{p} = \frac{1}{(u-t)} \int_t^u p(x) dx$ .

**Prova:**

Seja  $p(x) = a(x-t)^2 + b(x-t) + c$  então a  $\bar{p} = \frac{1}{(u-t)} \int_t^u p(x) dx = \frac{1}{(u-t)} \int_0^{u-t} p(s) ds$  onde  $s = x - t$ . Assim

$$\bar{p} = c + b(x-t)/2 + a(x-t)^2/2$$

Por outro lado  $p'(x) = b + 2a(x-t)$  então  $p'(u) = b + 2a(u-t)$  e  $p'(t) = b$ . Dessas duas equações encontramos  $a = (p'(u) - p'(t))/2(u-t)$ . Substituindo esses valores na equação (2) encontramos  $c = \bar{p} - \frac{(p'(u)+2p'(t))}{6}(u-t)$ .

Portanto

$$p(x) = \bar{p} - \frac{p'(u) + 2p'(t)}{6}(u-t) + p'(t)(x-t) + \frac{p'(u) - p'(t)}{2(u-t)}(x-t)^2$$

**Fim.**

**Teorema 2.2:** Seja  $l(x)$  uma função linear. Então

$$\int_t^u (l(x))^2 dx = \frac{u-t}{3}(l(u)^2 + l(u)l(t) + l(t)^2)$$

**Prova:**

Seja  $l(x) = ax + b$  então  $l(x)^2 = (ax + b)^2 = a^2x^2 + 2abx + b^2$ . Logo

$$\int_t^u (l(x))^2 dx = \int_t^u (a^2x^2 + 2abx + b^2) dx = \frac{u-t}{3}(l(u)^2 + l(u)l(t) + l(t)^2)$$

**Fim.**

## Aproximando médias intervalares por spline

Sejam  $y_i$  os valores médios de uma função desconhecida  $f$ , nos intervalos  $[x_i, x_{i+1}]$  para  $i = 0 \dots n - 1$ . Matematicamente as medidas  $y_i$  são modeladas como  $y_i = \bar{f}_{i-1} + e_{i-1}$ , onde  $\bar{f}_i = (\int_{x_i}^{x_{i+1}} f(x) dx) / (x_{i+1} - x_i)$ ,  $i = 0 \dots n - 1$  é o valor médio de  $f(x)$  no intervalo  $[x_i, x_{i+1}]$ ; e cada  $e_i$  é o erro de medida em  $y_i$ . Queremos determinar uma função matemática  $s$  que melhor representa  $f$ , levando em conta os dados  $y_i$ .

Uma das formas de solucionar esse problema é encontrar uma função  $s$  que minimiza o funcional

$$L(s) = \frac{1}{n} \sum_{i=0}^{n-1} (y_i - \bar{f}_i)^2 + \lambda \int_{x_0}^{x_n} (s'(x))^2 dx \quad (1)$$

. O primeiro termo representa a fidelidade aos dados e o segundo a irregularidade da função  $s$ . O parâmetro  $\lambda$  controla a prioridade relativa entre esses termos, fidelidade e irregularidade. A escolha desse parâmetro não é uma questão simples e para efeito da dedução de  $s$  vamos considerá-lo conhecido.

Pode-se provar que a função que minimiza o funcional (1) é um spline quadrático de classe  $C_1$ . Isto significa que a função  $s$  é derivável com derivada contínua e coincide com um polinômio de grau 2 em cada intervalo. Ou seja  $s(x) = p_i(x)$  para  $x_i \leq x \leq x_{i+1}$ , onde  $p_i(x) = A_{i,0} + A_{i,1}x + A_{i,2}x^2$  para  $i = 0 \dots n - 1$ .

As condições de continuidade, suavidade são respectivamente

- $p_i(x_i) = p_{i+1}(x_i)$
- $p'_i(x_i) = p'_{i+1}(x_i)$

para  $i = 1 \dots n - 1$ . Como é de praxe nesta aplicação, vamos supor as condições de contorno  $p'_1(x_0) = p'_n(x_n) = 0$ .

Vamos denotar a derivada de  $s$  em cada ponto  $x_i$ , isto é,  $b_i = s'(x_i) = p'_i(x_i) = p'_{i+1}(x_i)$  para  $i = 1 \dots n - 1$ ,  $b_0 = p'_0(x_0) = 0$ , e  $b_n = p'_n(x_n)$ . Usando estas definições e o teorema (2.1) encontramos, para  $i = 1 \dots n - 1$ , as seguintes equações:

$$b_{i-1}(x_i - x_{i-1}) + 2b_i(x_{i+1} - x_{i-1}) + b_{i+1}(x_{i+1} - x_i) = 6(\bar{f}_i - \bar{f}_{i-1})$$

para  $i = 1, 2, \dots, n - 1$ .

Colocando essas equações em forma matricial obtemos :

$$R\hat{B} = 6Q\bar{S} \quad (2)$$

onde

- $R$  é uma matriz  $(n - 1) \times (n - 1)$  tridiagonal simétrica com  $R_{i,i} = 2(x_{i+2} - x_i)$  e  $R_{i+1,i} = R_{i,i+1} = (x_{i+2} - x_{i+1})$  para  $i = 0, 1, \dots, n - 1$ ;
- $Q$  uma matriz  $(n - 1) \times n$  com  $Q_{i,i} = -1$ ,  $Q_{i,i+1} = 1$  e  $Q_{i,j} = 0$  caso contrário, para  $i = 0, 1, \dots, n - 2$  e  $j = 0, 1, \dots, n - 1$ ;
- $\hat{B}$  vetor coluna de  $n - 1$  elementos, com  $\hat{B}_i = b_{i+1}$ ,  $i = 0 \dots n - 2$ ;

- $\bar{S}$  vetor coluna de  $n$  elementos com  $\bar{S}_i = \bar{s}_i, i = 0 \dots n - 1$ .

Como  $s$  é um spline quadrático de classe  $C_1$  temos que  $s'(x)$  é uma função linear em cada intervalo. Então, pelo teorema (2.2), temos

$$\int_{x_0}^{x_n} (s'(x))^2 dx = \sum_{i=0}^{n-1} \frac{x_i + 1 - x_i}{3} (b_i^2 + b_i b_{i+1} + b_{i+1}^2)$$

Escrevendo essa equação na forma matricial temos

$$\int_{x_0}^{x_n} (s'(x))^2 dx = \frac{1}{6} B^T R B$$

onde  $B$  é o vetor de  $n+1$  elementos com  $B_i = b_i, i = 0 \dots n$ . Note que  $\hat{B}$  é vetor  $B$  menos o primeiro e o último elemento, com os demais elementos renumerados de acordo.

A fórmula (1) também pode ser colocada na forma matricial obtendo:

$$\frac{1}{n} (Y - \bar{S})^T (Y - \bar{S}) + \frac{\lambda}{6} B^T R B \quad (3)$$

onde  $Y$  é o vetor coluna de  $n$  elementos com  $Y_i = y_i$  para  $i = 0 \dots n - 1$ .

Da equação (2) temos  $\hat{B} = 6R^{-1}Q\bar{S}$  e assim obtemos o vetor  $B$  que colocado na fórmula (3) obtemos

$$\frac{1}{n} (Y - \bar{S})^T (Y - \bar{S}) + \frac{\lambda}{6} (6R^{-1}Q\bar{S})^T R (6R^{-1}Q\bar{S}) \quad (4)$$

Simplificando temos

$$\frac{1}{n} (Y^T Y) - \frac{2}{n} (Y^T \bar{S}) + \bar{S}^T \left( \frac{1}{n} I_n + 6\lambda (Q^T (R^{-1})^T Q) \right) \bar{S}$$

onde  $I_n$  é a matriz identidade de ordem  $n$ .

Para minimizar essa fórmula devemos derivar com relação às incógnitas  $\bar{s}_i$  e igualar a zero obtendo a seguinte equação matricial

$$(I_n + 6n\lambda(Q^T (R^{-1})^T Q))\bar{S} = Y$$

Resolvendo esse sistema encontramos o vetor  $\bar{S}$ . Para achar o vetor  $B$  usamos equação matricial  $B = 6R^{-1}Q\bar{S}$ . Com esses valores podemos achar a matriz  $A$  dos coeficientes dos polinômios  $p_i(x)$ .

Seja  $p_i(x) = A_{i,0} + A_{i,1}x + A_{i,2}x^2$  para  $i = 0 \dots n - 1$  então pelo teorema 2.1 podemos escrever

$$p_i(x) = \bar{s}_i - \frac{(b_{i+1} + 2b_i)}{6} (x_{i+1} - x_i) + b_i (x_{i+1} - x_i) + \frac{(b_{i+1} - b_i)}{2(x_{i+1} - x_i)} (x - x_i)^2$$

para  $i = 0 \dots n - 1$ . Com alguns cálculos podemos encontrar os coeficientes  $A_{i,0}, A_{i,1}$  e  $A_{i,2}$ :

$$A_{i,0} = \bar{s}_i - \frac{(b_{i+1} + 2b_i)}{6} (x_{i+1} - x_i) - b_i x_i + \frac{(b_{i+1} - b_i)}{2(x_{i+1} - x_i)} x_i^2 \quad (5)$$

$$A_{i,1} = \frac{b_i x_{i+1} - b_{i+1} x_i}{x_{i+1} - x_i} \quad (6)$$

$$A_{i,2} = \frac{b_{i+1} - b_i}{2(x_{i+1} - x_i)} \quad (7)$$

## Algoritmo

O algoritmo seguinte é para a linguagem C

**Algoritmo 1** *Recebe: Extremos  $x_0, x_1, \dots, x_n$  ( $n \geq 2$ ) dos intervalos, o vetor  $Y$  ( $n \times 1$ ) com os valores médios experimentais  $y_1, y_2, \dots, y_n$ , e o parâmetro  $\lambda > 0$ .*

*Devolve: A matriz  $A$  ( $n \times 3$ ) com os coeficientes dos polinômios  $p_1, p_2, \dots, p_n$  que compõem o spline  $s$*

1. Monte a matriz  $R$  ( $(n-1) \times (n-1)$ ).
2. Monte a matriz  $Q$  ( $(n-1) \times n$ ).
3. Calcule  $M = R^{-1}$ .
4. Calcule  $C = Q^T M^T Q$  ( $n \times n$ ).
5. Calcule  $D = I_n + 6n\lambda C$  ( $n \times n$ ).
6. Resolva o sistema  $D\bar{S} = Y$  obtendo  $\bar{S}$  ( $1 \times n$ ).
7. Calcule  $\hat{B} = 6MQ\bar{S}$  ( $(n-1) \times 1$ ).
8. Construa o vetor  $B$  ( $(n+1) \times 1$ ) que é  $\hat{B}$  com  $b_0 = 0$  inserido no início e  $b_n = 0$  no fim.
9. Calcule os coeficientes  $A_{i,j}$  dos polinômios, para  $i = 0 \dots n-1$  e  $j = 0, 1, 2$ , pelas fórmulas (5–7).

A matriz  $C$  no passo 4 pode ser calculada por

$$C_{i,j} = \sum_{r=0}^{n-2} \sum_{s=0}^{n-2} Q_{r,i} M_{s,r} Q_{s,j} \quad (8)$$

para  $i, j = 0 \dots n-1$ .





## 4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Neste capítulo são apresentados e discutidos os resultados das análises para caracterização física e química dos solos dos perfis pedológicos, os dados de carbono orgânico do solo em profundidade dos perfis experimentais (n=50 para cada perfil), os cálculos do estoque de carbono do solo nas diferentes situações analisadas e os modelos gerados com a função *spline quadrática de igual área* permitindo estimar o teor de COS em qualquer profundidade de interesse até 100 cm.

### 4.1. Função *Spline quadrática de igual área* e a modelagem do COS em profundidade

Um importante fruto deste trabalho foi o desenvolvimento teórico do modelo a partir do trabalho de MALONE et al. (2009) e sua implementação para uso no MATLAB<sup>®</sup>. A rotina<sup>3</sup> resultante deste esforço está apresentada na íntegra no apêndice, entretanto, aqui se destacam as modificações mais importantes e rotinas inéditas adaptadas ao modelo visando-se extrair os dados de COS de qualquer profundidade desejada da curva modelada, bem como a geração dos gráficos após o ajuste.

#### 4.1.1. Rotina para gerar os gráficos

Esta rotina foi criada para gerar os gráficos de COS modelado em função da profundidade do solo para tornar mais visual os resultados, bem como permitir o entendimento e comparação da conformação e sinuosidade das curvas apresentadas nas figuras 13, 14, 20, 21, 31.

```
%Inicializar coeficientes com valores do primeiro polinômio:
A = coef(1,3);
B = coef(1,2);
C = coef(1,1);
Yj = Y(1);
%Iniciliza contadores:
i=1;
j=1;
%Inicializa matrizes:
y(106)=0;
x(106)=0;
conferencia(106,3)=0;

for ix=0:0.1:X(n+1)
    if ix>X(i+1)
        i=i+1;    %Incrementa i (passa para o próximo intervalo
```

---

<sup>3</sup> Desenvolvimento e implementação das rotinas com a ajuda indispensável do Eng. Agrícola Augusto Nalin, Faculdade de Engenharia Agrícola UNICAMP.

```

        A = coef(i,3);    %Carrega os coeficientes do próximo intervalo
        B = coef(i,2);
        C = coef(i,1);
        Yj = Y(i);
    end

    y(j)=A*ix^2+B*ix+C; %Calcula valor da função y no ponto x
    x(j)=ix;           %Guarda respectivo valor de x
    conferencia(j,1)=A; %Matriz para conferência dos valores dos
coeficientes
    conferencia(j,2)=B;
    conferencia(j,3)=C;
    y_med(j)=Yj;      %Guarda o valor médio do horizonte no respectivo
valor de x
    j=j+1;
end

figure();           %Cria nova figura
hold on            %Indica que a nova figura como ativa, que irá receber os
comandos.
plot(y,-x,'o');    %Desenha o gráfico dos valores de y em função de x com o
marcador 'o' azul.
ylabel('Profundidade (cm)'); %Legenda do eixo x
xlabel('Carbono Orgânico (g kg-1)'); %Legenda do eixo y
title(horzcat('Lambda ',num2str(lambda))); %Título da figura - escreve o
valor de lambda
if (isempty(who('ptos_experimentais')))
    disp('ptos_experimentais não carregado - não adicionado à figura');
else
    plot(ptos_experimentais(:,2),-ptos_experimentais(:,1),'*r'); %Desenha
o gráfico dos
end
%valores pontuais coletados experimentalmente com o marcador '*'
%vermelho

lambda=lambda/10; %Atualiza valor de lambda

```

#### 4.1.2. Rotina para o cálculo do erro em função de pontos externos (medidos) e obtenção de pontos preditos

Esta rotina foi criada para testar a qualidade do ajuste. Através dela, foi possível extrair valores das curvas simuladas nas profundidades desejadas e calcular o erro entre os dados de COS medidos e preditos conforme apresentado nas figuras 16 e 23 e tabelas 12 e 20.

```

valid = zeros(length(medida_ext),3); %Inicializa matriz de erro de validação
com dados externos

largura_ptos = (max(medida_ext(:,1))-min(medida_ext(:,1)))/length(medida_ext);
% Distância física entre os pontos no conjunto de dados experimentais [cm]
% Para o resultado da coluna 4 da matriz valid ser coerente, os pontos
% experimentais devem ser uniformemente espaçados (incremento de

```

```

% profundidade constante).

for i=1:length(medida_ext)

    k = busca(X,medida_ext(i,1));
    valid(i,1) =
coef(k,1)+coef(k,2)*medida_ext(i,1)+coef(k,3)*medida_ext(i,1)^2;           %Valor
calculado pela spline de treinamento (simulado)
    valid(i,2) = valid(i,1) - medida_ext(i,2); % Diferença entre o simulado
menos o medido
    valid(i,3) = valid(i,2)/medida_ext(i,2);           %Razão da diferença pelo
medido.
    valid(i,4) = valid(i,3)*largura_ptos;           %Área do intervalo de cada
ponto amostrado
end

```

### 4.1.3. Rotina para calcular a diferença entre dois perfis modelados e extrair atributos de ambos na profundidade desejada

Esta rotina permite comparar duas curvas modeladas, extraindo valores em profundidades pré-determinadas para posterior análise de regressão, correlação linear e cálculo do erro padrão. A partir desta rotina foram extraídos os dados que compõem as figuras 15 e 22 e as tabelas 11 e 19.

```

load('Spline01.mat'); %Matrix de Valor real
load('Spline02.mat'); %Matrix de Valor estimado

% No arquivo Spline01 deve conter:
% X1: limites das camadas da spline01
% coef1: coeficientes da spline 01

% No arquivo Spline02 deve conter:
% X2: limites das camadas da spline02
% coef2: coeficientes da spline 02

dx = 0.1; % Largura do diferencial de profundidade, em cm.

Nel = (max(X1)-min(X1))/dx;

idx = min(X1);

valores(Nel,5)=0;

for i=1:Nel

    valores(i,1) = idx;           %Profundidade

    k1 = busca(X1,idx);
    valores(i,2) = coef1(k1,1)+coef1(k1,2)*idx+coef1(k1,3)*idx^2;           %Valor
calculado da spline01 na posição idx

```

```

    k2 = busca(X2,idx);
    valores(i,3) = coef2(k2,1)+coef2(k2,2)*idx+coef2(k2,3)*idx^2;           %Valor
calculado da spline02 na posição idx

    valores(i,4) = valores(i,3)-valores(i,2);           %Estimado - real

    valores(i,5) = valores(i,4)/valores(i,2);           %(estimado - real)/real

    valores(i,6) = valores(i,4)*dx;           %Área do erro entre as curvas vezes o
diferencial de profundidade

    idx = idx + dx;           %Incrementa referencial de comprimento

end

disp('Soma da área do erro');
sum(valores(:,6))

disp('Soma da área do erro absoluto');
sum(abs(valores(:,6)))

```

A partir das rotinas acima apresentadas e do apêndice foi desenvolvido um estudo de caso para a cultura da cana-de-açúcar com o objetivo de estudar a influencia do tempo de adoção da colheita mecanizada da cana crua na conservação do carbono no solo.

## 4.2. Estudo de caso na cultura da cana de açúcar

A função *spline de igual área* apresentada e implementada no MATLAB foi empregada para descrever a variação do COS em profundidade em duas áreas de Latossolo Vermelho Distrófico, textura argilosa, cultivadas com cana-de-açúcar. Em uma delas, referida por Área 1, a cultura tem sido colhida mecanicamente sem queima (cana crua) há 5 anos e na outra (Área 2) há 10 anos.

### 4.2.1. Caracterização do COS em profundidade nos perfis experimentais

A primeira pergunta a ser respondida foi definir que fatores influenciavam significativamente a variação do COS dos perfis experimentais, reconhecendo-se as fontes de variação como sendo o tempo de adoção da colheita da cana crua, a profundidade do solo e o método de determinação do carbono. A análise de variância dos valores de COS indicou que há diferenças significativas pelo teste F, nível de 1% de probabilidade ( $p < 0,01$ ) para todos esses fatores e também para todas suas interações, conforme pode ser observado na tabela 2.

**Tabela 2.** Análise de variância e teste F ( $p < 0,01$ ) para os dados de COS<sup>4</sup>.

Fonte de Variação	GL	SQ	QM	F <sub>tab.</sub>	F
<b>Tempo de adoção da colheita mecanizada da cana crua (T)</b>	01	1377,65742	1377,65742	11,2586	199,4623 **
<b>Resíduo</b>	08	55,25485	6,90686		
<b>Parcelas</b>	09	1432,91227			
<b>Profundidade (P)</b>	09	2821,37758	313,48640	2,6652	144,0738 **
<b>Interação: T x P</b>	09	271,88698	30,20966	2,6652	13,8839 **
<b>Resíduo</b>	72	156,66291	2,17587		
<b>Subparcelas</b>	99	4682,83974			
<b>Método de determinação (M)</b>	01	3846,01642	3846,01642	6,964	7575,8016 **
<b>Interação: T x M</b>	01	131,94850	131,94850	6,964	259,9094 **
<b>Interação: T x M</b>	09	104,26468	11,58496	2,6385	22,8198 **
<b>Interação: T x P x M</b>	09	44,35501	4,92833	2,6385	9,7077 **
<b>Resíduo</b>	80	40,61370	0,50767		
<b>Total</b>	199	8850,03805			

\*\* significativo ao nível de 1% de probabilidade ( $p < 0,01$ ).

A comparação entre os valores médios do COS para os três fatores pelo teste de Tukey ( $p < 0,01$ ) consta da tabela 3. Na área 1, com cana crua colhida mecanicamente há 5 anos (P<sub>e1</sub>), o teor médio de COS até 1 m de profundidade (20,36 g kg<sup>-1</sup>) é superior quando comparado com o da área 2, com cana crua colhida mecanicamente há 10 anos (P<sub>e2</sub>), cujo teor médio de COS em profundidade é 15,11 g kg<sup>-1</sup>, sendo esta diferença significativa estatisticamente (Figura 7).

<sup>4</sup> GL = graus de liberdade; SQ = soma de quadrado; QM = quadrado médio; F<sub>tab.</sub> = F tabelado; F = estatística do teste F; CV% = coeficiente de variação em %; dms = diferença mínima significativa.

**Tabela 3.** Valores médios de COS ( $\text{g kg}^{-1}$ ) e teste de Tukey ( $p < 0,01$ ) realizado.

<b>Perfil Experimental (n=50)</b>	<b>Média</b>	<b>DMS</b>	<b>CV (%)</b>
Área 1 - 05 anos (cana crua)	20,35934 a	0,8568	14,82
Área 2 - 10 anos (cana crua)	15,11023 b		

<b>Profundidade (cm)</b>	<b>Média</b>	<b>DMS</b>	<b>CV (%)</b>
0-10	24,25404 a	1,5239	8,32
10-20	23,34334 a		
20-30	20,01105 b		
30-40	19,45261 bc		
40-50	18,06110 c		
50-60	16,06365 d		
60-70	14,79906 de		
70-80	14,27337 ef		
80-90	13,97478 ef		
90-100	13,11489 f		

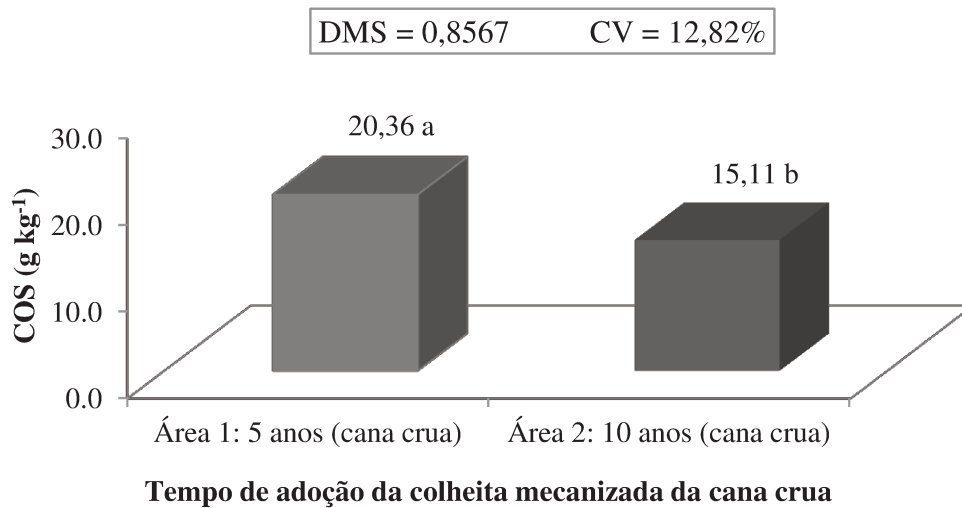
  

<b>Método</b>	<b>Média</b>	<b>DMS</b>	<b>CV (%)</b>
Via Úmida	13,34958 b	0,2006	4,02
Via Seca	22,12000 a		

Médias seguidas pela mesma letra na coluna não diferem estatisticamente entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,01$ ).

