



FERNANDO SILVA ARAÚJO

**“ATRIBUTOS DO SOLO E SUAS RELAÇÕES COM
RESÍDUOS VEGETAIS E MATÉRIA ORGÂNICA EM ÁREAS
CULTIVADAS COM CANA-DE-AÇÚCAR”**

**CAMPINAS
2012**



UNIVERSIDADE ESTADUAL DE CAMPINAS
FACULDADE DE ENGENHARIA AGRÍCOLA

FERNANDO SILVA ARAÚJO

**“ATRIBUTOS DO SOLO E SUAS RELAÇÕES COM
RESÍDUOS VEGETAIS E MATÉRIA ORGÂNICA EM ÁREAS
CULTIVADAS COM CANA-DE-AÇÚCAR”**

Orientador: Prof. Dr. Zigomar Menezes de Souza

Co-Orientador: Prof. Dr. Edson Eiji Matsura

Tese de Doutorado apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas para obtenção do título de Doutor em Engenharia Agrícola, na área de concentração de Água e Solo.

**ESTE EXEMPLAR CORRESPONDE À VERSÃO FINAL DA TESE
DEFENDIDA PELO ALUNO FERNANDO SILVA ARAÚJO E ORIENTADO
PELO PROFESSOR DOUTOR ZIGOMAR MENEZES DE SOUZA**

Assinatura do orientador

A handwritten signature in blue ink, appearing to read "Zigomar M. Souza".

**CAMPINAS
2012**

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA
BIBLIOTECA DA ÁREA DE ENGENHARIA E ARQUITETURA - BAE -
UNICAMP

Ar15a Araújo, Fernando Silva
Atributos do solo e suas relações com resíduos vegetais e matéria orgânica em áreas cultivadas com cana-de-açúcar / Fernando Silva Araújo. --Campinas, SP: [s.n.], 2012.

Orientador: Zigomar Menezes de Souza.

Co-orientador: Edson Eiji Matsura.

Tese de Doutorado - Universidade Estadual de Campinas, Faculdade de Engenharia Agrícola.

1. Solos. 2. Física do solo. 3. Estrutura do solo. 4. Solos - Compactação. 5. Solos - Consolidação. I. Souza, Zigomar Menezes de, 1970-. II. Matsura, Edson Eiji, 1956-. III. Universidade Estadual de Campinas. Faculdade de Engenharia Agrícola. IV. Título.

Título em Inglês: Soil attributes and relations their with waste vegetable and organic matter in areas cultivation sugar cane

Palavras-chave em Inglês: Soils, Soil Physics, soil structure, Soil - Compaction, Soil - Consolidation

Área de concentração: Água e Solo

Titulação: Doutor em Engenharia Agrícola

Banca examinadora: Zigomar Menezes de Souza, Gener Tadeu Pereira, Morel de Passos e Carvalho, Reginaldo Barboza da Silva, Stanley Robson de Medeiros Oliveira

Data da defesa: 18-12-2012

Programa de Pós Graduação: Engenharia Agrícola

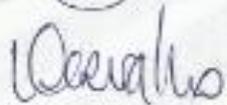
Este exemplar corresponde à redação final da **Tese de Doutorado** defendida por **Fernando Silva Araujo**, aprovada pela Comissão Julgadora em 18 de dezembro de 2012, na Faculdade de Engenharia Agrícola da Universidade Estadual de Campinas.



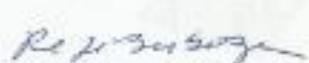
Prof. Dr. Zilmar Menezes de Souza - Presidente e Orientador
Feagri/Unicamp



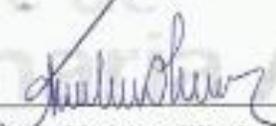
Prof. Dr. Genes Tadeu Pereira - Membro Titular
Unesp/ECAV



Prof. Dr. Morel de Passos e Carvalho - Membro Titular
Unesp/FEIS



Prof. Dr. Reginaldo Barboza da Silva - Membro Titular
Unesp/Registro



Dr. Stanley Robson de Medeiros Oliveira - Membro Titular
Embrapa/CNPq

*A Deus,
Aos meus pais Antônio José Barreto de Araújo e Izabel Tereza Silva de Araújo
Aos meus irmãos Fábio e Isabelle, pelo apoio e amizade,
À minha esposa, Ana Paula, pela compreensão,
Às minhas filhas, Maria Fernanda e Mariana, pela alegria e motivação,
Minha querida tia Fátima, pelo carinho e incentivo,
A todos familiares e amigos,*

Dedico este trabalho

AGRADECIMENTOS

A Deus...

A minha família pelo imensurável apoio, amor e compreensão.

Ao professor Zigomar, pela amizade, dedicação, confiança, paciência, pela oportunidade em realizar o trabalho e apoio em diversos momentos.

Ao professor Reginaldo, pelo apoio e pelas sugestões valiosas para conclusão deste trabalho