Tratando-se do mesmo tipo de solo ocorrendo nas áreas 1 e 2, esperava-se com base na literatura estudada que o tempo de adoção da colheita mecanizada da cana crua contribuísse para o aporte de carbono no sistema, devido à erradicação da queima e manutenção da palha na superfície do solo, conforme comprovado por WOOD (1991), VILLEGAS et al. (1998), BLAIR (2000), DOMINY et al. (2002), GRAHAM et al. (2002), NOBLE et al. (2003), SOUZA et al. (2005), CANELLAS et al. (2007) e LUCA et al. (2008).

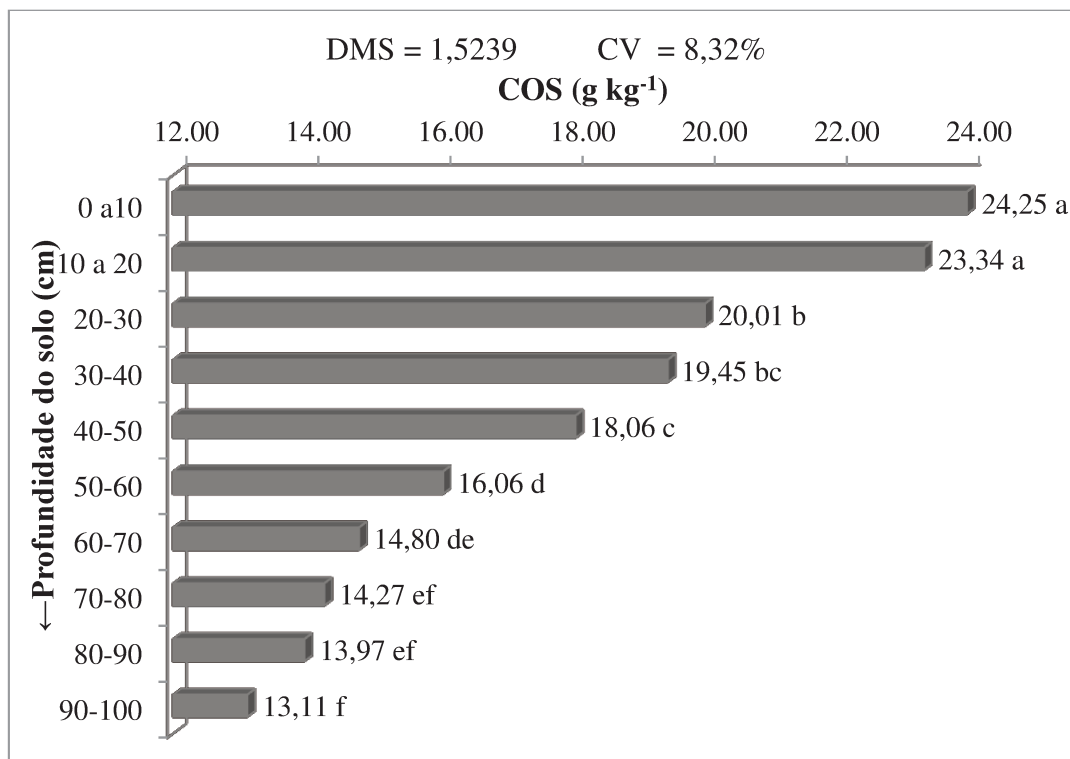
Consultando dados disponíveis acerca do manejo da cultura, observou-se que ambas as áreas receberam vinhaça regularmente, mas o maior conteúdo de COS na área 1 (após 5 anos de colheita da cana crua) pode estar relacionado com a forma de aplicação da vinhaça, que foi aplicada concentrada neste caso. Já na área 2 (após 10 anos de colheita da cana crua) a vinhaça foi aplicada diluída em água residual de lavagens da cana, equipamentos, etc., possuindo portanto menor concentração de C e N. No entanto, o modo de aplicação da vinhaça não se constituiu em fator de análise da pesquisa e o efeito suposto não pode ser testado. De todo modo, os resultados não permitem comprovar a hipótese de que o tempo de manejo da cana crua favorece a conservação do COS do sistema.



**Figura 7.** Média dos valores de COS para 5 e 10 anos de colheita mecanizada da cana crua.

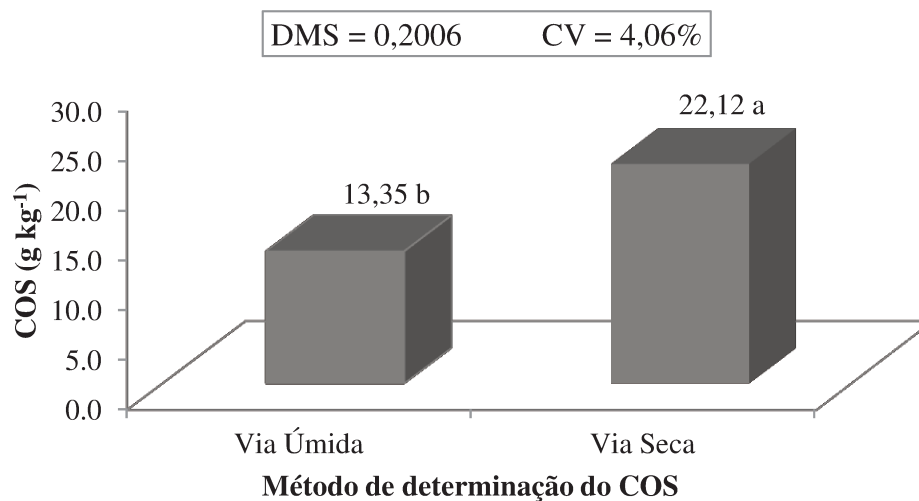
A análise do efeito da profundidade do solo na conservação do COS mostrou que os maiores teores médio foram observados nas camadas superficiais 0 a 10 cm (25,25 g kg<sup>-1</sup>) e 10 a 20 cm (23,34), que não diferem entre si pelo teste de Tukey ( $p < 0,01$ ), mas sim em relação a todos os demais valores de COS. Os menores valores de COS ocorreram, como esperado, nas maiores profundidades, sendo que a partir de 80 cm os teores de COS, de 14,27 g kg<sup>-1</sup> (70-80 cm), 13,97 g kg<sup>-1</sup> (80-90 cm) e de 13,11 g kg<sup>-1</sup> (90-100 cm), não diferem entre si, porém diferem estatisticamente das demais camadas ( $p < 0,01$ ). Valores intermediários de COS foram apresentados nas camadas compreendidas entre 20 e 70 cm, mantendo constante, porém não linear, o decréscimo do COS em profundidade (Tabela 3, Figura 8).

Tais resultados corroboram com os apresentados por PONCE-HERNANDEZ et al., (1986); BISHOP et al. (1999); MCBRATNEY et al. (2003); HIEDERER (2009); CAMBULE et al. (2013); SULAEMAN et al. (2013) e LACOSTE et al. (2014).



**Figura 8.** Média dos valores de COS em profundidade (camadas de 10 em 10 cm).

Também ocorreu diferença significativa ( $p < 0,01$ ) entre os métodos de determinação do COS. (Tabela 3 e Figura 9). O método de combustão por via seca apresentou valor médio ( $22,12 \text{ g kg}^{-1}$ ) superior ao determinado pelo método de oxidação por via úmida ( $13,35 \text{ g kg}^{-1}$ ), configurando uma relação via seca/via úmida igual a 1,65.



**Figura 9.** Média dos valores de COS analisados por via úmida e via seca.



Pelo método de oxidação por via úmida apenas parte do carbono orgânico é efetivamente determinada, enquanto que no método por via seca todas as formas de carbono são extraídas, sendo esperado, portanto, valores superiores nesse último caso. A esse respeito, SILVA et al. (1999) concluíram que o método Walkley-Black, adotado pelos laboratórios do Brasil, subestima os teores de matéria orgânica do solo (e conseqüentemente os de carbono orgânico), atribuindo à presença de frações orgânicas resistentes, tais como a humina, cuja oxidação pelo dicromato é dificultada. GATTO et al. (2009) e MCCARTY et al. (2010) também observaram que em relação ao método de referência (analisador elementar) o método baseado na digestão úmida subestimou os teores de carbono orgânico.

SATO (2013) estudando solos com textura de média a muito argilosa de diferentes classes e formas de uso no Cerrado observou que os maiores teores de carbono orgânico ocorreram quando a determinação foi realizada por via seca, sendo a relação via seca/via úmida igual a 1,49. Os resultados corroboram ainda com SCHUMACHER (2002), quando descreveu que o método de Walkley-Black apesar de ser amplamente utilizado nos laboratórios do Brasil, é passível de críticas principalmente por não promover a oxidação completa de COS, estimando em apenas 76% em média a recuperação de COS usando esse procedimento.

A tabela 4 relaciona os coeficientes de entre métodos de determinação para quatro faixas de profundidade do solo. A correlação dos resultados de COS determinados por via úmida e por via seca considerando toda a profundidade analisada de solo (0-100 cm) determinou coeficiente de correlação (r) igual a 0,9619 (correlação linear significativa,  $p < 0,01$  pelo teste t). Estes resultados corroboram com os resultados obtidos por GATTO et al. (2009), quando em Latossolo obtiveram correlação linear significativa ( $p < 0,01$ ) em seus dados de COS determinados por via úmida e via seca, com coeficiente de correlação (r) igual a 0,955.

No entanto, conforme pode ser observada na tabela 4, a maior correlação ocorreu entre os métodos na profundidade intermediária (30-70 cm), sendo o  $r = 0,9735$ , justamente onde o teor de COS médio também é intermediário. Os resultados sugerem que existe maior correlação entre os métodos quando o teor de COS não é muito elevado nem muito baixo, visto as menores correlações terem ocorrido próximo à superfície (maiores teores de COS,  $r = 0,9080$ ) e em profundidade, abaixo de 70 cm ( $r = 0,8179$ ). Resultados similares, porém com menor variância foram obtidos por GATTO et al. (2009), quando em seu trabalho obtiveram coeficientes de

correlação entre os mesmos métodos de 0,972, 0,976 e 0,951 respectivamente para as camadas superficial, intermediária e inferior em seus solos.

**Tabela 4.** Coeficientes de Correlação (r) entre os dados de COS determinados por via úmida e via seca.

Camada	Profundidade cm	Coeficiente de correlação (r)	Significância
Superficial	0 – 30	0,9080	(p < 0,01)
Intermediária	30 – 70	0,9735	(p < 0,01)
Inferior	70-100	0,8179	(p < 0,01)
Total	0-100	0,9619	(p < 0,01)

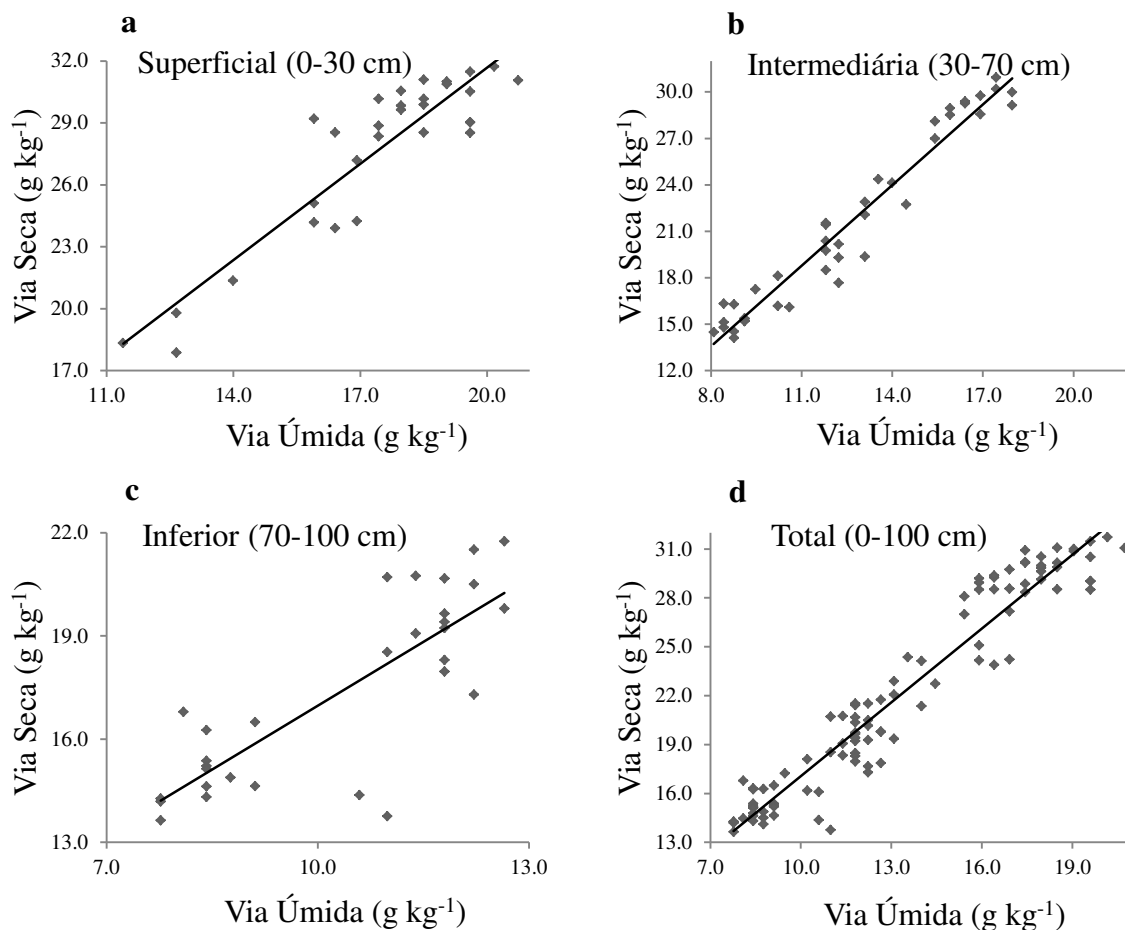
Na comparação dos métodos, a figura 10 apresenta os gráficos de dispersão dos teores de COS determinados por via úmida e por via seca e a tabela 5 apresenta as equações de regressão, os coeficientes de determinação e os fatores de correção entre os dois métodos avaliados para quatro faixas de profundidade do solo. Observa-se que o melhor coeficiente de regressão linear ( $R^2=0,9475$ ) também foi encontrado na faixa intermediária de profundidade do solo (30-70 cm), sendo o menor associado a profundidades na faixa entre 70-100 cm.

**Tabela 5.** Coeficientes de determinação ( $R^2$ ), fator de correção e equação da regressão linear dos dados de COS determinados por via úmida e via seca para quatro faixas de profundidade.

Camada	Profundidade cm	Equação de Regressão	Fator de Correção	$R^2$
Superficial	0 – 30	$COS_{vs} = 1,5558 * COS_{vu} + 0,5782$	1,5884	0,8244
Intermediária	30 – 70	$COS_{vs} = 1,7383 * COS_{vu} - 0,3535$	1,7119	0,9475
Inferior	70 - 100	$COS_{vs} = 1,2362 * COS_{vu} + 4,6087$	1,6725	0,5833
Total	0 - 100	$COS_{vs} = 1,5103 * COS_{vu} + 1,9583$	1,646	0,9252

$COS_{vu}$  = carbono orgânico do solo por via úmida

$COS_{vs}$  = carbono orgânico do solo por via seca



**Figura 10.** Gráficos da dispersão dos teores de COS determinados por dois métodos, via úmida e via seca, para quatro faixas de profundidade: . a: Superficial (0-30 cm); b: Intermediária (30-70 cm); c: Inferior (70-100 cm); d: Total (0-100 cm).

#### 4.2.2. Área 1 – Manejo com colheita mecanizada da cana crua há cinco anos

O solo do perfil pedológico P<sub>p</sub>1 é argiloso, com incremento gradual da argila em profundidade, mas sem configurar gradiente textural, e com teores de argila variando entre 460 e 494 g kg<sup>-1</sup> (tabela 6). A relação silte/ argila é baixa, igual ou inferior a 0,3. A classe textural do perfil é argilosa em todos os horizontes empregando-se o triângulo textural americano (USDA, 1993).

Na tabela 6 estão indicados ainda os valores de densidade das partículas ou dos sólidos do solo ( $\rho_s$ ). De acordo com EMBRAPA (1997) a densidade das partículas é definida pela razão entre a massa das partículas sólidas do solo e o volume ocupado exclusivamente pelas mesmas, independente de seu arranjo. A densidade das partículas do solo é estabelecida entre os

limites 2,3 e 2,9 kg dm<sup>-3</sup>, adotando-se 2,65 kg dm<sup>-3</sup> como valor médio devido aos constituintes minerais predominantes nos solos serem quartzo, feldspatos e silicatos de alumínio coloidais, cujas densidades de partículas estão em torno de desse valor (KIEHL, 1979; REICHARDT e TIMM, 2004; LIBARDI, 2005). No P<sub>p</sub>1 os valores de  $\rho_s$  variam entre 2,55 e 2,67 kg dm<sup>-3</sup>, muito próximos ao valor da densidade do quartzo, não indicando a ocorrência predominante de minerais mais pesados no solo, como no caso de materiais de origem provenientes de basaltos e diabásios.

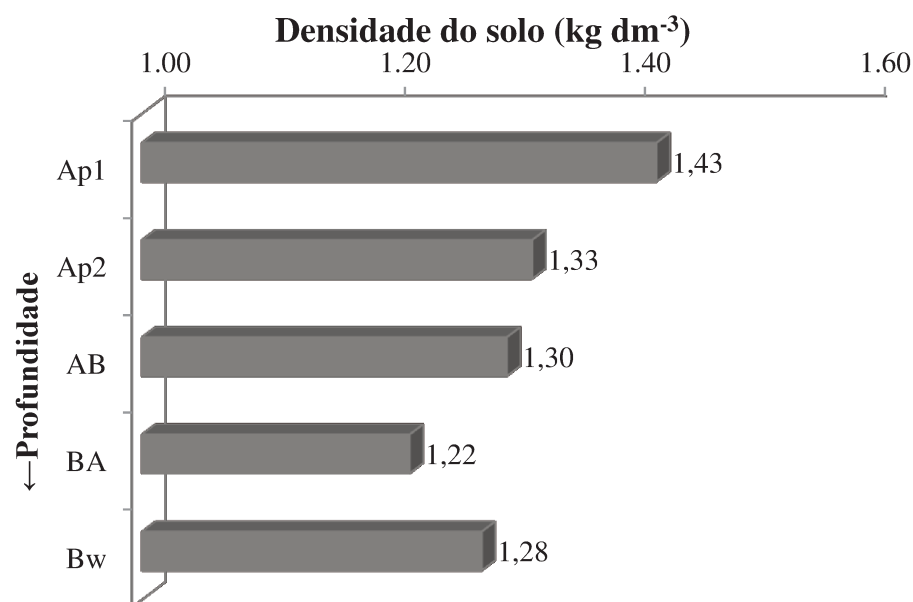
**Tabela 6.** Caracterização física do P<sub>p</sub>1: granulometria, densidade das partículas ( $\rho_s$ ).

Horizonte	Camada cm	Granulometria			$\rho_s$ kg dm <sup>-3</sup>
		Areia	Silte	Argila	
Ap1	0-23	402	138	460	2,59
Ap2	23-40	403	129	468	2,59
AB	40-50	399	129	472	2,66
BA	50-65	406	122	473	2,55
Bw	65-100	383	123	494	2,67

Segundo alguns autores, a densidade das partículas do solo apresenta certa relação com o COS. SOUZA et al. (2004) relataram que em solos ricos em matéria orgânica a densidade de partículas é menor devido ao seu baixo peso específico. Embora tal relação possa ser especialmente verdadeira para solos orgânicos, a mesma não foi observada no perfil pedológico P<sub>p</sub>1, visto que o COS decresceu em profundidade e a densidade das partículas apresentou comportamento irregular em profundidade.

A densidade do solo ( $\rho$ ) é de 1,43 kg dm<sup>-3</sup> no horizonte superficial Ap1 (0-23 cm), podendo ser indicativa de compactação, uma vez se tratar de um solo argiloso. A tendência é de redução da densidade do solo, mantendo em torno de 1,30 kg dm<sup>-3</sup> (Figura 11). Este atributo do solo é importante no estudo da compactação do solo e apresenta direta relação com a macroporosidade do solo.

De acordo com CAVALIERI et al. (2006) a densidade do solo pode ser utilizada como indicadora no estudo da compactação do solo, mas atenção especial deve ser dada a textura do solo, devido a sua influência na  $\rho$ . Isso ocorre porque a densidade das partículas varia conforme a textura do solo, sendo menor em solos argilosos e maior nos solos arenosos.



**Figura 11.** Densidade do solo ( $\rho$ , kg dm<sup>-3</sup>) por horizonte do perfil pedológico P<sub>p</sub>1.

Segundo BELTRAME e TAYLOR (1980), as causas naturais das alterações na densidade do solo são difíceis de serem definidas e avaliadas, agindo lentamente no solo, como por exemplo, a eluviação de argilas, e as antrópicas que são as forças mecânicas originadas da pressão causada pelos rodados das máquinas agrícolas e pela própria ação de implementos sobre o solo.

Além disso, destaca-se que este atributo é importante no estudo do COS do solo, uma vez que a densidade do solo tende a ser menor em solos com alto teor de MOS, devido ao baixo peso específico da MOS e à sua elevada porosidade total natural (CALONEGO et al., 2011). De acordo com HEINRICH (2010) a densidade do solo geralmente aumenta com a profundidade do perfil devido a três fatores principais: compactação (alteração da estrutura), eluviação (acrécimo de argila em profundidade) e matéria orgânica (redução em profundidade).

Na tabela 7 são apresentados os valores médios da porosidade total do solo ( $\alpha$ ), macroporosidade ( $\alpha_{mac}$ ), microporosidade ( $\alpha_{mic}$ ), água disponível ( $\theta_{disp}$ ) e água facilmente disponível ( $\theta_{fd}$ ).

**Tabela 7.** Caracterização física do perfil pedológico P<sub>p1</sub>: porosidade total ( $\alpha$ ), macroporosidade ( $\alpha_{\text{mac}}$ ), microporosidade ( $\alpha_{\text{mic}}$ ), água disponível ( $\theta_{\text{disp}}$ ) e água facilmente disponível ( $\theta_{\text{fd}}$ ).

Horizonte	Camada	$\alpha$	$\alpha_{\text{mac}}$	$\alpha_{\text{mic}}$	$\theta_{\text{disp}}$	$\theta_{\text{fd}}$
	cm					
<b>Ap1</b>	0-23	0,464	0,092	0,372	46,53	9,05
<b>Ap2</b>	23-40	0,480	0,152	0,328	30,28	10,18
<b>AB</b>	40-50	0,505	0,141	0,364	19,18	5,09
<b>BA</b>	50-65	0,523	0,178	0,345	29,03	7,94
<b>Bw</b>	65-100	0,513	0,141	0,372	63,75	17,87

Observa-se que este solo apresenta boa porosidade total em todo o perfil, estando entre 46% e 53%, sendo menos poroso na camada superficial – Ap1 (0,464  $\text{m}^3 \text{ m}^{-3}$ ) aumentando em profundidade até o horizonte BA (0,523), quando volta a decrescer suavemente em Bw (0,513). Segundo PEREIRA et al. (2013) a porosidade total faz menção ao espaço não ocupado por sólidos, mas por água e ar, e desempenha papel fundamental no comportamento físico-hídrico do solo (aeração, condução e retenção de água, penetração das raízes) propiciando ou não, o aproveitamento dos nutrientes disponíveis.

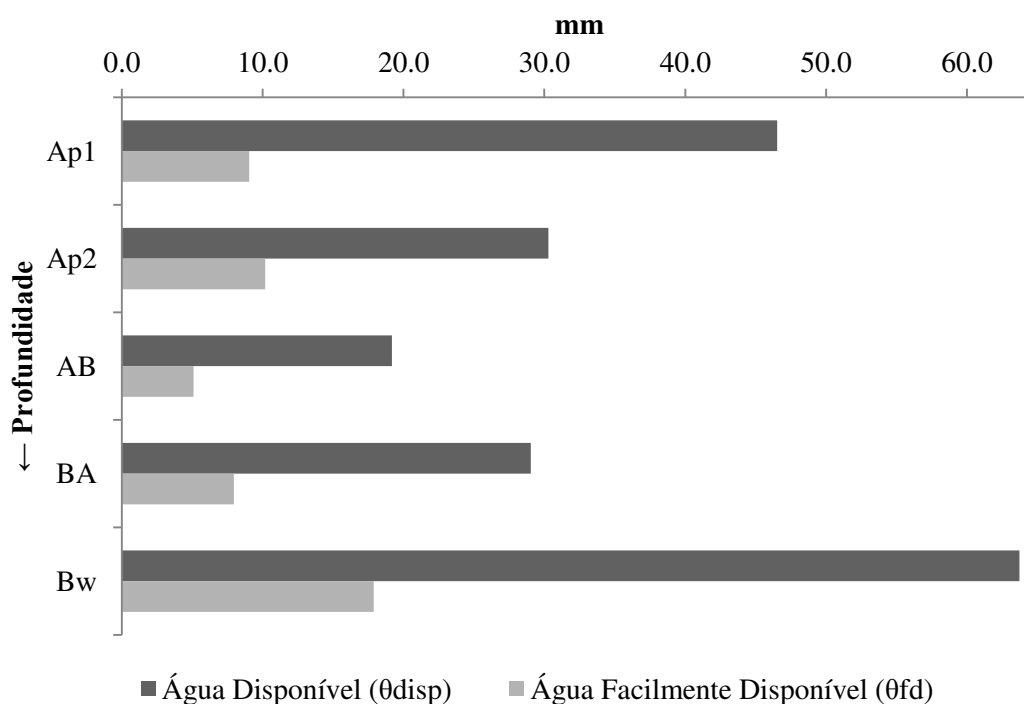
A porosidade total do solo (tabela 7) apresentou mesmo comportamento da densidade do solo (figura 11), uma vez que estes atributos são inversamente proporcionais. De acordo com TORMENA et al. (2002) a densidade do solo está relacionada à sua estruturação, assim o manejo incorreto pode propiciar à perda dessa estrutura, levando-o à compactação, alterando a distribuição desses poros na matriz do solo, pois a porosidade é inversamente proporcional à densidade.

A macroporosidade do solo ( $\alpha_{\text{mac}}$ ) ficou entre 9% e 18% no perfil e a microporosidade entre 32% e 38%, conforme a tabela 7. Os macroporos são responsáveis pela drenagem e aeração do solo, por isso são esvaziados, pela ação da gravidade, após serem saturados, além de consistir em um potencial indicador de degradação do solo (WENDLING, 2012). Observa-se que a macroporosidade do horizonte superficial Ap sendo inferior a 10%, configura uma situação crítica para a cultura no que respeita à aeração do solo e disponibilidade de ar para a planta em seus processos de respiração e fotossíntese.

Com relação à caracterização da água disponível e facilmente disponível nos horizontes pedológicos deste solo, é apresentada na tabela 7 e figura 12 esta relação. Destaca-se que os dados não apresentaram uma tendência de variação constante em profundidade, entretanto ambos

os atributos atingiram o seu ponto máximo no horizonte diagnóstico Bw, sendo 63,75 mm de água disponível ( $\theta_{disp}$ ) e 17,87 mm ( $\theta_{fd}$ ) para água facilmente disponível. Trabalhos anteriores em Latossolo Vermelho (SILVA, 2011) demonstraram na distribuição de poros a predominância de ultramicroporos, que retêm a água com elevada energia, o que condiciona elevada capacidade de água disponível, mas um volume efetivo de água facilmente disponível muito inferior.

No caso presente a água facilmente disponível representa cerca de 1/3 da água disponível, podendo a disponibilidade insuficiente de água nos períodos mais secos do ano se constituir em limitações à cultura, não somente pela falta de água mas também por elevar a resistência do solo à penetração, em especial nos horizontes compactados.



**Figura 12.** Água disponível e facilmente disponível nos horizontes pedológicos do P<sub>p</sub>1.

No que tange a caracterização química dos solos, é mostrado na tabela 8 os principais resultados na análise química de rotina nos respectivos horizontes. Pode-se observar que este solo possui pH ácido, com baixa fertilidade indicada pelos baixos teores de macronutrientes (P, K, Ca, Mg) e baixa saturação por bases no solo. Destaca-se ainda a alta CTC deste solo, mesmo nas camadas mais profundas.

**Tabela 8.** Caracterização química de rotina do perfil pedológico da área 1 (P<sub>p</sub>1, após 5 anos com colheita da cana crua).

Horizonte	Camada cm	pH	P mg dm <sup>-3</sup>	K	Ca	Mg	H+Al	S.B.	C.T.C.	V %
<b>Ap1</b>	0-23	4,4	7,0	0,03	2,1	0,5	7,2	2,63	9,83	27
<b>Ap2</b>	23-40	4,3	3,0	0,01	1,4	0,5	7,2	1,91	9,11	21
<b>AB</b>	40-50	4,2	3,0	0,02	1,0	0,3	7,2	1,32	8,52	15
<b>BA</b>	50-65	4,1	2,0	0,01	0,6	0,2	8,0	0,81	8,81	9
<b>Bw</b>	65-100	4,0	1,0	0,01	0,6	0,2	7,3	0,80	8,11	10

Na e Al não detectados na análise (considerou-se = 0).

A saturação por bases do solo (V%), utilizada na classificação do tipo de solo em nível de grande grupo comprovou que o perfil estudado é distrófico (V < 50% em Bw).

#### 4.2.2.1. Modelagem da variação contínua do COS em profundidade na área 1 (manejo com colheita mecanizada da cana crua há 5 anos) a partir dos dados do perfil experimental (n=50)

Os resultados das análises do COS por via úmida e seca das 50 amostras de solo do perfil experimental da área 1 (colheita mecanizada da cana crua há 5 anos) podem ser observados na tabela 9. O COS tende a diminuir em profundidade como esperado, sendo notável a diferença entre os teores de COS determinados por cada método, sendo que o método oxidação úmida subestima o conteúdo de COS em relação ao método padrão (combustão seca).

**Tabela 9.** Carbono orgânico do solo (g kg<sup>-1</sup>) no perfil experimental da área 1 (P<sub>e</sub>1) determinado por via úmida e seca em 50 amostras, extraídas a cada 2 cm até 1,0 metro de profundidade.

Profundidade (0 - 50) cm	COS		Profundidade (50 - 100) cm	COS	
	Via seca	Via úmida		Via seca	Via úmida
	g kg <sup>-1</sup>			g kg <sup>-1</sup>	
0 - 2	30,160	18,501	50 - 52	29,370	16,409
2 - 4	31,060	20,736	52 - 54	30,190	17,437
4 - 6	31,000	19,046	54 - 56	24,360	13,539
6 - 8	30,870	19,046	56 - 58	22,070	13,092
8 - 10	30,510	19,600	58 - 60	24,140	13,995
10 - 12	31,720	20,164	60 - 62	22,730	14,460
12 - 14	31,090	18,501	62 - 64	22,890	13,092
14 - 16	31,480	19,600	64 - 66	21,430	11,805



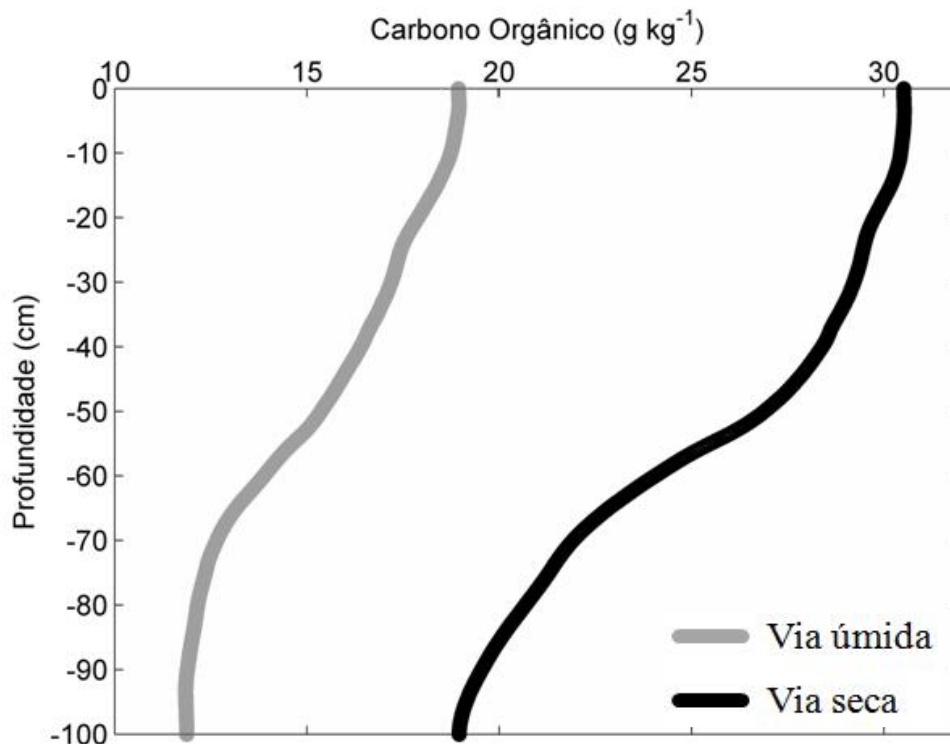
**Tabela 9.** *Continuação...*

Profundidade (0 - 50) cm	COS		Profundidade (50 - 100) cm	COS	
	Via seca g kg <sup>-1</sup>	Via úmida g kg <sup>-1</sup>		Via seca g kg <sup>-1</sup>	Via úmida g kg <sup>-1</sup>
16 - 18	29,840	17,965	66 - 68	21,520	11,805
18 - 20	29,880	18,501	68 - 70	20,360	11,805
20 - 22	28,350	17,437	70 - 72	20,500	12,225
22 - 24	28,530	16,409	72 - 74	20,710	10,991
24 - 26	29,200	15,908	74 - 76	21,750	12,654
26 - 28	30,160	17,437	76 - 78	21,510	12,225
28 - 30	29,630	17,965	78 - 80	20,750	11,393
30 - 32	29,980	17,965	80 - 82	20,670	11,805
32 - 34	29,750	16,919	82 - 84	19,800	12,654
34 - 36	29,140	17,965	84 - 86	19,650	11,805
36 - 38	26,990	15,417	86 - 88	19,230	11,805
38 - 40	30,920	17,437	88 - 90	19,410	11,805
40 - 42	28,560	16,919	90 - 92	19,070	11,393
42 - 44	28,950	15,908	92 - 94	18,530	10,991
44 - 46	28,510	15,908	94 - 96	18,300	11,805
46 - 48	29,260	16,409	96 - 98	17,970	11,805
48 - 50	28,090	15,417	98 - 100	17,300	12,225

O ajuste dos dados da tabela 9 empregando a função *spline quadrática de igual área* gerou duas curvas conforme figura 13, sendo uma referente aos dados determinados via úmida (Walkley-Black e colorimétrico) e outra via seca (analisador elementar). Em ambos os perfis o COS decresce continuamente em profundidade de forma não linear, conforme já ressaltado por inúmeros autores (PONCE-HERNANDEZ et al., 1986; BISHOP et al., 1999; MCBRATNEY et al., 2003; HIEDERER, 2009; CAMBULE et al., 2013; SULAEMAN et al., 2013 e LACOSTE et al., 2014).

Os dados de COS determinados por via seca apresentaram maior variabilidade, tornando mais sinuosa à curva experimental da figura 13. A maior variabilidade decorre que dado o elevado custo não se costuma fazer repetições da análise de cada amostra, quando o recomendado seria fazer triplicatas. Nas análises, somente uma pequena porção de solo é empregada para a realização da análise e embora a amostra seja finamente moída e homogeneizada, um fragmento de adubo ou outro material pode ser analisado, trazendo essa grande variabilidade. Em virtude do

custo que limita as repetições que por sua vez não compensa a variação dos dados o método empregando analisador elementar ainda não tem sido adotado como padrão, em especial no Brasil.



**Figura 13.** Curvas experimentais da variação contínua em profundidade do COS para o P<sub>e</sub>1 (n=50) ajustadas empregando a função *spline quadrática de igual área*.

Desta forma, assumiu-se como “verdade terrestre” a curva experimental gerada a partir dos dados de COS via úmida, utilizando essa curva para validação daquela gerada a partir dos dados do perfil pedológico da área 1 (P<sub>p</sub>1; n=5), conforme descrito abaixo.

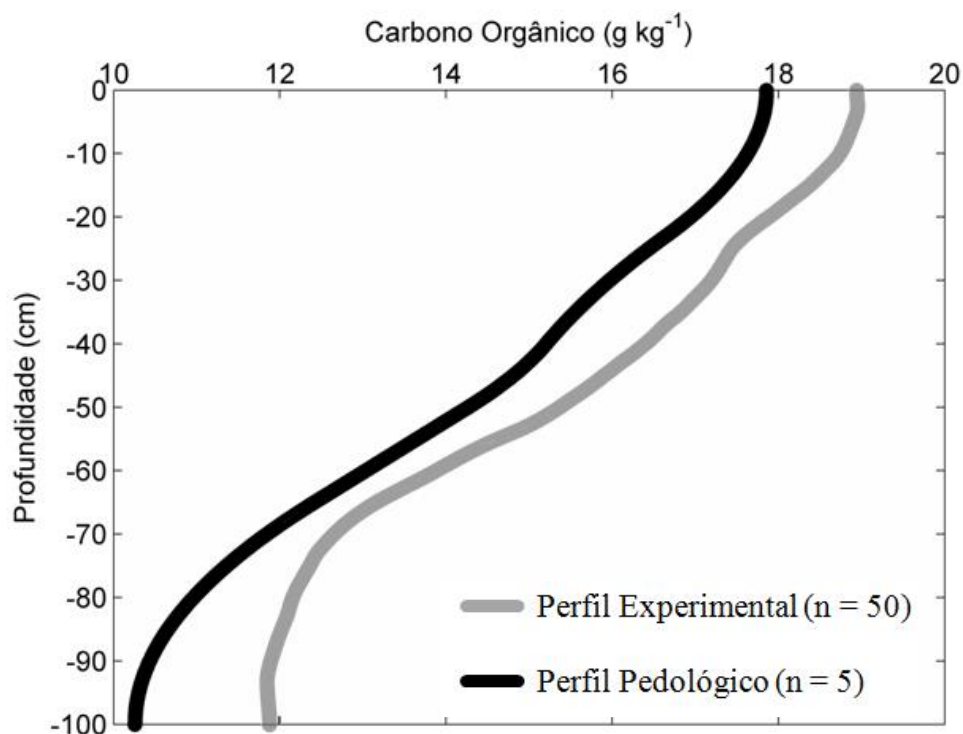
#### **4.2.2.2. Modelagem da variação contínua do COS em profundidade na área 1 (manejo com colheita mecanizada da cana crua há 5 anos) a partir dos dados do perfil pedológico (n=5)**

A análise do COS por via úmida do perfil pedológico 1 (P<sub>p</sub>1) (tabela 10) evidencia decréscimo do COS em profundidade, conforme esperado. A partir desses dados (n=5) foi gerada a curva de variação contínua do COS utilizando a função *spline quadrática de igual área* conforme apresentado na figura 14.

**Tabela 10.** Carbono orgânico do solo determinado por via úmida nos horizontes do perfil pedológico da área 1 (P<sub>p</sub>1, manejo com colheita da cana crua há 5 anos).

<b>Horizonte</b>	<b>Camada</b>	<b>COS (P<sub>p</sub>1)</b>
	cm	g kg <sup>-1</sup>
Ap1	0-23	17,98
Ap2	23-40	15,66
AB	40-50	15,08
BA	50-65	13,34
Bw	65-100	10,36

De acordo com PONCE-HERNANDEZ et al. (1986); BISHOP et al. (1999); MCBRATNEY et al., (2003) e MALONE et al., (2009) esta função suaviza os máximos e mínimos obtidos em um horizonte amostrado, construindo um perfil suave e contínuo, muito parecido com o perfil real do COS. A análise visual dos perfis experimental e pedológico ajustados para a área 1 e apresentados na figura 14 demonstra que a função *Spline* foi eficiente na modelagem do COS em profundidade a partir de um pequeno número de dados (n=5), devido a que as curvas apresentam a mesma conformação e tendência. No entanto, a curva originada a partir dos dados do perfil pedológico (n=5), esteja deslocada para a esquerda em relação à curva gerada a partir do perfil experimental (n=50), de certa forma subestima os dados, sendo que o maior desvio ocorreu em relação ao último horizonte (Bw), que apresentou valor muito baixo de COS (10,38 g kg<sup>-1</sup>).



**Figura 14.** Ilustração das curvas ajustadas aos dados de COS via úmida do perfil experimental (n=50) e ao perfil pedológico (n=5) da área 1.

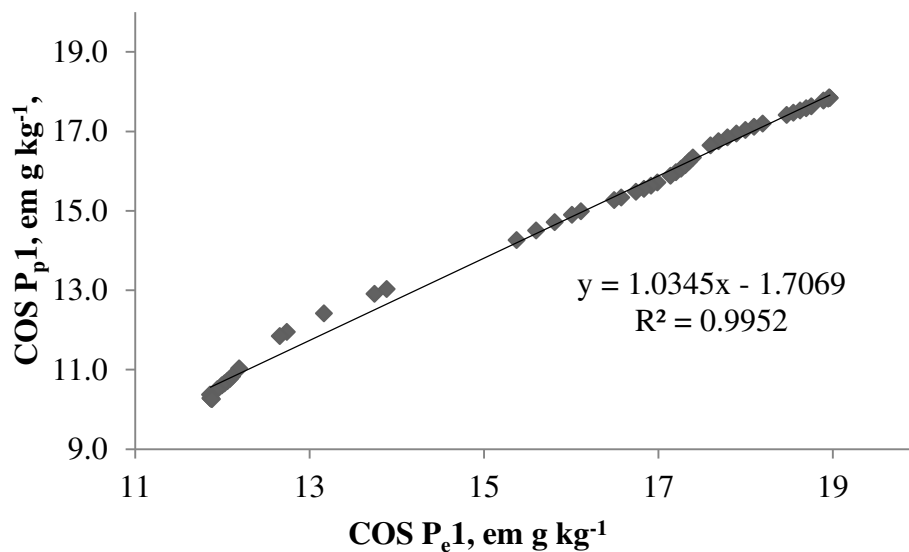
Na tabela 11 abaixo são apresentados 50 valores de COS extraídos em profundidades aleatórias a partir da curva experimental da área 1 (P<sub>e</sub>1, Tabela 9, dados via úmida) para posterior análise de regressão e correlação linear com os valores extraídos nas mesmas profundidades da curva gerada com dados do perfil pedológico (P<sub>p</sub>1, tabela 10, figura 14, dados via úmida).

**Tabela 11.** Valores de COS (g kg<sup>-1</sup>) extraídos das curvas ajustadas aos dados dos perfis experimental (P<sub>e</sub>1) e pedológico (P<sub>p</sub>1) em profundidades selecionadas por sorteio.

Prof. cm	COS P <sub>e</sub> 1 g kg <sup>-1</sup>	COS P <sub>p</sub> 1 g kg <sup>-1</sup>	Prof. cm	COS P <sub>e</sub> 1 g kg <sup>-1</sup>	COS P <sub>p</sub> 1 g kg <sup>-1</sup>
1	18,961	17,855	36	16,745	15,480
3	18,969	17,836	38	16,575	15,337
4	18,951	17,820	39	16,498	15,269
6	18,896	17,775	43	16,113	14,984
10	18,755	17,628	44	16,013	14,899
11	18,699	17,580	46	15,814	14,712
12	18,629	17,527	48	15,601	14,501

**Tabela 11.** Continuação...

Prof. cm	COS P <sub>e</sub> 1 g kg <sup>-1</sup>	COS P <sub>p</sub> 1 g kg <sup>-1</sup>	Prof. cm	COS P <sub>e</sub> 1 g kg <sup>-1</sup>	COS P <sub>p</sub> 1 g kg <sup>-1</sup>
13	18,552	17,470	50	15,376	14,266
14	18,475	17,408	60	13,888	13,032
17	18,198	17,195	61	13,747	12,909
18	18,101	17,115	65	13,166	12,415
19	18,002	17,030	69	12,740	11,950
20	17,899	16,941	70	12,660	11,843
21	17,794	16,847	79	12,194	11,034
22	17,694	16,748	82	12,113	10,828
23	17,601	16,645	83	12,089	10,766
26	17,400	16,340	84	12,059	10,708
27	17,356	16,243	85	12,028	10,654
28	17,311	16,148	86	11,998	10,603
29	17,261	16,056	88	11,945	10,511
30	17,205	15,967	92	11,863	10,370
31	17,141	15,879	96	11,864	10,285
33	16,993	15,712	97	11,870	10,273
34	16,918	15,632	98	11,877	10,264
35	16,837	15,555	99	11,882	10,259



**Figura 15.** Gráfico da dispersão e linha de tendência da regressão linear entre valores COS estimados pela curva do perfil experimental (em X) e os estimados pela curva do perfil pedológico (em Y).

A partir dos valores de COS da tabela 11, encontrou-se correlação linear significativa entre os dados ( $r = 0,9976$ ;  $p < 0,01$ ), sendo que o coeficiente de determinação da regressão linear foi elevado ( $R^2 = 0,9952$ ), conforme ilustrado na figura 15.

O erro padrão (raiz do quadrado médio do erro) calculado entre os dados extraídos dos perfis experimental (referência) e pedológico (estimativa) foi calculado como sendo de 1,18. Em seu trabalho, PONCE-HERNANDEZ et al. (1986) obtiveram o mesmo erro padrão, para as estimativas provenientes de curva ajustada a dados de um perfil pedológico. A qualidade da curva ajustada a partir dos dados do P<sub>p</sub>1 (n=5) também foi validada com base em valores de COS determinados em amostras independentes.. Assim, na tabela 12 são apresentados 50 valores de COS determinados por via úmida (COS medido a cada 2 cm) e 50 valores de COS estimado pela curva ajustada aos dados do P<sub>p</sub>1. A profundidade se refere ao ponto médio da camada amostrada, mesma profundidade em que foi extraído o valor de COS da curva de P<sub>p</sub>1.

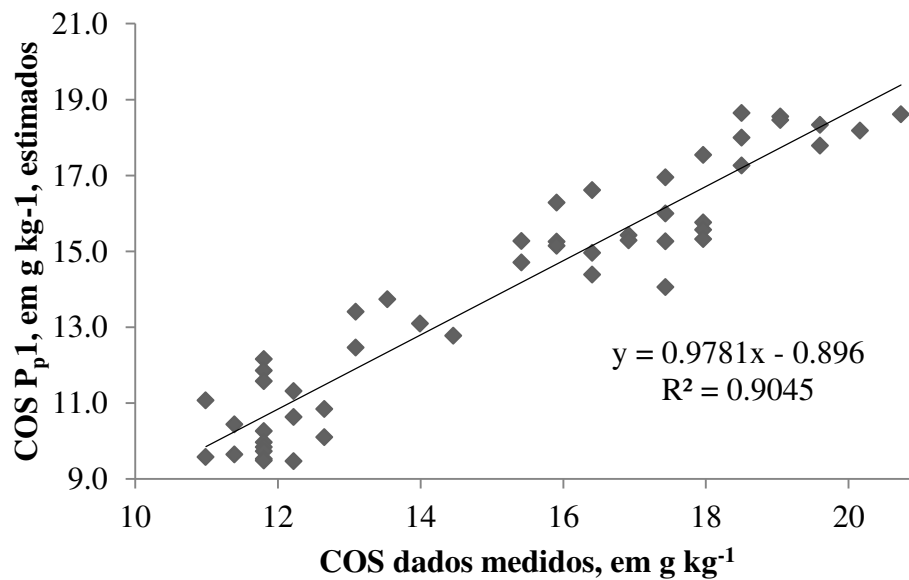
**Tabela 12.** Dados de COS determinados e extraídos do perfil pedológico (preditos).

<b>Prof.</b>	<b>COS Medido</b>	<b>COS P<sub>p</sub>1 estimado pelo modelo (n=5)</b>	<b>Prof.</b>	<b>COS Medido</b>	<b>COS P<sub>p</sub>1 estimado pelo modelo (n=5)</b>
cm	g kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	cm	g kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>
1	18,501	17,855	51	16,409	15,480
3	20,736	17,836	53	17,437	15,337
5	19,046	17,820	55	13,539	15,269
7	19,046	17,775	57	13,092	14,984
9	19,600	17,628	59	13,995	14,899
11	20,164	17,580	61	14,460	14,712
13	18,501	17,527	63	13,092	14,501
15	19,600	17,470	65	11,805	14,266
17	17,965	17,408	67	11,805	13,032
19	18,501	17,195	69	11,805	12,909
21	17,437	17,115	71	12,225	12,415
23	16,409	17,030	73	10,991	11,950
25	15,908	16,941	75	12,654	11,843
27	17,437	16,847	77	12,225	11,034
29	17,965	16,748	79	11,393	10,828
31	17,965	16,645	81	11,805	10,766
33	16,919	16,340	83	12,654	10,708

**Tabela 12.** Continuação...

Prof.	COS Medido	COS P <sub>p</sub> 1 estimado pelo modelo (n=5)	Prof.	COS Medido	COS P <sub>p</sub> 1 estimado pelo modelo (n=5)
cm	g kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	cm	g kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>
35	17,965	16,243	85	11,805	10,654
37	15,417	16,148	87	11,805	10,603
39	17,437	16,056	89	11,805	10,511
41	16,919	15,967	91	11,393	10,370
43	15,908	15,879	93	10,991	10,285
45	15,908	15,712	95	11,805	10,273
47	16,409	15,632	97	11,805	10,264
49	15,417	15,555	99	12,225	10,259

Os resultados apresentaram correlação linear significativa ( $p < 0,01$ ) com  $r$  igual a 0,9511 e alta regressão linear com  $R^2$  igual a 0,9045, conforme é mostrado na figura 16. O teste da qualidade do ajuste dos dados indicou um erro padrão de 1,55. MINASNY et al. (2006) consideraram muito bom um ajuste com erro padrão de 1,22 e  $R^2 = 0,88$ .



**Figura 16.** Gráfico da dispersão de valores medidos e estimados de COS, linha de tendência da regressão linear, e equação de regressão.

Os resultados obtidos neste trabalho confirmam que a função *Spline quadrática de igual área* se aplica perfeitamente para descrever a variação contínua do COS em profundidade, mesmo a partir de pequeno número de dados, como no caso dos perfis pedológicos. Os elevados coeficientes de correlação entre valores de referência ou medidos e os valores estimados, assim

como baixo erro padrão, permitem recomendar a função *spline quadrática de igual área* para essa aplicação, corroborando com inúmeros autores que também a recomendam (PONCE-HERNANDEZ et al., 1986; BISHOP et al., 1999; MCBRATNEY et al., 2000, 2003; MINASNY et al., 2006, 2010; MALONE et al., 2009; TAMARGO, 2011; ODGERS et al., 2012).

#### 4.2.2.3. Estoque de COS

O perfil pedológico da área 1 apresentou estoque de carbono de 185,021 Mg ha<sup>-1</sup>, sendo distribuídos em seus horizontes pedológicos em função da densidade do solo, conteúdo de carbono e espessura do horizonte. O maior estoque ocorreu no horizonte superficial Ap1, com 59,089 Mg ha<sup>-1</sup> de carbono estocado, conforme pode ser observado na tabela 13.

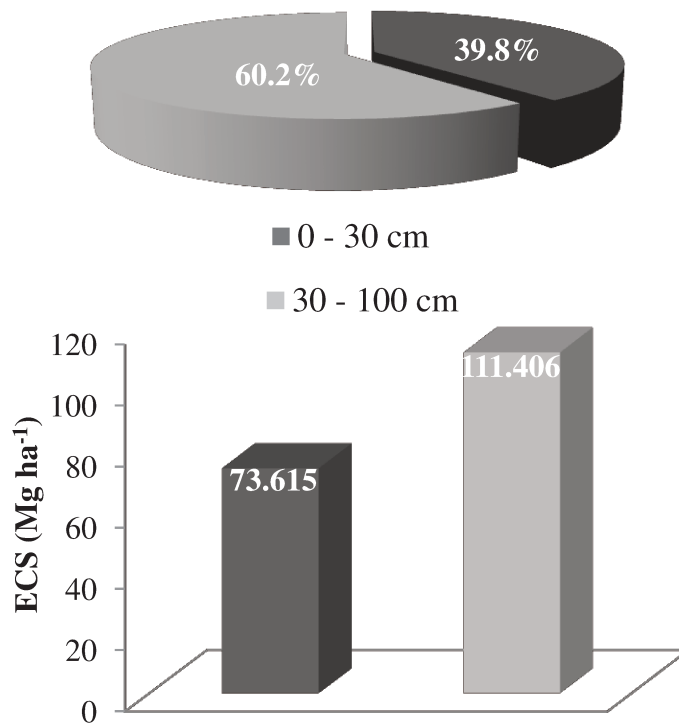
**Tabela 13.** Distribuição do estoque de carbono nos horizontes do perfil pedológico da área 1, manejada com colheita mecanizada da cana crua há cinco anos.

Horizonte	Camada	ECS
	cm	Mg ha <sup>-1</sup>
Ap1	0-23	59,089
Ap2	23-40	35,278
AB	40-50	19,666
BA	50-65	24,476
Bw	65-100	46,512
<b>Total</b>		<b>185,021</b>

A distribuição do ECS em profundidade neste solo comprova uma das hipóteses deste trabalho, mostrando ser significativa a quantidade de carbono estocado abaixo da superfície, conforme é mostrado na figura 17. O ECS na camada superficial 0-30 cm é de 73,615 Mg ha<sup>-1</sup>, cerca de 20% inferior ao ECS da camada compreendida entre 30 e 100 cm (111,406 Mg ha<sup>-1</sup>).

Estes resultados vão de encontro aos resultados obtidos por BATJES (1996); FAO (2001) e JOBBÁGY e JACKSON (2000) que concluíram em seu trabalho que o ECS é aproximadamente igual nestas camadas, afirmando ser significativa a contribuição do COS em subsuperfície, devendo este ser considerado em relatórios e levantamentos de mudanças de uso da terra e balanço do COS nos agrossistemas e ecossistemas.





**Figura 17.** Gráfico de colunas e de pizza representando a distribuição do ECS nas camadas de 0 a 30 cm e 30 a 70 cm na área 1 (5 anos).

#### 4.2.3. Área 2 – Manejo com colheita mecanizada da cana crua há dez anos

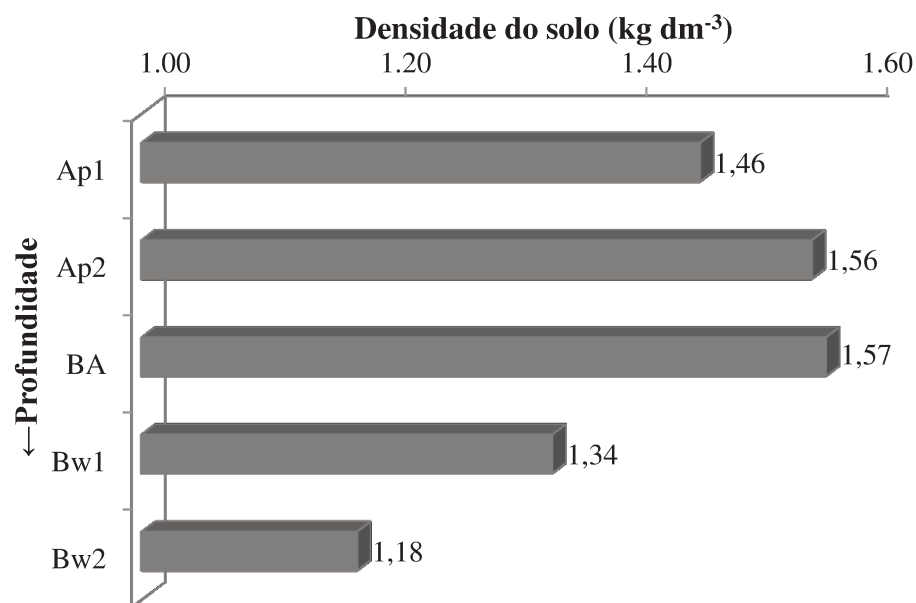
O solo da área 2 é um Latossolo Vermelho distrófico argiloso, pertencente à mesma unidade de mapeamento e muito similar ao solo da área 1, como era o desejado, uma vez que o tipo de solo não se constituiu em fator de variação da pesquisa. Os teores de argila nesse caso variam na faixa entre 458 g kg<sup>-1</sup> e 550 g kg<sup>-1</sup> (Tabela 14), sendo a classe textural argilosa em todos os horizontes, de acordo com o triângulo textural americano (USDA, 1993).

Com relação ao atributo densidade das partículas ou dos sólidos do solo ( $\rho_s$ ) os valores variam em torno da densidade do quartzo, entre 2,55 kg dm<sup>-3</sup> e 2,67 kg dm<sup>-3</sup>, (tabela 14). Os mesmos comentários efetuados para o solo da área 1 são válidos nesse caso.

**Tabela 14.** Caracterização física do P<sub>p2</sub>: granulometria e densidade das partículas ( $\rho_s$ ).

Horizonte	Camada cm	Granulometria			$\rho_s$ kg dm <sup>-3</sup>
		Areia	Silte	Argila	
Ap1	0-20	398	134	468	2,67
Ap2	20-30	405	138	458	2,55
BA	30-50	338	112	550	2,63
Bw1	50-70	361	108	531	2,57
Bw2	70-100	363	113	524	2,64

A figura 18 ilustra a variação da densidade do solo nos diferentes horizontes do perfil pedológico da área 2. Tratando-se de um solo argiloso, os valores de densidade do solo ( $\rho$ ) nas três primeiras camadas, respectivamente 1,46 kg dm<sup>-3</sup>, 1,56 kg dm<sup>-3</sup> e 1,57 kg dm<sup>-3</sup>, podem ser considerados altos e como já destacado por REICHERT et al. (2003) indicam a ocorrência de compactação do solo até 50 cm de profundidade, associadas ao tráfego de máquinas na área, com formação de pé de grade ou pé de arado. Nos horizontes Bw1 e Bw2 a densidade do solo decresce para 1,34 kg dm<sup>-3</sup> e 1,18 kg dm<sup>-3</sup> respectivamente.



**Figura 18.** Valores de densidade do solo dos horizontes do perfil pedológico da área 2 – P<sub>p2</sub>.

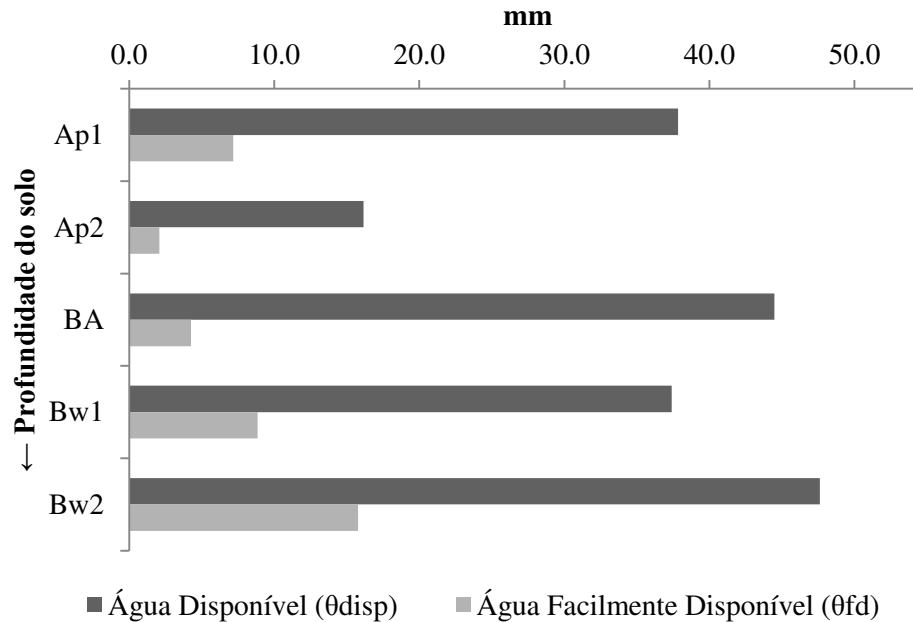
Na tabela 15 são apresentados os valores médios da porosidade total do solo ( $\alpha$ ), macroporosidade ( $\alpha_{mac}$ ), microporosidade ( $\alpha_{mic}$ ), água disponível ( $\theta_{disp}$ ) e água facilmente disponível ( $\theta_{fd}$ ) deste solo (10 anos). A análise indicou boa porosidade total em todo o perfil do solo, variando entre 40 e 57%. Entretanto os valores de macroporosidade são críticos ou abaixo de 10% em três dos cinco horizontes, representando condição muito desfavorável para a cultura, notadamente no caso do horizonte BA, onde é inferior a 2%.

**Tabela 15.** Caracterização física do P<sub>p2</sub>: porosidade total ( $\alpha$ ), macroporosidade ( $\alpha_{mac}$ ), microporosidade ( $\alpha_{mic}$ ), água disponível ( $\theta_{disp}$ ) e água facilmente disponível ( $\theta_{fd}$ ).

Horizonte	Camada	$\alpha$	$\alpha_{mac}$	$\alpha_{mic}$	$\theta_{disp}$	$\theta_{fd}$
	cm					
<b>Ap1</b>	0-20	0,436	0,063	0,373	37,829	7,181
<b>Ap2</b>	20-30	0,400	0,033	0,368	16,149	2,083
<b>BA</b>	30-50	0,410	0,017	0,393	44,468	4,254
<b>Bw1</b>	50-70	0,475	0,076	0,399	37,404	8,842
<b>Bw2</b>	70-100	0,564	0,165	0,400	47,610	15,790

A microporosidade do solo apresenta ligeiro aumento em profundidade, variando de  $0,368 m^3 m^{-3}$  a  $0,40 m^3 m^{-3}$ , confirmando-se que a redução do volume do solo e aumento da densidade ocorreu à custa da macroporosidade.

Na tabela 15 constam os valores de água disponível e facilmente disponível por horizonte do perfil pedológico da área 2, também ilustrados no gráfico da Figura 19. Em função da compactação do solo, os valores de água facilmente disponível são muito baixos, evidenciando a degradação da estrutura do solo neste local. Essa condição de degradação estrutural, condicionando falta de água nos períodos mais secos do ano e possível excesso de água ou má aeração condicionando deficiência de oxigênio nos períodos chuvosos, comprometem o desenvolvimento da planta, mas também a atividade biológica do solo. Nesse caso, este pode ser um fator relevante a explicar menores teores de COS nesse caso. Assim, o esperado efeito positivo do manejo com colheita da cana crua na conservação do carbono no solo fica anulado pela condição de degradação física do solo, que limita demasiadamente a atividade biológica de desenvolvimento de raízes e decomposição da matéria orgânica.



**Figura 19.** Representação dos valores de água disponível ( $\theta_{disp}$ ) e água facilmente disponível ( $\theta_{fd}$ ) nos horizontes do perfil pedológico da área 2 – P<sub>p</sub>2.

Com relação à caracterização química do solo, são mostrados na tabela 16 os principais resultados na análise química de rotina nos respectivos horizontes. O solo é ácido como no caso da área 1, mas possui teores pouco mais elevados de P, K, Ca, Mg, assim como a saturação por bases no solo. Com relação à capacidade de troca de cátions deste solo, os valores são inferiores aos observados para o perfil da área 1, com considerável redução em profundidade. A saturação por bases do solo (V%), utilizada na classificação do tipo de solo em nível de grande grupo é menor que 50% em todos os horizontes, inclusive no horizonte diagnóstico Bw, configurando um solo distrófico.

**Tabela 16.** Caracterização química perfil pedológico da área 2 – P<sub>p</sub>2.

Horizonte	Camada cm	pH	P (mg dm <sup>-3</sup> )	K	Ca	Mg	H+Al S.B. C.T.C.			V %
							(cmoLc dm <sup>-3</sup> )			
Ap1	0-20	4,7	47	0,46	2,7	0,6	5,2	3,76	8,96	42
Ap2	20-30	4,5	16	0,29	1,7	0,6	4,7	2,59	7,29	36
BA	30-50	4,6	7	0,17	1,8	0,6	4,2	2,57	6,77	38
Bw1	50-70	4,9	2	0,07	2,3	0,5	4,2	2,87	7,07	41
Bw2	70-100	4,6	2	0,15	1,6	0,4	4,7	2,15	6,85	31

Na e Al não detectados na análise (considerou-se = 0).

**4.2.3.1. Modelagem da variação contínua do COS em profundidade no solo da área 2 (manejo com colheita mecanizada da cana crua há 10 anos) a partir dos dados do perfil experimental (n=50)**

Os resultados das análises do COS por via úmida e seca do perfil experimental da área 2 (Pe2, amostras de 2,0 cm em 2,0 cm, n=50) podem ser observados na tabela 17. A partir desses dados é notável a diferença entre os teores de COS nos diferentes métodos. Conforme já observado anteriormente e comprovado pela análise estatística, o método oxidação úmida subestimou o conteúdo de COS em relação ao método de combustão por via seca.

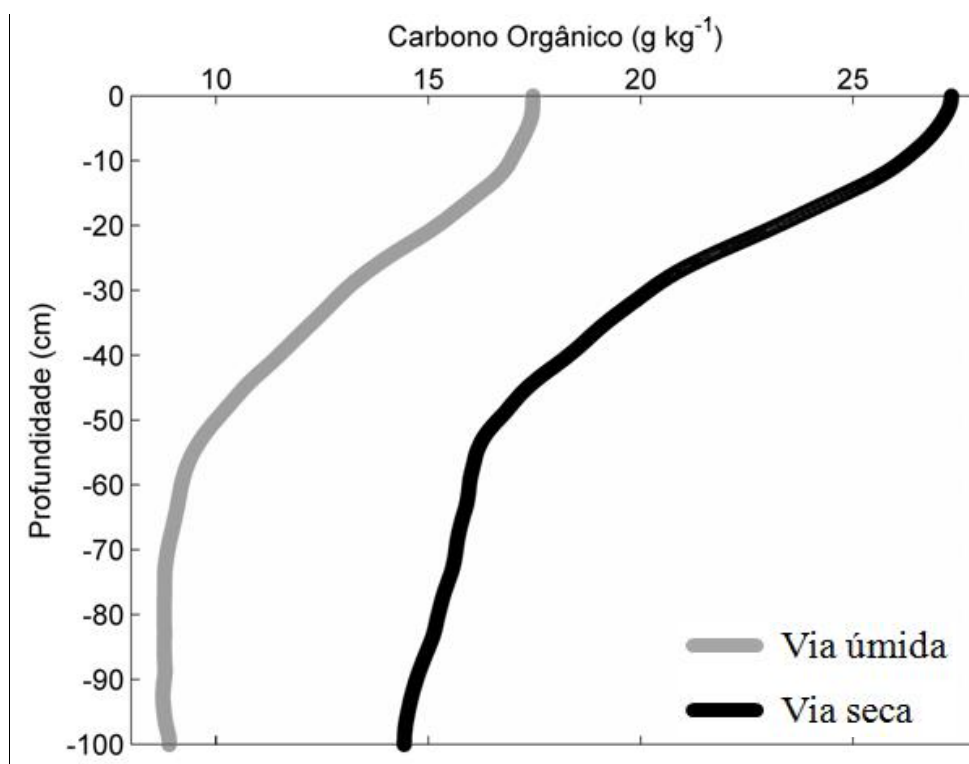
**Tabela 17.** Carbono orgânico do solo ( $\text{g kg}^{-1}$ ) no perfil experimental da área 2 (Pe2) determinado por via úmida e seca em 50 amostras, extraídas a cada 2 cm até 1,0 metro de profundidade.

Profundidade (0 - 50) cm	COS		Profundidade (50 - 100) cm	COS	
	Via seca	Via úmida		Via seca	Via úmida
	$\text{g kg}^{-1}$			$\text{g kg}^{-1}$	
0 - 2	30,540	17,965	50 - 52	14,520	8,764
2 - 4	29,020	19,600	52 - 54	14,110	8,764
4 - 6	28,530	18,501	54 - 56	14,470	8,093
6 - 8	28,860	17,437	56 - 58	16,320	8,424
8 - 10	27,180	16,919	58 - 60	14,780	8,424
10 - 12	29,030	19,600	60 - 62	16,280	8,764
12 - 14	28,510	19,600	62 - 64	17,240	9,471
14 - 16	25,100	15,908	64 - 66	15,370	9,113
16 - 18	24,170	15,908	66 - 68	15,190	9,113
18 - 20	23,890	16,409	68 - 70	15,120	8,424
20 - 22	24,230	16,919	70 - 72	16,260	8,424
22 - 24	21,360	13,995	72 - 74	16,790	8,093
24 - 26	19,790	12,654	74 - 76	15,370	8,424
26 - 28	17,860	12,654	76 - 78	14,640	9,113
28 - 30	18,340	11,393	78 - 80	15,220	8,424
30 - 32	20,170	12,225	80 - 82	14,890	8,764
32 - 34	19,360	13,092	82 - 84	16,500	9,113
34 - 36	17,670	12,225	84 - 86	15,140	8,424
36 - 38	18,480	11,805	86 - 88	14,630	8,424
38 - 40	19,740	11,805	88 - 90	14,380	10,597
40 - 42	19,290	12,225	90 - 92	14,190	7,771
42 - 44	16,180	10,213	92 - 94	14,270	7,771
44 - 46	15,250	9,113	94 - 96	14,320	8,424

**Tabela 17.** Continuação...

Profundidade (0 - 50) cm	COS		Profundidade (50 - 100) cm	COS	
	Via seca	Via úmida		Via seca	Via úmida
	g kg <sup>-1</sup>			g kg <sup>-1</sup>	
46 - 48	16,100	10,597	96 - 98	13,640	7,771
48 - 50	18,110	10,213	98 - 100	13,760	10,991

Novamente, a variação contínua do COS em profundidade no solo foi realizada empregando a função *Spline quadrática de igual área* pelo algoritmo implementado no MATLAB. As curvas de variação contínua do COS determinados por oxidação úmida e combustão seca podem ser vistos na figura 20. Como esperado e já destacado por diversos autores (SULAEMAN et al., 2013; LACOSTE et al., 2014), em ambas os casos o COS decresce em profundidade no solo..



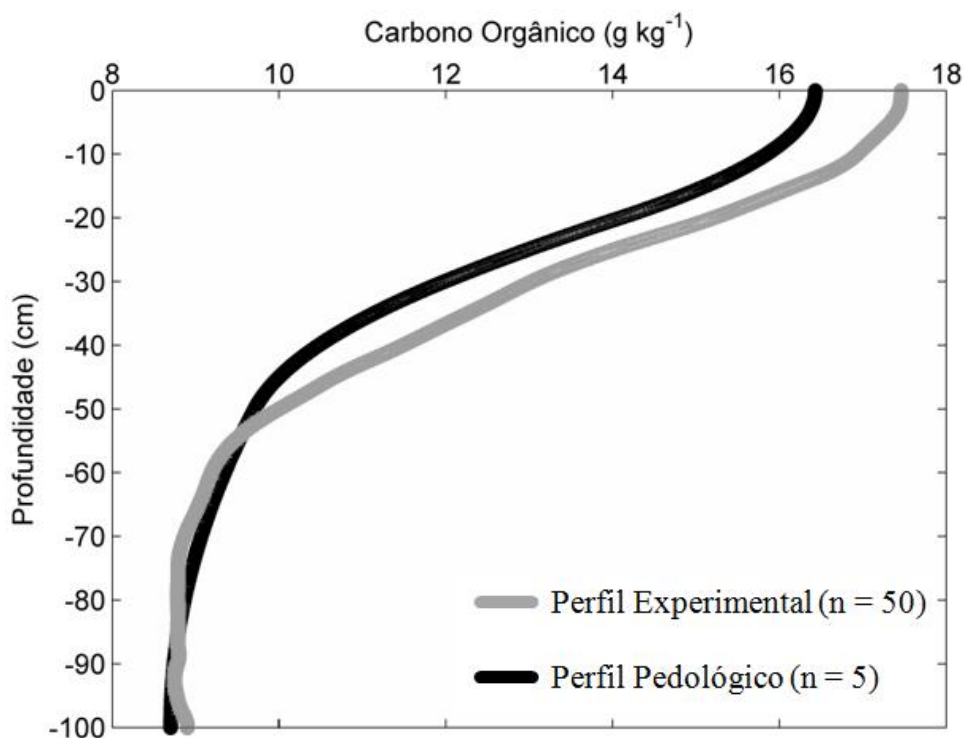
**Figura 20.** Curvas experimentais da variação contínua em profundidade do COS para o P<sub>c</sub>2 (n=50) ajustadas empregando a função *spline quadrática de igual área*.

#### 4.2.3.2. Modelagem da variação contínua do COS em profundidade na área 2 (manejo com colheita mecanizada da cana crua há 5 anos) a partir dos dados do perfil pedológico (n=5)

Os dados de COS (via úmida) obtidos a partir dos horizontes no perfil pedológico da área 2 (manejo com colheita mecanizada da cana crua há 10 anos), apresentados na tabela 18, também foram utilizados na modelagem e construção da curva de variação contínua do COS. A figura 21 ilustra comparativamente as curvas ajustadas a partir dos dados de COS determinados via úmida do perfil experimental (n=50) e do perfil pedológico (n=5).

**Tabela 18.** Carbono orgânico do solo determinado por via úmida nos horizontes do perfil pedológico da área 2 (P<sub>p</sub>2, manejo com colheita da cana crua há 10 anos).

Horizonte	Camada cm	COS g kg <sup>-1</sup>
Ap1	0-20	16,82
Ap2	20-30	12,76
BA	30-50	9,86
Bw1	50-70	9,28
Bw2	70-100	8,70



**Figura 21.** Ilustração das curvas ajustadas aos dados de COS via úmida do perfil experimental (n=50) e do perfil pedológico (n=5) da área 2.

Observa-se que as duas curvas apresentam praticamente a mesma forma ao longo dos 100 cm de profundidade, sendo muito mais próximas, comparativamente ao observado para as mesmas curvas da área 1 (figura 14). Mas, também neste caso, até cerca de 50 cm de profundidade os valores estimados a partir dos dados do perfil pedológico (n=5) são um pouco inferiores ou subestimam os teores de COS em relação aos teores estimados pela curva do perfil experimental (n=50), considerados como referências.

Na tabela 19 são apresentados 50 valores de COS determinados via úmida e extraídos a partir das curvas ajustadas pela função *spline quadrática de igual área* aos dados do perfil experimental (P<sub>e</sub>2, referência, n=50) e do perfil pedológico (P<sub>p</sub>2, n=5) em profundidades definidas por sorteio e empregados na análise de regressão e correlação linear.

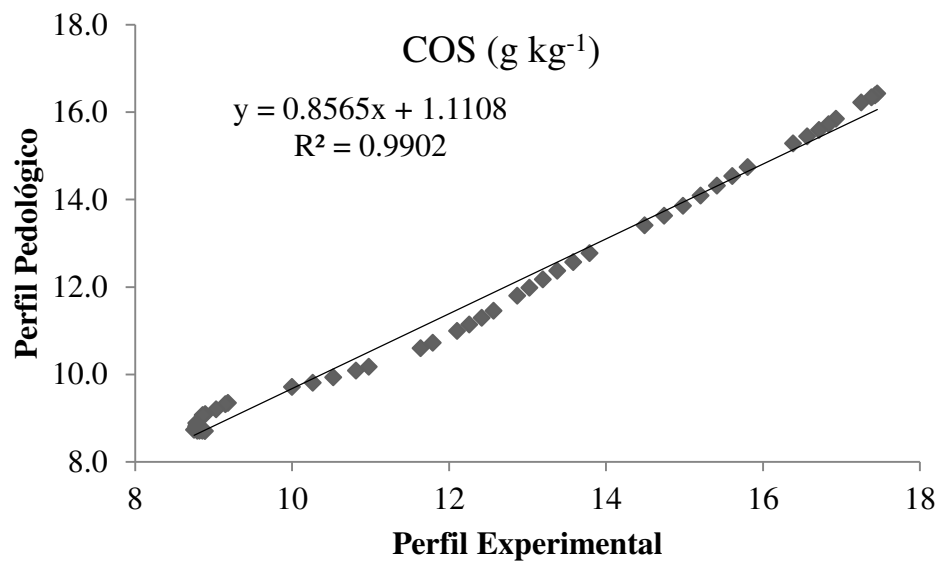
**Tabela 19.** Valores de COS (g kg<sup>-1</sup>) extraídos das curvas ajustadas aos perfis experimental (P<sub>e</sub>2) e pedológico (P<sub>p</sub>2) em profundidades definidas por sorteio.

Prof. cm	COS – P <sub>e</sub> 2 g kg <sup>-1</sup>	COS – P <sub>p</sub> 2 g kg <sup>-1</sup>	Prof. cm	COS – P <sub>e</sub> 2 g kg <sup>-1</sup>	COS – P <sub>p</sub> 2 g kg <sup>-1</sup>
1	17,458	16,424	36	12,103	10,988
3	17,429	16,377	38	11,793	10,716
4	17,386	16,336	39	11,638	10,592
6	17,256	16,219	43	10,979	10,166
10	16,933	15,844	44	10,815	10,078
11	16,839	15,721	46	10,527	9,925
12	16,717	15,586	48	10,266	9,801
13	16,566	15,440	50	9,999	9,706
14	16,384	15,282	60	9,185	9,346
17	15,805	14,737	61	9,154	9,314
18	15,613	14,532	65	9,035	9,195
19	15,415	14,316	69	8,894	9,088
20	15,207	14,087	70	8,863	9,064
21	14,984	13,855	79	8,780	8,878
22	14,742	13,628	82	8,785	8,831
23	14,493	13,406	83	8,786	8,817
26	13,793	12,766	84	8,784	8,803
27	13,583	12,563	85	8,782	8,791
28	13,383	12,363	86	8,783	8,779
29	13,196	12,169	88	8,797	8,758
30	13,027	11,979	92	8,751	8,726
31	12,871	11,796	96	8,795	8,706



**Tabela 19.** Continuação...

Prof. cm	COS – P <sub>e</sub> 2 g kg <sup>-1</sup>	COS – P <sub>p</sub> 2 g kg <sup>-1</sup>	Prof. cm	COS – P <sub>e</sub> 2 g kg <sup>-1</sup>	COS – P <sub>p</sub> 2 g kg <sup>-1</sup>
33	12,571	11,450	97	8,821	8,704
34	12,417	11,289	98	8,858	8,702
35	12,260	11,135	99	8,890	8,700



**Figura 22.** Gráfico da regressão linear dos dados de COS dos perfis experimental e pedológico da área 2.

A análise dos dados indicou correlação linear significativa ao nível de 1% de probabilidade ( $p < 0,01$ ) com coeficiente de correlação ( $r$ ) igual a 0,9951 e coeficiente de determinação ( $R^2$ ) de 0,9902, conforme é mostrado na figura 22. Os dados apresentaram ainda erro padrão (raiz do quadrado médio do erro) de apenas 0,84.

Também neste caso foi testado o ajuste dos dados de COS preditos ( $P_p2$ ,  $n=5$ ) comparando com dados medidos (via úmida) provenientes de amostras independentes e apresentados na tabela 20.

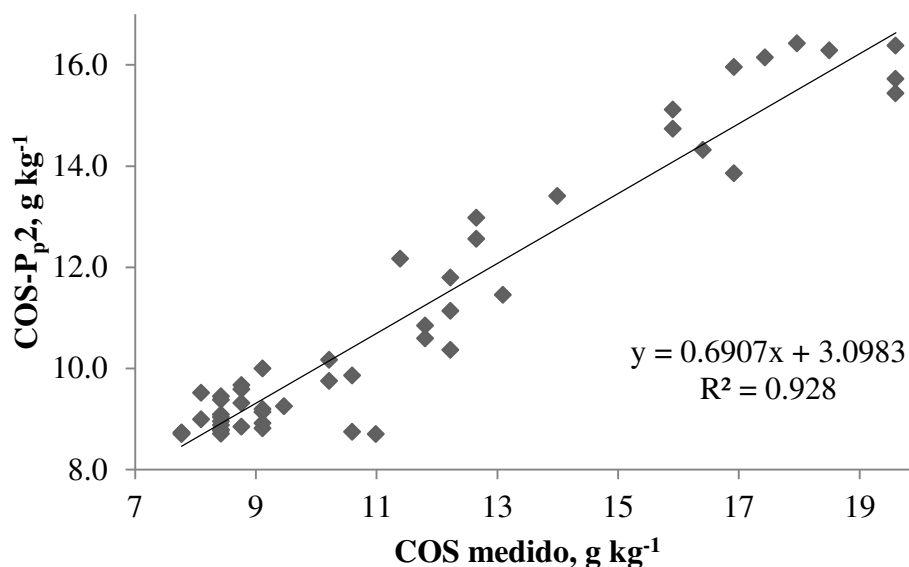
**Tabela 20.** Dados de COS determinados por via úmida em amostras independentes (medidos) e dados de COS extraídos da curva ajustada do perfil pedológico da área 2 (preditos).

<b>Prof.</b>	<b>COS Medido</b>	<b>COS Estimado</b>	<b>Prof.</b>	<b>COS Medido</b>	<b>COS Estimado</b>
cm	g kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>	cm	g kg <sup>-1</sup>	g kg <sup>-1</sup>
1	17,965	16,424	51	8,764	9,666
3	19,600	16,377	53	8,764	9,590
5	18,501	16,283	55	8,093	9,516
7	17,437	16,143	57	8,424	9,445
9	16,919	15,955	59	8,424	9,378
11	19,600	15,721	61	8,764	9,314
13	19,600	15,440	63	9,471	9,253
15	15,908	15,112	65	9,113	9,195
17	15,908	14,737	67	9,113	9,140
19	16,409	14,316	69	8,424	9,088
21	16,919	13,855	71	8,424	9,040
23	13,995	13,406	73	8,093	8,995
25	12,654	12,975	75	8,424	8,953
27	12,654	12,563	77	9,113	8,914
29	11,393	12,169	79	8,424	8,878
31	12,225	11,796	81	8,764	8,846
33	13,092	11,450	83	9,113	8,817
35	12,225	11,135	85	8,424	8,791
37	11,805	10,848	87	8,424	8,768
39	11,805	10,592	89	10,597	8,749
41	12,225	10,364	91	7,771	8,733
43	10,213	10,166	93	7,771	8,720
45	9,113	9,998	95	8,424	8,710
47	10,597	9,859	97	7,771	8,704
49	10,213	9,750	99	10,991	8,700

Observou-se também um bom ajuste do modelo aos dados COS medidos/observados da tabela 20. Os resultados apresentaram correlação linear significativa ( $p < 0,01$ ) com  $r$  0,9633 e regressão linear, com coeficiente de determinação de 0,928 (figura 23). O teste da qualidade do ajuste dos dados indicou ainda um erro padrão de 1,42.

Assim como observado para o estudo da área 1, os resultados obtidos para a área 2 confirmam que a função *Spline quadrática de igual área* é adequada para modelar a variação

contínua do COS mesmo com um pequeno número de dados, como no caso dos perfis pedológicos.



**Figura 23.** Gráfico da dispersão dos valores de COS e linha de tendência da regressão linear entre dados de COS medidos (P<sub>c2</sub>) e preditos (P<sub>p2</sub>).

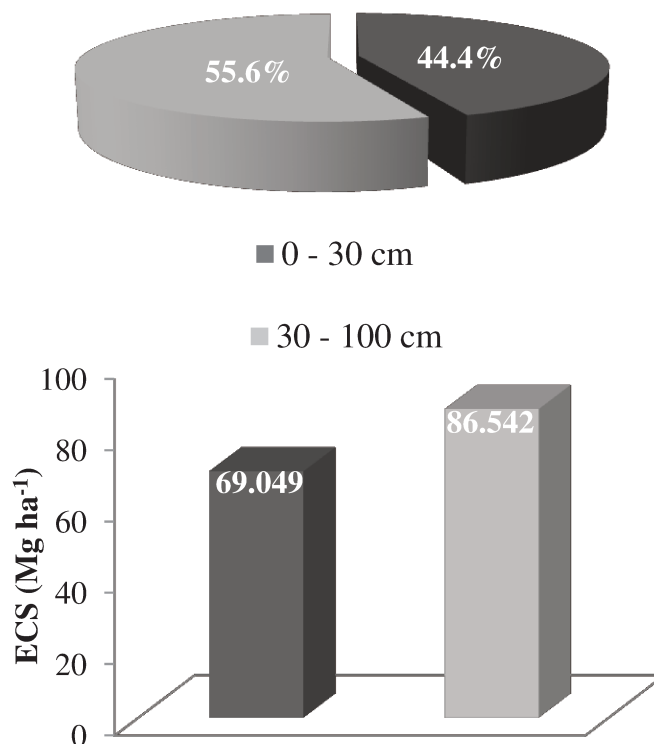
#### 4.2.3.3. Estoque de COS

O solo da área 2 apresentou 155,590 Mg ha<sup>-1</sup> de carbono estocado, distribuídos em profundidade de forma que o maior estoque individual ocorre no horizonte superficial (Ap1) com 49,196 Mg ha<sup>-1</sup> de carbono, conforme pode ser observado na tabela 21.

**Tabela 21.** Distribuição do estoque de carbono nos horizontes pedológicos da área 2 – P<sub>p2</sub>.

Horizonte	Camada	ECS
	cm	Mg ha <sup>-1</sup>
Ap1	0-20	49,196
Ap2	20-30	19,852
BA	30-50	30,913
Bw1	50-70	24,873
Bw2	70-100	30,756
<b>Total</b>		<b>155,590</b>

O horizonte pedológico onde o ECS é menor é o Ap2, com apenas 19,852 Mg ha<sup>-1</sup>. A distribuição do ECS em profundidade comprova a significativa contribuição dos horizontes mais profundos no estoque de carbono total do solo (Figura 24). O ECS na camada superficial 0-30 cm é 69,049 Mg ha<sup>-1</sup>, pouco mais de 10% inferior ao carbono estocado da camada compreendida entre 30 e 100 cm, de 86,542 Mg ha<sup>-1</sup>, conforme a figura 24.

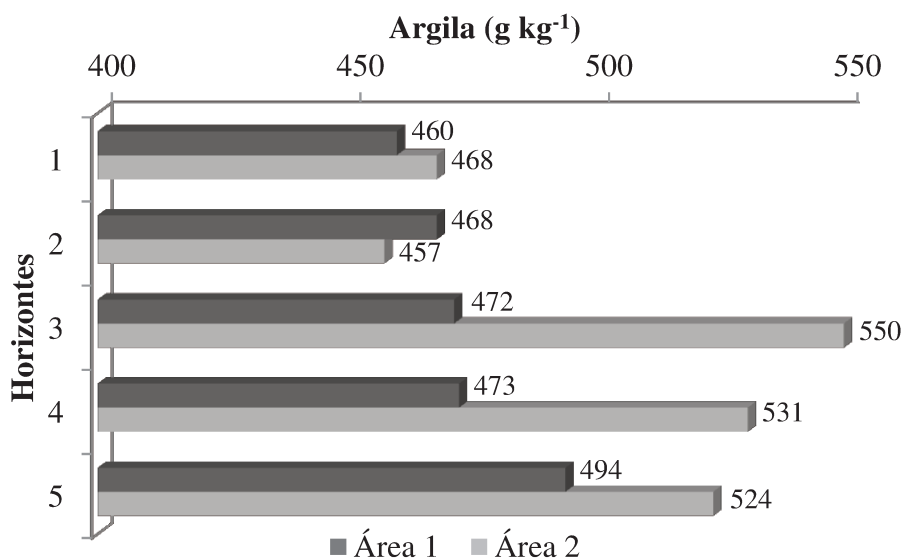


**Figura 24.** Gráfico de colunas e de pizza representando a distribuição do ECS nas camadas de 0 a 30 cm e 30 a 70 cm na área 2 (10 anos).

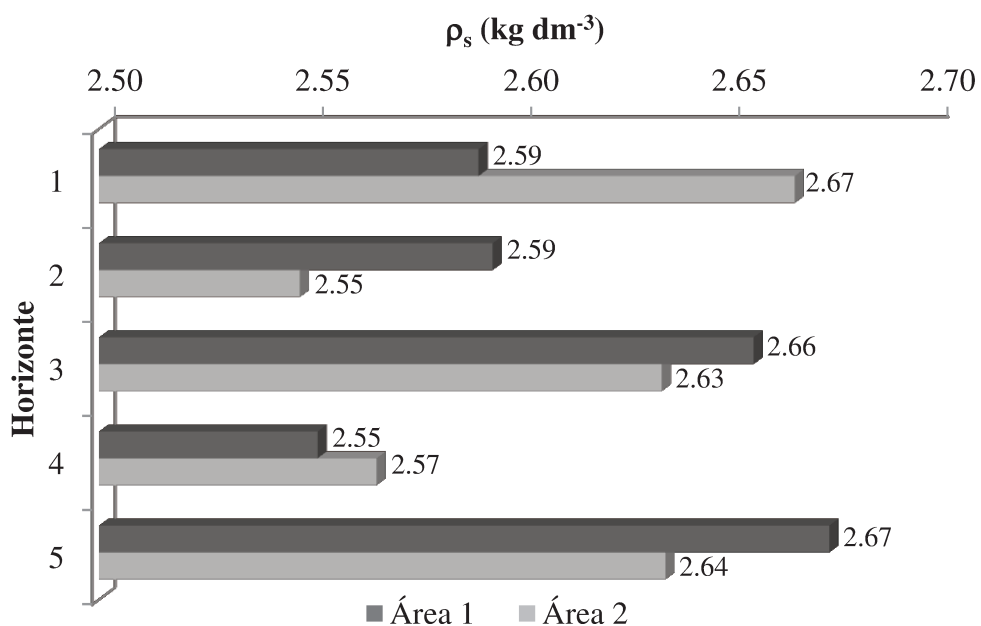
#### 4.2.4. Discussão agrupada dos resultados: Área 1 x Área 2

Os solos das áreas 1 e 2 pertencem à mesma unidade de mapeamento e à classe dos Latossolos Vermelhos distróficos de textura argilosa. Quanto aos teores de argila, as maiores diferenças ocorrem entre os horizontes subsuperficiais, em especial o Bw, sendo da ordem de no máximo 8%, mas mais comumente de 3 a 5% entre perfis (Figura 25). Com relação à granulometria do solo, TOGNON et al., (1998); ZINN et al. (2005; 2012) observaram que o teor de carbono orgânico apresenta correlação linear positiva com o teor de argila e de argila+silte.

Quanto à densidade das partículas ou dos sólidos do solo, os valores são muito similares para ambos os perfis (figura 26).

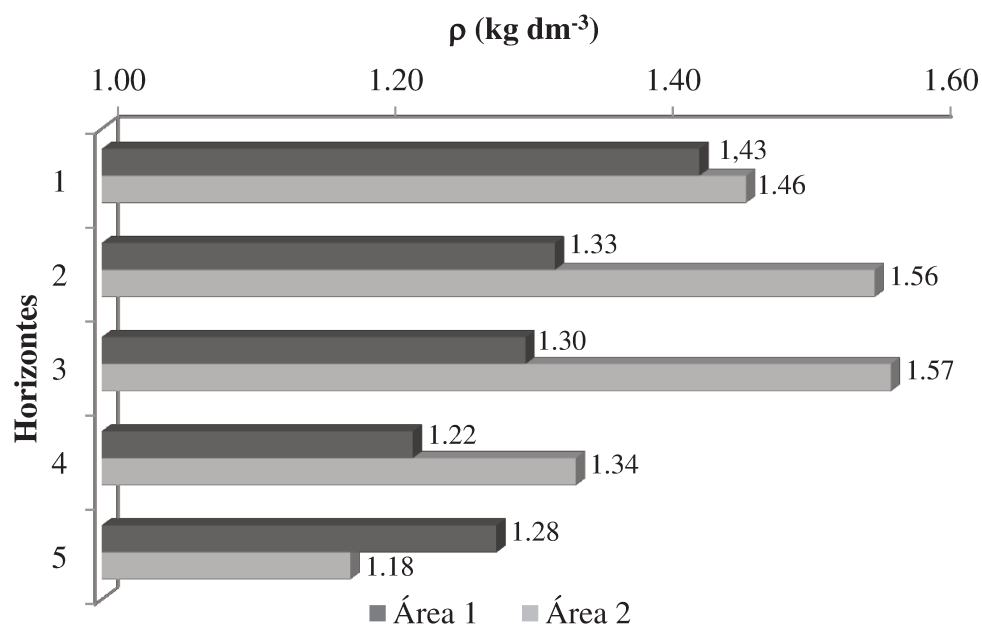


**Figura 25.** Gráfico comparativo dos teores de argila (g kg<sup>-1</sup>) nos horizontes pedológicos das áreas 1 e 2.



**Figura 26.** Densidade das partículas (kg dm<sup>-3</sup>) nos horizontes pedológicos das áreas 1 e 2.

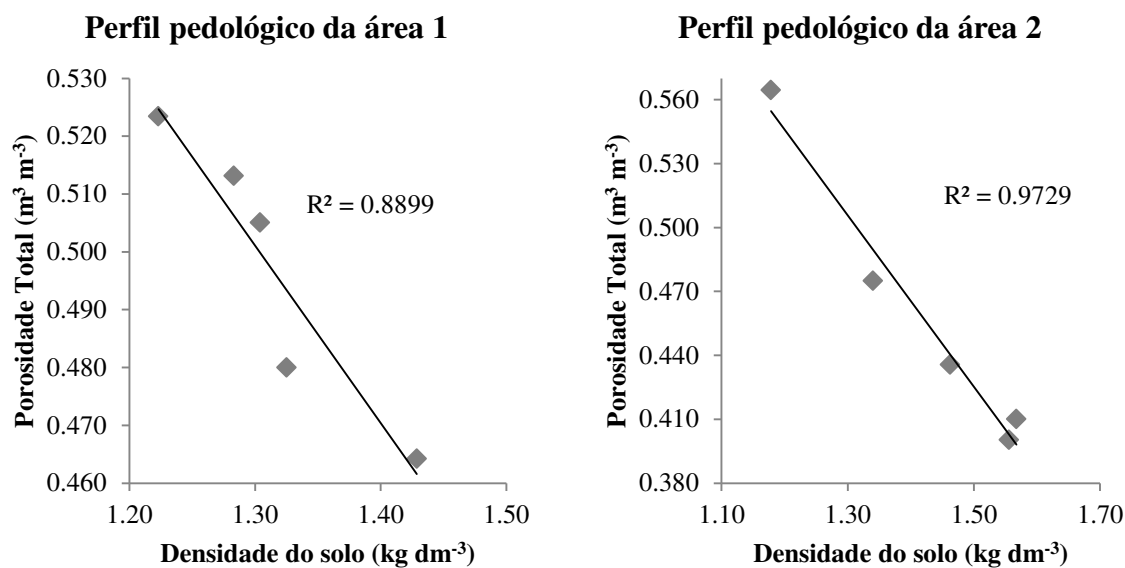
A densidade do solo tende a reduzir continuamente em profundidade no perfil da área 1, mas não no perfil da área 2 (figura 27), que apresenta uma pior condição da qualidade estrutural. A densidade do solo é importante no estudo do estoque de carbono do solo, visto que é um dos parâmetros considerados no seu cálculo, assim como a profundidade da camada e o conteúdo de COS. Na equação 1 e tabela 22 são apresentadas estas relações para os perfis pedológicos das áreas 1 e 2. É amplamente conhecida a relação direta e inversa da densidade do solo com a porosidade, em especial com a macroporosidade do solo, de tal forma que o aumento da densidade devido ao adensamento natural ou compactação do solo, reduzem o espaço poroso. Na figura 28 são apresentados os gráficos de dispersão e a linha de tendência da regressão linear entre a densidade do solo e a porosidade total para cinco horizontes dos perfis pedológicos das áreas 1 e 2. Maior correlação entre os dados foi encontrada para o perfil da área 2 ( $R^2=0,9729$ ) em relação ao da área 1 ( $R^2=0,8899$ ).



**Figura 27.** Densidade do solo (kg dm<sup>-3</sup>) nos horizontes pedológicos das áreas 1 e 2.

A água retida no solo em determinada tensão é característica específica de cada solo e é resultado da ação conjunta e complexa de vários fatores conforme já destacado por BEUTLER et al. (2002). Segundo GROHMANN e MEDINA (1962); REICHARDT (1987) fatores como o teor e mineralogia da fração argila, o teor de matéria orgânica, as diferenças na microestrutura afetam

a retenção de água no solo. SILVA et al. (1986) destacam que a compactação do solo seria outro fator.



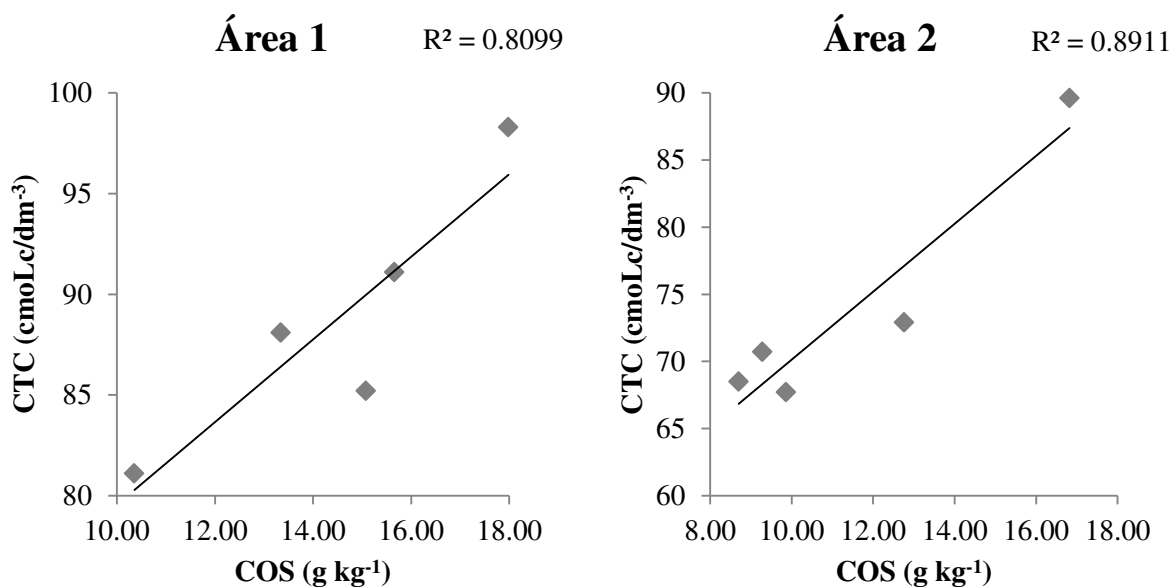
**Figura 28.** Relação entre a densidade do solo e a porosidade total do solo para os perfis das áreas 1 e 2.

A determinação da água disponível e facilmente disponível indicou que o perfil da área 1 apresenta maior conteúdo de água disponível e de água facilmente disponível do que o perfil da área 2 (Tabela 22), como resultado de uma qualidade estrutural superior em relação ao solo da área 2, mais degradado. Maior conteúdo de matéria orgânica, atestado por teores mais elevados de COS, também contribuem para a melhor qualidade estrutural, com efeito de *feed back*: melhor estrutura condiciona mais atividade biológica e maiores teores de matéria orgânica, que por sua vez auxiliam na resiliência e qualidade da estrutura. A relação entre retenção de água e matéria orgânica também foi discutida por SILVA et al. (2005).

**Tabela 22.** Conteúdo de água disponível e facilmente disponível nos horizontes pedológicos das áreas 1 e 2.

Horizontes	Perfil de solo da área 1		Perfil de solo da área 2	
	$\theta_{disp}$	$\theta_{fd}$	$\theta_{disp}$	$\theta_{fd}$
	mm		mm	
1	46,53	9,05	37,829	7,181
2	30,28	10,18	16,149	2,083
3	19,18	5,09	44,468	4,254
4	29,03	7,94	37,404	8,842
5	63,75	17,87	47,610	15,790
Total	188,76	50,13	183,46	38,15

A caracterização química, mostrada nas tabelas 8 (p. 50) e 16 (p. 63) dos perfis das área 1 e 2 respectivamente, indica que os solos são ácidos e de baixa saturação por bases (distróficos), mas sem problemas com o alumínio; os teores de fósforo e das bases trocáveis é baixo a muito baixo, em especial no perfil da área 1. BAYER e MIELNICZUK (2008) observaram relação direta e positiva entre os teores de COS e a CTC potencial em um Argissolo Vermelho escuro, com  $R^2=0,81$ ; conforme demonstrado na figura 29, também foi caracterizada essa relação entre COS e CTC, com  $R^2=0,8099$  para o perfil da área 1 e  $R^2=0,8911$  para os dados do perfil da área 2.

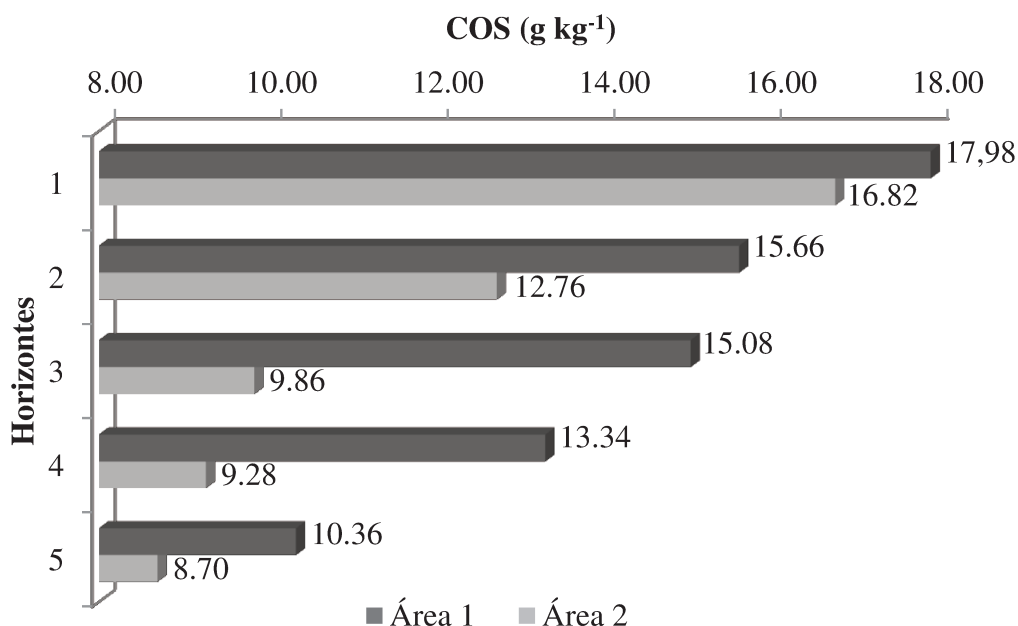


**Figura 29.** Gráfico de dispersão dos valores de COS e CTC e linha de tendência da regressão linear para os dados dos perfis das áreas 1 e 2.



Para comparação visual dos teores de COS nos horizontes dos perfis pedológicos das duas áreas foi construída a figura 30, onde fica claro que o perfil da área 1, manejada há 5 anos com colheita mecanizada da cana crua, contém mais carbono orgânico do que o da área 2, manejada há 10 anos. Ainda, em termos médios, conforme já foi mostrado na tabela 3 (p. 38) e figura 7 (p.39), os dados de COS do perfil experimental da área 1 determinam teor médio de  $20,36 \text{ g kg}^{-1}$  significativamente superior pelo teste de Tukey ( $p < 0,05$ ) ao perfil da área 2 ( $15,11 \text{ g kg}^{-1}$  de média).

Essa condição de maiores teores de COS no perfil da área 1 em relação ao da área 2 difere da esperada e não permite comprovar a hipótese inicial de que o tempo de adoção da colheita da cana crua, ao conservar a palhada da cultura sobre o solo, afeta favoravelmente a conservação do carbono no solo. Como já comentado, em virtude dos dados disponíveis, levanta-se duas outras hipóteses acerca de fatores determinantes dessa situação: a) o manejo diferenciado da vinhaça em cada área determina aportes distintos de matéria orgânica, com vantagem para o solo da área 1, onde a aplicação ocorreu sem diluição da vinhaça, enquanto que na área 2 a vinhaça foi antes diluída com água de lavagem da cana, e de ferramentas e máquinas; b) a condição presente de degradação da estrutura do solo da área 2, que decorre de compactação muito elevada do solo à custa do volume de macroporos, condiciona macroporosidade crítica ou inferior ao volume mínimo necessário (<10%) para manter condições adequadas de aeração do solo e de umidade, limitando ou prevenindo a atividade biológica do solo e, conseqüentemente a decomposição da matéria orgânica e a formação do húmus no solo.



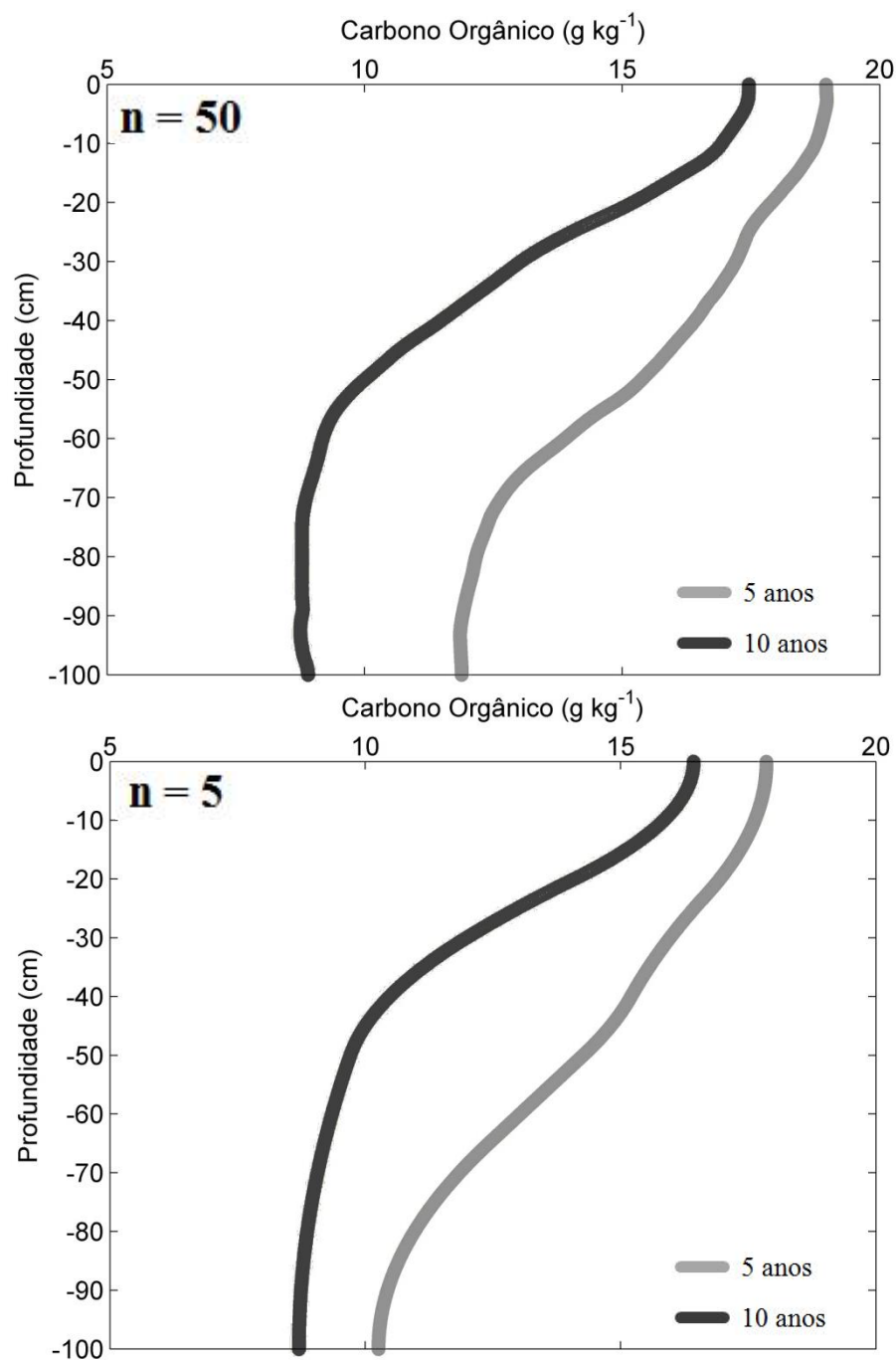
**Figura 30.** Teores de COS (g kg<sup>-1</sup>) determinados por via úmida nos horizontes pedológicos das áreas 1 e 2.

Quanto aos estoques de carbono no solo (ECS), tanto no perfil da área 1 como no perfil da área 2 foi constatada ser significativa a contribuição das camadas abaixo de 30 cm para o balanço do estoque de carbono total do solo. Observou-se que no perfil da área 1 a camada de 30-100 cm contém 60,2% de todo o estoque de carbono compreendido até 1 m, e para o perfil da área 2 este valor é também expressivo, de 55,6%. O ECS até 1,0 m de profundidade é maior no perfil da área 1, cujo ECS foi calculado como sendo de 185,021 Mg ha<sup>-1</sup>, enquanto que para o perfil da área 2 foi calculado em 155,590 Mg ha<sup>-1</sup> de carbono estocado, sendo 29,431 Mg ha<sup>-1</sup> inferior (Tabela 23). Vale destacar ainda que o ECS é influenciado não apenas pelo conteúdo de COS, mas também pela densidade do solo e espessura da camada conforme é mostrado na equação 1 e na tabela 23.

**Tabela 23.** Conteúdo de COS, densidade do solo, espessura da camada e o respectivo ECS nos horizontes dos perfis pedológicos das áreas 1 e 2.

Horizontes	Perfil pedológico da área 1				Perfil pedológico da área 2			
	COS g kg <sup>-1</sup>	$\rho$ kg dm <sup>-3</sup>	Espessura cm	ECS Mg ha <sup>-1</sup>	COS g kg <sup>-1</sup>	$\rho$ kg dm <sup>-3</sup>	Espessura cm	ECS Mg ha <sup>-1</sup>
1	17,98	1,43	23	59,089	16,82	1,46	20	49,196
2	15,66	1,33	17	35,278	12,76	1,56	10	19,852
3	15,08	1,30	10	19,666	9,86	1,57	20	30,913
4	13,34	1,22	15	24,476	9,28	1,34	20	24,873
5	10,36	1,28	35	46,512	8,70	1,18	30	30,756
Total	-	-	100	185,021	-	-	100	155,590

A modelagem da variação contínua do COS com os dados dos perfis pedológicos (n=5) usando a função *Spline quadrática de igual área* implementada no MATLAB mostrou-se eficiente quando comparada às curvas ajustadas aos perfis experimentais (n=50) das duas áreas.. Na figura 31 mostram-se curvas ajustadas aos dados dos perfis experimentais (n=50) e pedológicos (n=5) para as áreas 1 (colheita mecânica da cana crua há 5 anos) e 2 (colheita mecânica da cana crua há 10 anos).



**Figura 31.** Curvas da variação contínua do COS em profundidade das duas áreas: 1 - colheita mecanizada da cana crua há 5 anos e 2 - colheita mecanizada da cana crua há 10 anos.

A validação das modelagens, efetuada por meio de análises de correlação, de regressão e cálculo do erro padrão para as relações “dados do perfil experimental x dados do perfil pedológico” e “dados medidos x dados do perfil pedológico”, e indicaram em todos os casos a eficiência da função *Spline quadrática de igual área* na modelagem da variação contínua do COS

em profundidade usando pequeno número de dados (n=5), com todos os coeficientes de correlação e de determinação superiores a 0,90 (tabela 24). Conforme também pode ser observado na tabela 24, obteve-se um melhor ajuste para os dados do perfil da área 2 (10 anos), cujo teores de COS são menores.

**Tabela 24.** Coeficientes de correlação (r) de determinação ( $R^2$ ) e erro padrão das interações perfil experimental (n=50) x perfil pedológico (n=5) e dados medidos x perfil pedológico para as áreas 1 e 2.

Fatores	Perfil Experimental x Perfil Pedológico		Dados Medidos x Perfil Pedológico	
	Área 1	Área 2	Área 1	Área 2
	Coeficiente de correlação (r)	0,9976	0,9951	0,9511
Coeficiente de determinação ( $R^2$ )	0,9952	0,9902	0,9045	0,928
Erro Padrão	1,18	0,84	1,55	1,42

A importância dessa constatação e confirmação do que já vem sendo relatado na literatura é que isto abre uma possibilidade de utilização de dados disponíveis em levantamentos de solos, inclusive para uso com outros atributos e não somente com o COS. A primeira aplicação dessa teoria é a possibilidade de estimar o valor de atributos utilizados na diferenciação de solos e unidades de manejo em qualquer profundidade de interesse, abrindo possibilidades ao mapeamento digital do solo e de seus atributos.

O algoritmo desenvolvido para aplicação da função *Spline quadrática de igual área* para uso com o programa MATLAB, após correções, modificações e complementações ao modelo originalmente descrito por MALONE et al (2009), está pronta e disponível para uso na modelagem da variação contínua de atributos do solo em profundidade.

A continuidade deste trabalho deverá ser de testar a função para outros atributos do solo e de utilizar bancos de dados existentes de perfis de solo para fins de mapeamento digital.



## 5. CONCLUSÕES

A função *Spline quadrática de igual área* demonstrou ser precisa e acurada para uso na modelagem da variação contínua do COS a partir de um pequeno número de dados, recomendando-se seu uso para essa aplicação.

Não foi possível confirmar a hipótese de que o tempo de adoção da colheita mecanizada da cana crua afeta positivamente a conservação e o estoque de carbono no solo; outros dois fatores, diluição da vinhaça aplicada na área 2 e degradação da estrutura do solo dessa mesma área, podem ter mascarado o efeito do maior tempo de adoção da colheita mecanizada.

Na condição estudada, em Latossolo Vermelho distrófico, foi confirmada a importância da camada subsuperficial (30-100 cm) na conservação do carbono do solo, não podendo ser desconsiderada nos estudos de sustentabilidade do uso agrícola.





## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALVAREZ, R. Balance de Carbono en suelos cultivados de la Pampa Húmeda. In: **Boletín Especial de la Asociación Argentina de la Ciencia del suelo**. Buenos Aires: ALVAREZ, R (eds), 1999. p.33-36.

AMADO, T. J. C.; FABRIZZI, K.; NICOLOSO, R.S. O solo agrícola e o mercado internacional de carbono. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. (eds). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p. 625-635.

ARROUAYS, D.; PELISSIER, P. Changes in Carbon Storage in temperate humic loamy soils after forest clearing and continuous corn cropping in France. **Plant and Soil**, Dordrecht, v.160, n.2, p.215-223, 1994.

BALDOCK, J. A.; NELSON, P. N. Soil organic matter. In: SUMMER, M. E. (Ed.). **Handbook of soil science**. Georgia, USA: University of Georgia, p.B25-B84, 2000.

BALL, D. F. Loss-on-ignition as an estimate of organic matter and organic carbon in non-calcareous soils. **Journal of Soil Science**, London, v.15, p.84-92, 1964.

BALL-COELHO, B.; TIESSEN, H.; STEWART, J. W. B.; SALCEDO, I. B.; SAMPAIO, E. V. S. B. Residue management effects on sugarcane yield and soil properties in northeastern Brazil. **Agronomy Journal**, Madison, v.85, p.1004-1008, 1993.

BARROS, J. D. S.; SILVA, M. F. P. Cultivo sustentável da cana-de-açúcar. **Geoambiente online**, Jataí, n.17, p.23-30, 2011.

BATJES, N. H. Total carbon and nitrogen in the soils of the world. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.47, n.2, p.151-163, 1996.

BAYER, C.; MARTIN NETO, L.; MIELNICZUK, J.; PAVINATO, A.; DIEKOW, J. Carbon sequestration in two Brazilian Cerrado soil under no-till. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.86, p.237-245, 2006.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e função da matéria orgânica. In: SANTOS, G. A.; SILVA, L. S.; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. (eds). **Fundamentos da matéria orgânica do solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p.9-26.

BELTRAME, L. F. S.; TAYLOR, J. C. Causas e efeitos da compactação do solo. **Lavoura Arrozeira**, v.33, p.59-62, 1980.

BELTRAN, V.; BLASCO, A.; ESCARDINO, A.; NEGRE, F. Formation of black core during the firing of floor and wall tiles. **Interceram**, Freiburg, v.37, p.15-21, 1988.

BEN-DOR, E.; BANINI, A. Determination of organic matter content in arid zone soils using a simple “loss-on-ignition” method. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.20, p.1675-1695, 1984.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo**. 7ed. São Paulo: Ícone, 2010.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SOUZA, Z. M.; ANDRIOLI, I.; ROQUE, C. G. Retenção de água em dois tipos de Latossolos sob diferentes usos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.26, p.829-834, 2002.

BISHOP, T. F. A.; MCBRATNEY, A. B.; LASLETT, G. M. Modelling soil attribute depth functions with equal-area quadratic smoothing *Splines*. **Geoderma**, Amsterdam, v.91, p.27-45, 1999.

BLAIR, N. Impact of cultivation and sugar-cane green trash management on carbon fractions and aggregate stability for a Chromic Luvisol in Queensland, Australia. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.55, p.183-191, 2000.

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

BONILLA, D. P.; MARTÍNEZ, C. C.; VIÑAS, P.; FUENTES, J. A. Soil aggregation and organic carbon protection in a no-tillage chronosequence under Mediterranean conditions. **Geoderma**, Amsterdam, v.193-194, p.76-82, 2013.

BRODOWSKI, S.; AMELUNG, W.; HAUMAIER, L.; ABETZ, C.; ZECH, W. Morphological and chemical properties of black carbon in physical soil fractions as revealed by scanning electron microscopy and energy-dispersive X-ray spectroscopy. **Geoderma**, Amsterdam, v.128, n.1-2, p.116-129, 2005.

CALONEGO, J. C.; SANTOS, C. H.; TIRITAN, C. S.; CUNHA JÚNIOR, J. R. Estoques de carbono e propriedades físicas de solos submetidos a diferentes sistemas de manejo. **Revista Caatinga**, Mossoró, v.24, n.3, p.128-135, jul.-set., 2011.

CAMARGO, O. A.; MONIZ, A. C.; JORGE, J. A.; VALADARES, J. M. A. S. **Métodos de análise química, mineralógica e física de solos do Instituto Agrônomo de Campinas**. Campinas: Instituto Agrônomo de Campinas, 1986. (Boletim técnico, 106).

CAMBULE, A. H.; ROSSITER, D. G.; STOORVOGEL, J. J. A methodology for digital soil mapping in poorly-accessible areas. **Geoderma**, Amsterdam, v. 192, p.341-353, 2013.

CANÇADO, J. E. D.; SALDIVA, P. H. N.; PEREIRA, L. A. A.; LARA, L. B. L. S.; ARTAXO, P.; MARTINELLI, L. A.; ARBEX, M. A.; ZANOBETTI, A.; BRAGA, A. L. F. The impact of sugar cane-burning emissions on the respiratory system of children and the elderly. **Environmental Health Perspectives**, v.114, n.5, p.725-729, 2006.

CANELLAS, L. P.; BALDOTTO, M. A.; BUSATO, J. G.; MARCIANO, C. R.; MENEZES, S. C.; SILVA, N. M.; RUMJANEK, V. M.; CARLOS, A.; VELLOSO, X.; SIMÕES, M. L.; MARTIN-NETO, L. Estoque e qualidade da matéria orgânica de um solo cultivado com cana-de-açúcar por longo tempo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.2, p.331–340, 2007.

CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A.; VAN RAIJ, B.. Determinação da matéria orgânica. In: VAN RAIJ, B.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 2001.

CARVALHO, J. L. N.; AVANZI, J. C.; SILVA, M. L. N.; MELLO, C. R.; CERRI, C. E. P. Potencial de sequestro de carbono em diferentes biomas do Brasil. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, n.2, p. 277-289, 2010.

CAVALIERI, K.M.V.; TORMENA C.A.; VIDIGAL FILHO, P.S.; GONÇALVES, A.C.A.; COSTA, A.C.S. Efeitos de sistemas de preparo nas propriedades físicas de um Latossolo vermelho distrófico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, n.1, p.137-147, jan./fev. 2006.

CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P. **Agricultura e aquecimento global**. SBCS, v.23, p.40–44, 2007. (Boletim informativo).

CERRI, C. C.; MAIA, S. M. F.; GALDOS, M. V.; CERRI, C. E. P.; FEIGL, B. J.; BERNOUX, M. Brazilian greenhouse gas emissions: the importance of agriculture and livestock. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.66, n.6, p.831-843, 2009.

CERRI, C. E. P.; COLEMAN, K.; JENKINSON, D. S.; BERNOUX, M.; VICTORIA, R.; CERRI, C. C. Modeling soil carbon from forest and pasture ecosystems of Amazon, Brazil. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.67, n.6, p.1879-1887, 2003.

CERRI, C. E. P.; SPAROVEK, G.; BERNOUX, M.; EASTERLING, W. E.; MELILLO, J. M.; CERRI, C. C. Tropical agriculture and global warming: Impacts and mitigation options. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.64, p.83-99, 2007.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar 2011/2012**: terceiro levantamento – dezembro de 2011. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2011.

CONAB. Companhia Nacional de Abastecimento. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar 2012/2013**: primeiro levantamento – abril de 2012. Brasília: Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento, 2012.

CONCEIÇÃO, M.; MANZATTO, C. V.; ARAÚJO, W. S.; MARTIN NETO, L.; SAAB, S. C.; CUNHA, T. J. F.; FREIXO, A. A. **Estudo comparativo de métodos de determinação do teor de matéria orgânica em solos orgânicos do Estado do Rio de Janeiro**. 3ed. Brasília, Embrapa Solos, 1999.

COSER, T. R.; FIGUEIREDO, C. C.; RAMOS, M. L. G.; JANNUZZI, J.; MARCHÃO, R. L. Recuperação de carbono obtida por três métodos em frações da matéria orgânica de LATOSSOLO, sob consórcio milho-forrageiras, no Cerrado. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.28, p.91-97, 2012.

CHAPRA, S. C.; CANALE, R. P. **Numerical methods for engineers with personal computer applications**. EUA: McGraw-Hill International Editions, 1987.

DEAN JUNIOR, W. E. Determination of carbonate and organic matter in calcareous sediments and sedimentary rocks by loss on ignition: comparison with other methods. **Journal of Sedimentary Petrology**, New York, v.44, p.242-248, 1974.

DOMINY, C. S.; HAYNES, R. J.; VAN ANTWERPEN, R. Loss of soil organic matter and related soil properties under long-term sugarcane production on two contrasting soils. **Biology and Fertility of Soils**, New York, v.36, p.350-356, 2002.

DOURADO, T. A.; SILVA, L. F. S.; MARINHO, M. A. Performance of a reciprocal shaker in mechanical dispersion of soil samples for particle-size analysis. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.36, p.1131-1148, 2012.

DUXBURY, J. M.; SMITH, M. S.; DORAN, J. M. Soil organic matter as a source and a sink of plant nutrients. In: COLEMAN, D. C.; OADES, J. M.; UEHARA, G. (eds). **Dynamics of soil organic matter in tropical ecosystems**. Honolulu: University of Hawaii, 1989. p.33-67.

ELLERT, B. H.; BETTANY, J. R. Calculation of organic matter and nutrients stored in soil under contrasting management regimes. **Canadian Journal of Soil Science**, Manitoba, v.75, p.529-538, 1995.

EMBRAPA. Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária. **Manual de métodos de análise de solo**. 2ed. Centro Nacional de Pesquisa de Solos, 1997.

ERH, K. T. Application of *Spline* functions to soil science. **Soil Science**, v.114, p.333-338, 1972.

ESWARAN, H.; VANDENBERG, E.; REICH, P. Organic-carbon in soils of the world. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.57, p.192-194, 1993.

FAO. Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Soil carbon sequestration for improved land management**, Rome, 2001.

FEIGL, B. J.; MELILLO, J.; CERRI, C. C. Changes in the origin and quality of soil organic matter after pasture introduction in Rondonia (Brazil). **Plant and Soil**, Dordrecht, v.175, p.21-29, 1995.

FELLER, C.; BEARE, M. H. Physical control of soil organic matter dynamics in the tropics. **Geoderma**, Amsterdam, v.79, p.69-116, 1997.

FERREIRA, E. A. B.; RESCK, D. V. S.; GOMES, A. C.; RAMOS, M. L. G. Dinâmica do carbono da biomassa microbiana em cinco épocas do ano em diferentes sistemas de manejo do solo no cerrado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, p.1625-1635, 2007.

FRATTINI, C. T. A.; KALCKMANN, R. E. Correlação entre alguns métodos de determinação do carbono. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.2, p.259-261, 1967.

GALDOS, M. V.; CERRI, C. C.; CERRI, C. E. P. Soil carbon stocks under burned and unburned sugarcane in Brazil. **Geoderma**, Amsterdam, v.153, p.347-352, 2009.

GATTO, A.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; SILVA, I. R.; LEITE, H. G.; LEITE, F. P.; VILLANI, M. A. Estoques de carbono no solo e na biomassa em plantações de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, p.1069-1079, 2010.

GATTO, A.; BARROS, N. F.; NOVAIS, R. F.; SILVA, I. R.; MENDONÇA, E. S.; VILLANI, E. M. A. Comparação de métodos de determinação do carbono orgânico em solos cultivados com eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, p.735-740, 2009.

GIRARDELLO, V. C.; NICOLOSO, R. S.; LOVATO, T.; AMADO, T. J. C.; BRAGAGNOLO, J. Avaliação de Métodos de Cálculo de Estoques de Carbono Orgânico do Solo em Áreas de Integração Lavoura-Pecuária. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 31, 2007, Gramado. **Anais...** Gramado: SBCS, 2007.

GRAHAM, M. H.; HAYNES, R. J.; MEYER, J. H. Soil organic matter content and quality: Effects of fertilizer applications, burning and trash retention on a long-term sugarcane experiment in South Africa. **Soil Biology & Biochemistry**, Amsterdam, v.34, p.93-102, 2002.

GRIMM, R.; BEHRENS, T. Uncertainty analysis of sample locations within digital soilmapping approaches. **Geoderma**, Amsterdam, v.155, p.154–163, 2010.

GROHMANN, F.; MEDINA, H.P. Características de umidade dos principais solos do estado de São Paulo. **Bragantia**, Campinas, v.21, p.285-295, 1962.

HEINRICHS, R. Densidade do solo e das partículas. Universidade Estadual Paulista – Câmpus Dracena. 2010. Disponível em: [http://www2.dracena.unesp.br/graduacao/arquivos/solos/aula\\_3\\_densidade\\_do\\_solo\\_e\\_de\\_particulas.pdf](http://www2.dracena.unesp.br/graduacao/arquivos/solos/aula_3_densidade_do_solo_e_de_particulas.pdf). Acesso em: 8 de agosto de 2013.

HIEDERER, R. **Distribution of Organic Carbon in Soil Profile Data**. EUR 23980 EN. Luxembourg: Office for Official Publications of the European Communities, 2009.

HILINSKI, T. E. **Implementation of exponential depth distribution of organic carbon in the CENTURY Model**. CENTURY soil organic matter model user's manual. Department of Soil and Crop Sciences, Colorado State University: Fort Collins, 2001.

HOUGHTON, R. A. Changes in the storage of terrestrial carbon since 1850. In: LAL, R.; KIMBLE, J.; LEVINE, E.; STEWART, B. A. (eds). **Soils and global change**. Boca Raton: CRC Lewis Publishers, 1995. p.45-65.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate change 2007**. Fourth Assessment Report on climate change impacts, adaptation and vulnerability of the Intergovernmental Panel on Climate Change. Cambridge: Cambridge University, 2007.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Climate change 2001**. The scientific basis. Cambridge, Cambridge University Press, 2001.

IPCC. Intergovernmental Panel on Climate Change. **Guidelines for National Greenhouse Gas Inventories: Agriculture, Forestry and Other Land Use**. Institute for Global Environmental Strategies, Tokio, v.4, 2006.

JACKSON, M. L. **Análisis químico de suelos**. Barcelona: Omega, 1982.

JAUREGUI, M. A.; PARIS, Q. *Spline* response functions for direct and carry over effects involving a single nutrient. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.49, p.140–145, 1985.

JOBÁGY E. G.; JACKSON, R. B. The Vertical Distribution of Soil Organic Carbon and Its Relation to Climate and Vegetation. **Ecological Applications**, v.10, n.2, p.423-436, 2000.

JONES, M. J. The organic matter content of the savanna soils of west Africa. **Journal of Soil Science**, London, v.24, p.42-53, 1973.

JONES, R. J. A.; HIEDERER, B.; RUSCO, F.; MONTANARELLA, L. Estimating organic carbon in the soils of Europe for policy support. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.56, p.655-671, 2005.

KAMPF, N.; SCHNEIDER, P. Caracterização de solos orgânicos do Rio Grande do Sul: propriedades morfológicas e físicas como subsídios à classificação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.13, p.227-236, 1989.

KIEHL, E. J. **Manual de edafologia: relações solo-água**. São Paulo: Agronômica Ceres, 1979. 264 p.

LACOSTE, M.; MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B.; MICHOT, D.; VIAUD, V.; WALTER, C. High resolution 3D mapping of soil organic carbon in a heterogeneous agricultural landscape. **Geoderma**, Amsterdam, v.213, p.296–311, 2014.

LAL, R. **Encyclopedia of Soil Science**. New York, v.1, 2006.

LAL, R. Soil carbon sequestration to mitigate climate change. **Geoderma**, Amsterdam, v.13, p.01-22, 2004b.

LAL, R.; KIMBLE, J.; FOLLETT, R. F. **Methods for Assessment of Soil Degradation**. In: LAL, R.; BLUM, W. H.; VALENTINE, C.; STEWART, B. A. (eds). CRC Press: Boca Raton, 1997.

LAL, R.; KIMBLE, J.; LEVINE, E.; WHITMAN, C. Towards improving the global data base on soil carbon. In: LAL, R.; KIMBLE, J.; LEVINE, E.; STEWART, B. A. (eds). **Soils and global change**. Boca Raton: CRC Lewis Publishers, 1995. p.433-436.

LAL, R. Agricultural activities and the global carbon cycle. **Nutrient Cycling in Agroecosystems**, Dordrecht, v.70, p.103-116, 2004a.

LIBARDI, P. L. **Dinâmica da água no solo**. São Paulo: EDUSP, 2005. 335 p.

LOVATO, T. **Dinâmica do carbono e nitrogênio do solo afetada por preparos do solo, sistemas de cultura e adubo nitrogenado**. 133p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Faculdade de Agronomia, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 2001.

LUCA, E. F.; FELLER, C.; CERRI, C. C.; BARTHÈS, B.; CHAPLOT, V.; CAMPOS, D. C.; MANECHINI, C. Avaliação de atributos físicos e estoques de carbono e nitrogênio em solos com queima e sem queima de canavial. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.2, p.789-800, 2008.

LYN, W. C.; MCKINZE, W. E.; GROSMAN, R. B. Field laboratory tests for characterization of histosols. In: AANDAHAL, A. R. (eds). **Histosols: their characteristics, classification and use**. Madison: Soil Science Society of America, 1974. p.11-20.

MACHADO, P. L. O. A.; BERNARDI, A. C. C.; SANTOS, F. S. **Métodos de Preparo de Amostras e de Determinação de Carbono em Solos Tropicais**. Rio de Janeiro: Embrapa Solos, 2003.

MALONE, B. P.; MCBRATNEY, A. B.; MINASNY, B.; LASLETT, G. M. Mapping continuous depth functions of soil carbon storage and available water capacity. **Geoderma**, Amsterdam, v.154, p.138–152, 2009.

MAPA. Ministério da Agricultura, Pecuária e Abastecimento. **Setor sucroalcooleiro - produção de cana, açúcar e álcool**. Brasília, 2008.

MCBRATNEY, A. B.; BISHOP, T. F. A.; TELIATNIKOV, I. S. Two soil profile reconstruction techniques. **Geoderma**, Amsterdam, v.97, p.209–221, 2000.

MCBRATNEY, A. B.; SANTOS, M. L. M.; MINASNY, B. On digital soil mapping. **Geoderma**, Amsterdam, v.117, p.3-52, 2003.

MCCARTY, G. W.; REEVES, J. B.; YOST, R.; DORAISWAMY, P. C.; DOUMBIA, M. Evaluation of methods for measuring soil organic carbon in West African soils. **African Journal of Agricultural Research**, v.5, p.2169-2177, 2010.

MESTDAGH, I.; LOOTENS, P.; VAN CLEEMPUT O.; CARLIER, L. Soil organic carbon stocks in Flemish grasslands: how accurate are they? **Grass and Forage Science**, v.59, p.310–317, 2004.

MIKHAILOVA, E. A.; POST, C. J. Organic carbon stocks in the Russian Chernozem. **European Journal of Soil Science**, Oxford, v.57, p.330–336, 2006.

MILLIOLI, V. S. **Avaliação da potencialidade da utilização de surfactantes na biorremediação de solo contaminado com hidrocarbonetos de petróleo**. 200p. Tese (Doutorado em Tecnologia de Processos Químicos e Bioquímicos), Universidade Federal do Rio de Janeiro, Rio de Janeiro, 2009.

MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B.; SANTOS, M. L. M.; ODEH, I. O. A.; GUYON, B. Prediction and digital mapping of soil carbon storage in the lower Namoi valley. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v.44, p.233-244, 2006.

MOREIRA, F. M. S.; SIQUEIRA, J. O. **Microbiologia e Bioquímica do Solo**. 2ed. Lavras: UFLA, 2006.

NASCIMENTO, P. C.; LANI, J. L.; MENDONÇA, E. S.; ZOFFOLI, H. J. O.; PEIXOTO, H. T. M. Teores e características da matéria orgânica de solos Hidromórficos do Espírito Santo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, p.339-348, 2010.

NELSON, D. W.; SOMMERS, L. E. Total carbon, organic carbon and organic matter. In: SPARKS, D. L.; PAGA, A. L.; HELMKE, P. A.; LOEPPERT, R. H.; SOLTANPOUR, P. N.; TABATABAI, M. A.; JOHNSTON, C. T.; SUMMER, M. E. (eds). **Methods of soil analysis: chemical methods**. Part 3. Madison: Soil Science Society of America. 1996. p.961-1010.

NOBLE, A. D.; MOODY, P.; BERTHELSEN, S. Influence of changed management of sugarcane on some soil chemical properties in the humid wet tropics of north Queensland. **Australian Journal of Soil Research**, Collingwood, v.41, p.1133-1144, 2003.

OADES, J. M. The retention of organic matter in soils. **Biogeochemistry**, v.5, p.35-70, 1988.

ODGERS, N. P.; LIBOHOVA, Z. THOMPSON, J. A. Equal-area *Spline* functions applied to a legacy soil database to create weighted-means maps of soil organic carbon at a continental scale. **Geoderma**, Amsterdam, v.189–190, p.153–163, 2012.

ORLANDO FILHO, J.; ROSSETO, R.; MURAOKA, T.; ZOTELLI, H. B. Efeitos do sistema de despalha (cana crua x cana queimada) sobre algumas propriedades do solo. **STAB-Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.16, p.30-34, 1998.

PEREIRA, J. S.; JESUS, T. S.; OLSZEWSKI, N.; MENDES, A. M. S.; GRANJA, G. P. Porosidade e densidade de solos sob uso agrícola no município de Sobradinho – BA. In: Congresso Brasileiro de Ciência do Solo, 34, 2013, Florianópolis. **Anais...** Florianópolis: SBCS, 2013.

PIMENTEL, L. C. F.; CHAVES, C. R.; FREIRE, L. A. A.; AFONSO, J. C. O inacreditável emprego de produtos químicos perigosos no passado. **Química Nova**, São Paulo, v.29, p.1138-1149, 2006.



PONCE-HERNANDEZ, R.; MARRIOTT, F. H. C.; BECKETT, P. H. T. An improved method for reconstructing a soil profile from analyses of a small number of samples. **Journal of Soil Science**, London, v.37, p.455–467, 1986.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo, 1987. 188p.

REICHARDT, K.; TIMM, L. C. **Solo, planta e atmosfera: conceitos, processos e aplicações**. Barueri: Manole, 2004. 478 p.

REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; BRAIDA, J.A. Qualidade dos solos e sustentabilidade de sistemas agrícolas. **Ciência & Ambiente**, Santa Maria, v.27, p.29-48, 2003.

RHEINHEIMER, D. S.; CAMPOS, B. C.; GIACOMINI, S. J.; CONCEIÇÃO, P. C.; BORTOLUZZI, E. C. Comparação de métodos de determinação de carbono orgânico total no solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, p.435-440, 2008.

RICHARDS, L. A. Pressure-membrane apparatus, construction and use. **Agronomy Engineering**, Madison, v.28, p.451-454, 1947.

RODELLA, A.; ALCARDE, J. C. Avaliação de materiais orgânicos empregados como fertilizantes. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.51, p.556-562, 1994.

SANDI, J. T. T. **Estoque de carbono no solo sob diferentes coberturas vegetais, Chapecó-SC**. 83p. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) - Universidade Comunitária da Região de Chapecó, Chapecó, 2009.

SANTOS, R. D.; LEMOS, R. C.; SANTOS, H. G.; KER, J. C.; ANJOS, L. H. C.; SHIMIZU, S. H. **Manual de descrição e coleta de solo no campo**. 6ed. Revisada e Ampliada. Viçosa: SBCS, 2013. 100p.

SÃO PAULO. **Lei nº 11.241 de 19 de setembro de 2002**. Disponível em: <[http://www.sigam.ambiente.sp.gov.br/sigam2/Repositorio/24/Documentos/Lei%20Estadual\\_11\\_241\\_2002.pdf](http://www.sigam.ambiente.sp.gov.br/sigam2/Repositorio/24/Documentos/Lei%20Estadual_11_241_2002.pdf)>, acesso em: 21/02/2013.

SATO, J. H. **Métodos para determinação do carbono orgânico em solos do cerrado**. 90p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade de Brasília, Brasília, 2013.

SCANDRETT, J.; OLIVER, G.; DOYLE, R. **Soil carbon depth functions under different land uses in Tasmania**. 2010. World Congress of Soil Science, 19, Brisbane. <<http://www.lds.go.th/swcst/Report/soil/.%5Csymposium/pdf/4.2.1.pdf#page=47>>, 21/02/2013.

SCHUMACHER, B. A. **Methods for the determination of total organic carbon (TOC) in soils and sediments**. United States Environmental Protection Agency Environmental, Sciences Division, National Exposure Research Laboratory. NCEA-C- 1282 EMASC-001, 2002.

SEGNINI, A. **Estrutura e estabilidade da matéria orgânica em áreas com potencial de sequestro de carbono no solo**. 127p. Tese (Doutorado em Ciências - Química Analítica) - Instituto de Química de São Carlos, Universidade de São Paulo, São Paulo, 2007.

SHANG, C.; TIESSEN, H. Organic matter lability in a tropical oxisol: Evidence from shifting cultivation, chemical oxidation, particle size, density, and magnetic fractionations. **Soil Science**, Hagerstown, v.162, p.795-807, 1997.

SILVA, A. C.; TORRADO, P. V.; ABREU JUNIOR, J. S. Métodos de quantificação da matéria orgânica do solo. **Revista Universidade de Alfenas**, Alfenas, v.5, p.21-26, 1999.

SILVA, A. J. N.; CABEDA, V. S. M.; LIMA, F. W. F. J. Efeito de sistemas de uso e manejo nas propriedades físico-hídricas de um Argissolo Amarelo de tabuleiro costeiro. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa-MG, v. 29, n.6, p. 833-842, 2005.

SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L.; CAMARGO, O. A. Influência da compactação nas propriedades físicas de dois Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 10, p. 91-95, 1986.

SILVA, F. A. S. E.; AZEVEDO, C. A. V. **Principal Components Analysis in the Software Assistat-Statistical Attendance**. In: WORLD CONGRESS ON COMPUTERS IN AGRICULTURE, 7, Reno-NV-USA: American Society of Agricultural and Biological Engineers, 2009.

SILVA, L. F. S. **Atributos físicos e micromorfológicos da estrutura de um Latossolo Vermelho distroférrico típico submetido ao manejo agrícola**. 214p. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2011.

SIQUEIRA, J. O. **Biologia do solo**. Lavras: ESAL/ FAEPE, 1993.

SIX, J.; FELLER, C.; DENEFF, K.; OGLE, S. M.; MORAES, J. C.; ALBRECHT, A. Soil organic matter, biota and aggregation in temperate and tropical soils - Effects of no-tillage. **Agronomie**, v.22, p.755-775, 2002.

SOON, Y. K.; ABOUD, S. A. Comparison of some methods for soil organic carbon determination. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.22, p.943-954, 1991.

SOTOMAYOR, J. F. M. **Métodos de amostragem de solos para a determinação de carbono em três ambientes**. 102p. Dissertação (Mestrado em Ecologia Aplicada) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2009.

SOUZA, Z. M.; LEITEI, L. A.; BEUTLERI, A. N. Comportamento de atributos físicos de um Latossolo Amarelo sob agroecossistemas do Amazonas. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.24, n.3, p.654-662, set./dez., 2004.

SOUZA, Z. M.; PRADO, R. M.; PAIXÃO, A. C. S.; CESARIN, L. G. Sistemas de colheita e manejo da palhada de canade-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.40, p.271-278, 2005.

STEVENSON, F. J. **Humus chemistry: genesis, composition, reactions**. 2ed. New York: J. Wiley, 1994.

SULAEMAN, Y.; MINASNY, B.; MCBRATNEY, A. B.; SARWANI, M.; SUTANDI, A. Harmonizing legacy soil data for digital soil mapping in Indonesia. **Geoderma**, Amsterdam, v.192, p.77-85, 2013.

SUNDQUIST, E. T. The global carbon dioxide budget. **Science**, v.259, n.5097, p.934-941, 1993.

SZAKÁCS, G. G. J. **Avaliação das potencialidades dos solos arenosos sob pastagens Anhembi**. 128p. Dissertação (Mestrado em Energia Nuclear na Agricultura) - Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2003.

TABATABAI, M. A. Soil organic matter testing: an overview. In: MAGDOFF, F. R.; TABATABAI, M. A.; HANLON JUNIOR, E. A. (eds). **Soil organic matter: analysis and interpretation**. Madison: Soil Science Society of America, 1996. p. 1-9.

TADANO, Y. S.; UGAYA, C. M. L.; FRANCO, A. T. Método de regressão de Poisson: metodologia para avaliação do impacto da poluição atmosférica na saúde populacional. **Ambiente & Sociedade**, Campinas, v.7, n.2, p.241-255, 2009.

TAMARGO, J. Using equal-area quadratic *Splines* to compute depth-weighted averages of soil chemical parameters. 2011. Syracuse University. <[http://www.uvm.edu/~nesmc/2011/Tamargo\\_Depth\\_Weighted\\_Avg\\_March\\_8.pdf](http://www.uvm.edu/~nesmc/2011/Tamargo_Depth_Weighted_Avg_March_8.pdf)>, 21/02/2013.

TEDESCO, M. J.; GIANELLO, C.; BISSANI, C. A.; BOHNEN, H.; VOLKWEISS, S. J. **Análise de solo, plantas e outros materiais**. 2ed. Porto Alegre: Universidade Federal do Rio Grande do Sul, 1995.

THENG, B. K. G. **Em Soil Structure and Aggregate Stability**. Seminar Proceedings. Institute of Irrigation and Salinity Research: Tatura, Australia, 1987.

TOGNON, A. A.; DEMATTÊ, J. L. I.; DEMATTÊ, J. A. M. Teor e distribuição da matéria orgânica em latossolos das regiões da Floresta Amazônica e dos Cerrados do Brasil Central. **Scientia Agricola**, v.55, n.3, p.343-354, 1998.

TOMASI, C. A.; INDA, A. V.; DICK, D. P. Substâncias húmicas em Latossolo subtropical de altitude sob usos e manejos distintos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.42, n.12, 2012.

TORMENA, C. A.; BARBOZA, M. C.; COSTA, A. C. S.; GONÇALVES, C. A. Densidade, porosidade e resistência à penetração em Latossolo cultivado sob diferentes sistemas de preparo do solo. **Revista Scientia Agricola**, São Paulo, v.59, n.4, p.795-801. 2002.

USDA. United States Department of Agriculture. Soil Survey Division. Soil Conservation Service. Soil Survey Staff. **Soil survey manual**. Washington, D.C., 1993. 437p. Revised and enlarged edition. (USDA. Agriculture Handbook, 18).

VAN LIER, Q. J. Disponibilidade de água para as plantas. In: VAN LIER, Q. J. (Ed.) **Física do Solo**. Viçosa: SBCS, 2010. 298 p.

VAN RAIJ, B.; ANDRADE, J. C.; CANTARELLA, H.; QUAGGIO, J. A. **Análise química para avaliação da fertilidade de solos tropicais**. Campinas: Instituto Agronômico de Campinas, 2001.

VILLEGAS, R.; CHANG, R. M.; GONZÁLES, M. Sostenibilidad del agroecosistema y evolución de características biogeoquímicas en estudios de larga duración con caña de azúcar. **Cuba Caña**, v.2, p.11-17, 1998.

WALKLEY, A.; BLACK, I. A. An examination of the Degtjareff method for determining soil organic matter and a proposed modification of the chromic acid titration method. **Soil Science**, Baltimore, v.37, n.1, p.29-38, 1934.

WEBSTER, R. **Mathematical treatment of soil information**. In 'Proceedings of the 11th International Congress of Soil Science'. Edmonton, v.3, p. 161–190, 1978.

WENDLANDT, W. W. M. **Thermal analysis**. New York: Wiley, 1986.

WENDLING, B.; VINHAL-FREITAS, I. C.; OLIVEIRA, R. C.; BABATA, M. M; BORGES, E. N. Densidade, agregação e porosidade do solo em áreas de conversão do cerrado em floresta de pinus, pastagem e plantio direto. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.28, Supplement 1, p.256-265, 2012.

WOOD, A. W. Management of crop residues following green harvesting of sugarcane in north Queensland. **Soil & Tillage Research**, Amsterdam, v.20, p.69-85, 1991.

YEOMANS, J. C.; BREMNER, J. M. A rapid and precise method for routine determination of organic carbon in soil. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, New York, v.19, p.1467-1476, 1988.

ZINN, Y. L.; GUERRA, A. R.; SILVA, A. C.; MARQUES, J. J.; OLIVEIRA, G. C.; CURI, N. Perfis de carbono orgânico do solo nas regiões Sul e Serra do Espinhaço Meridional, Minas Gerais: modelagem em profundidade. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.36, p.1395-1406, 2012.

ZINN, Y. L.; LAL R.; RESCK, D. V. S. Texture and organic carbon relations described by a profile pedotransfer function for Brazilian Cerrado soils. **Geoderma**, Amsterdam, v.127, p.168–173, 2005.

**APÊNDICE ÚNICO.** Algoritmo com a função *Spline quadrática de igual área* adaptado para a modelagem da variação contínua de atributos do solo.

```
%Spline de igual área para modelagem de atributos do solo em profundidade
```

```
%Inicialização
```

```
clear all %Apaga todas as variáveis do workspace  
close all %Fecha todas as janelas de figuras  
clc %Limpa o command window
```

```
%Carrega arquivo de dados:
```

```
%load('DB_PonceHernandez.mat');  
load('Input.mat');
```

```
%Variáveis de entrada
```

```
X = X; %Pontos limites dos intervalos (profundidade). (comprimento n+1)  
Y = Y; %Valor do atributo Y em cada intervalo. (comprimento n)
```

```
if eq((length(X)-length(Y)),1)
```

```
disp('Dados de entrada compatíveis');
```

```
else
```

```
disp('Dados incompatíveis, tamanho de inputX necessita ser 1 registro maior que o tamanho de inputY');
```

```
break;
```

```
end
```

```
lambda_ini =0.01; %Valor inicial de lambda
```

```
lambda_final = 0.01; %Valor final de lambda obs: decremento é /10.
```

```
%Variáveis calculadas
```

```
n=length(Y); %Número de intervalos.  
I=eye(n); %Matriz identidade de tamanho n.
```

```
%Inicializando variáveis; isto é feito para aumentar a velocidade quando a variável está dentro de um laço (no caso o 'for' abaixo).
```

```
R(n-1,n-1) = 0;
```

```
Q(n-1,n) = 0;
```

```
%Calculando e gravando os valores nas matrizes R e Q:
```

```
for i=1:n-2
```

```
R(i,i)=2*(X(i+2)-X(i));
```

```
R(i+1,i)=X(i+2)-X(i+1);
```

```
R(i,i+1)=X(i+2)-X(i+1);
```

```
Q(i,i)=-1;
```

```
Q(i,i+1)=1;
```

```
end
```

```
R(n-1,n-1)=2*(X(n+1)-X(n-1));
```

```
Q(n-1,n-1)=-1;
```

```
Q(n-1,n)=1;
```

```
%% Declarando sistema
```

```

k=1;      %Ponteiro para registro do lambda no vetor.

lambda = lambda_ini;

while lambda>=lambda_final

    t1=Q';          %Para ter certeza que o MATLAB está calculando da ordem
    %correta, a matriz Q foi transposta e armazenada em 't1';
    t2=(inv(R))';  %Para ter certeza que o MATLAB está calculando da ordem
    %correta, a matriz R foi invertida, depois transposta e armazenada em
    't2';
    temp = I+6*n*lambda*t1*t2*Q;    %O lado direito da equação foi calculado
    %e armazenado na variável 'temp'

    %Calculando a matriz F a partir dos resultados anteriores
    F = inv(temp)*Y;
    m = length(F);

    %Calculando B a partir dos resultados anteriores
    B = 6*inv(R)*Q*F;

    Cm(m+1)=0;      %Adiciona o valor zero à última posição do vetor Cm.

    for i=2:m        %Gera o vetor Cm que tem o valor zero na primeira posição
    e nas seguintes o valor de B.
        Cm(i)=B(i-1); %Copia todos os valores de B para Cm.
    end

    coef(length(F),3) = 0; %Inicializando a matriz coef.
    valorMedio(length(F),6)=0;%Inicializar a matriz de valor médio.

    for i=1:m
        %Carrega valores para o ponto i e i+1;
        fi = F(i);
        bil = Cm(i+1);
        bi = Cm(i);
        xi = X(i);
        xil = X(i+1);

        %Equação C+B*X+A*X^2
        %Calcula os coeficientes
        coef(i,1)= fi - bi*xi + (xi - xil)*(bi/3 + bil/6) + (xi^2*(bi -
bil))/ (2*xi - 2*xil); %Coef C
        coef(i,2)= bi - (2*xi*(bi - bil))/ (2*xi - 2*xil); %Coef B
        coef(i,3)= (bi - bil)/ (2*xi - 2*xil); %Coef A

        %Calcula a integral da área
        valorMedio(i,k)=((coef(i,3)*(xil^3-xi^3))/3 + (coef(i,2)*(xil^2-
xi^2))/2 + (coef(i,1)*(xil-xi)))/(xil-xi);
        erroQuad(i,k)=(Y(i)-valorMedio(i,k))^2;
    end
end

```

```

%% Testar o resultado

resultado(n-1,2,6)=0; %Inicialização da matriz
erro(n,6)=0;          %Inicialização da matriz erro

for i=2:n
    %Calcula o valor no ponto utilizado o polinômio à esquerda:
    resultado(i-1,1,k)=coef(i-1,1)+coef(i-1,2)*X(i)+coef(i-1,3)*X(i)^2;
    %Calcula o valor no ponto utilizado o polinômio à direita:
    resultado(i-1,2,k)=coef(i,1)+coef(i,2)*X(i)+coef(i,3)*X(i)^2;
end
%Calcula o erro entre o valor amostrado (Y) e o valor calculado (F) -
%valores médios do horizonte:
erro(:,k)=abs(Y-F);
%Calcula erro com base nos valores pontuais de transição dos horizontes
%coletados no campo:
if (isempty(who('ptos_experimentais')))
    disp('ptos_experimentais não carregado - erro não calculado');
else
    erroCampo(:,k)=abs(resultado(:,1,k)./ptos_experimentais(2:n,2));
end

k=k+1; %Incrementa o ponteiro

%% Gerar gráfico da função

%Inicializar coeficientes com valores do primeiro polinômio:
A = coef(1,3);
B = coef(1,2);
C = coef(1,1);
Yj = Y(1);
%Iniciliza contadores:
i=1;
j=1;
%Inicializa matrizes:
y(106)=0;
x(106)=0;
conferencia(106,3)=0;

for ix=0:0.1:X(n+1)
    if ix>X(i+1)
        i=i+1; %Incrementa i (passa para o próximo intervalo
        A = coef(i,3); %Carrega os coeficientes do próximo intervalo
        B = coef(i,2);
        C = coef(i,1);
        Yj = Y(i);
    end

    y(j)=A*ix^2+B*ix+C; %Calcula valor da função y no ponto x
    x(j)=ix;           %Guarda respectivo valor de x
    conferencia(j,1)=A; %Matriz para conferência dos valores dos
coeficientes
    conferencia(j,2)=B;
    conferencia(j,3)=C;

```

```

        y_med(j)=Yj;          %Guarda o valor médio do horizonte no respectivo
valor de x
        j=j+1;
    end

    figure();                %Cria nova figura
    hold on                  %Indica que a nova figura como ativa, que irá receber os
comandos.
    plot(y,-x,'o');         %Desenha o gráfico dos valores de y em função de x com o
marcador 'o' azul.
    ylabel('Profundidade (cm)'); %Legenda do eixo x
    xlabel('Carbono Orgânico (g kg-1)'); %Legenda do eixo y
    title(horzcat('Lambda ',num2str(lambda))); %Título da figura - escreve o
valor de lambda
    if (isempty(who('ptos_experimentais')))
        disp('ptos_experimentais não carregado - não adicionado à figura');
    else
        plot(ptos_experimentais(:,2),-ptos_experimentais(:,1),'*r'); %Desenha
o gráfico dos
    end
    %valores pontuais coletados experimentalmente com o marcador '*'
    %vermelho

    lambda=lambda/10;      %Atualiza valor de lambda

end

RMSE=((1/n)*sum(erroQuad)).^0.5 %Calcula a raiz média quadrada do
%erro entre os valores médios medidos e preditos.

%% Cálculo do erro em função de pontos externos

valid = zeros(length(medida_ext),3); %Inicializa matriz de erro de validação
com dados externos

largura_ptos = (max(medida_ext(:,1))-min(medida_ext(:,1)))/length(medida_ext);
% Distância física entre os pontos no conjunto de dados experimentais [cm]
% Para o resultado da coluna 4 da matriz valid ser coerente, os pontos
% experimentais devem ser uniformemente espaçados (incremento de
% profundidade constante).

for i=1:length(medida_ext)

    k = busca(X,medida_ext(i,1));
    valid(i,1) =
coef(k,1)+coef(k,2)*medida_ext(i,1)+coef(k,3)*medida_ext(i,1)^2; %Valor
calculado pela spline de treinamento (simulado)
    valid(i,2) = valid(i,1) - medida_ext(i,2); % Diferença entre o simulado
menos o medido
    valid(i,3) = valid(i,2)/medida_ext(i,2); %Razão da diferença pelo
medido.
    valid(i,4) = valid(i,3)*largura_ptos; %Área do intervalo de cada
ponto amostrado
end

```



```

end

%% Rotina para calcular a diferença entre duas splines

load('Spline01.mat'); %Valor real
load('Spline02.mat'); %Valor estimado

% No arquivo Spline01 deve conter:
% X1: limites das camadas da spline01
% coef1: coeficientes da spline 01

% No arquivo Spline02 deve conter:
% X2: limites das camadas da spline02
% coef2: coeficientes da spline 02

dx = 0.1; % Largura do diferencial de profundidade

Nel = (max(X1)-min(X1))/dx;

idx = min(X1);

valores(Nel,5)=0;

for i=1:Nel

    valores(i,1) = idx;      %Profundidade

    k1 = busca(X1,idx);
    valores(i,2) = coef1(k1,1)+coef1(k1,2)*idx+coef1(k1,3)*idx^2;      %Valor
    calculado da spline01 na posição idx
    k2 = busca(X2,idx);
    valores(i,3) = coef2(k2,1)+coef2(k2,2)*idx+coef2(k2,3)*idx^2;      %Valor
    calculado da spline02 na posição idx

    valores(i,4) = valores(i,3)-valores(i,2);      %Estimado - real

    valores(i,5) = valores(i,4)/valores(i,2);      %(estimado - real)/real

    valores(i,6) = valores(i,4)*dx;      %Área do erro entre as curvas vezes o
    diferencial de profundidade

    idx = idx + dx;      %Incrementa referencial de comprimento

end

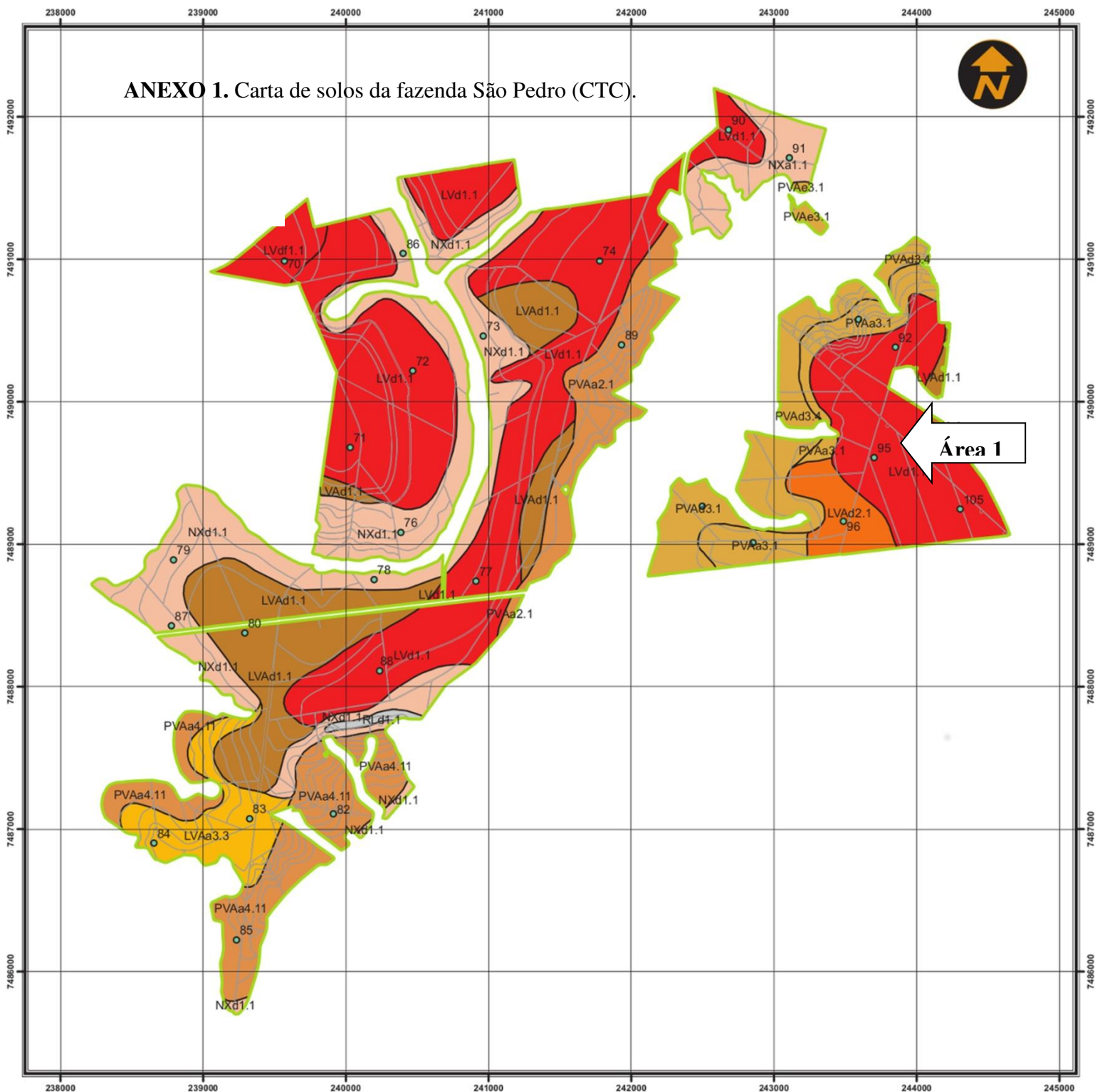
disp('Soma da área do erro');
sum(valores(:,6))

disp('Soma da área do erro absoluto');
sum(abs(valores(:,6)))

```



# ANEXO 1. Carta de solos da fazenda São Pedro (CTC).



## Unidades de Mapeamento, Descrição e Área

- LVd1.1, LATOSSOLO VERMELHO Distrófico, textura argilosa, (123,37ha)
- LVdf1.1, LATOSSOLO VERMELHO Distroférrico, textura argilosa. (21,87ha)
- LVAd1.1, LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, texi
- LVAA3.3, LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Álico, textura média 2 ou média 2/média 1 ou média 2/argilosa, argilúvico, (53,06ha)
- LVAd2.1, LATOSSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, textura média 1 ou média 1/argilosa, (29,06ha)
- NXa1.1, NITOSSOLO HÁPLICO Álico, textura argilosa, (36,12ha)
- NXd1.1, NITOSSOLO HÁPLICO Distrófico, textura argilosa, (95,21ha)
- PVAa2.1, ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Álico, textura média1/argilosa, (66,25ha)
- PVAa3.1, ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Álico, textura média 2 ou média 2/média 1 ou média 2/argilosa, (44,83ha)
- PVAa4.11, ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Álico, textura arenosa/média 2, arênico, (96,29ha)
- PVAd3.1, ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, textura média 2 ou média 2/média 1 ou média 2/argilosa, (49,55ha)
- PVAd3.4, ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico, textura média 2 ou média 2/média 1 ou média 2/argilosa, SB<1, (27,79ha)
- PVAe3.1, ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Eutrófico, textura média 2 ou média 2/média 1 ou média 2/argilosa, (2,93ha)
- RLd1.1, NEOSSOLO LITÓLICO Distrófico fragmentário, textura argilosa, (3,87ha)

## CARTA DE SOLOS

IRACEMA - 029



Fazenda: São Pedro

Código da Fazenda: 10051

Safra: 0809

Responsável Técnico: Felipe Haenel Gomes

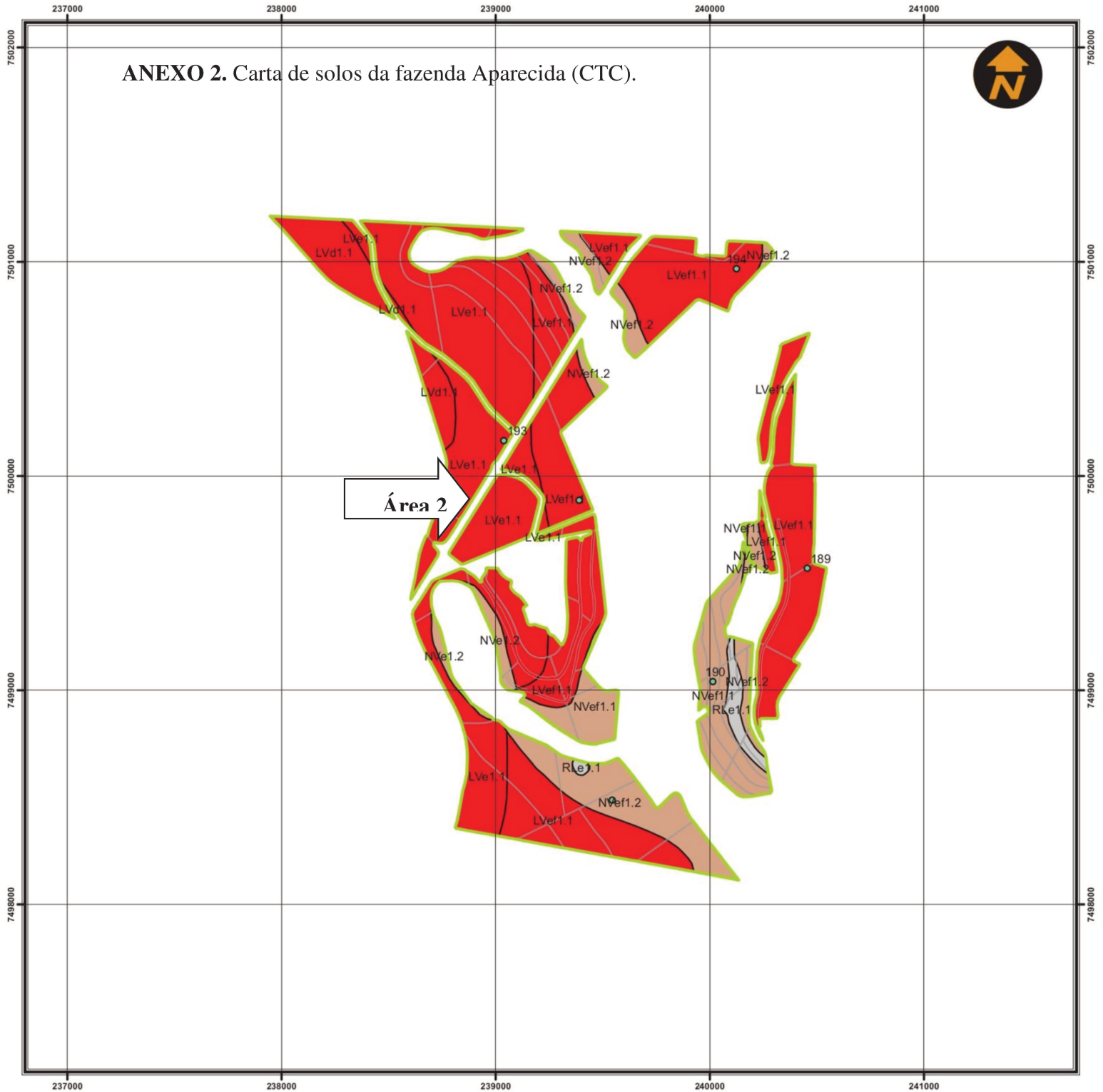
Cartografia: Solange Maria Mina Padula e Paulo Cezar da Silva

Projeção Universal transversa de Mercator - Datum SAD69 Fuso 23





## ANEXO 2. Carta de solos da fazenda Aparecida (CTC).



### Unidades de Mapeamento, Descrição e Área

- LVd1.1, LATOSSOLO VERMELHO Distrófico, textura argilosa, (15,72ha)
- LVe1.1, LATOSSOLO VERMELHO Eutrófico, textura argilosa, (92,26ha)
- LVe1.1, LATOSSOLO VERMELHO Eutroférico, textura argilosa, (108,31ha)
- NVe1.2, NITOSSOLO VERMELHO Eutrófico latossólico, textura argilosa, (1,41ha)
- NVe1.1, NITOSSOLO VERMELHO Eutroférico, textura argilosa, (23,55ha)
- NVe1.2, NITOSSOLO VERMELHO Eutroférico latossólico, textura argilosa, (29,74ha)
- RLe1.1, NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico fragmentário, textura argilosa, (3,9ha)

### CARTA DE SOLOS

IRACEMA - 029



Fazenda: Aparecida

Código da Fazenda: 10003

Safra: 0809

Responsável Técnico: Felipe Haenel Gomes

Cartografia: Solange Maria Mina Padula e Paulo Cezar da Silva

Projeção Universal transversa de Mercator - Datum SAD69 Fuso 23

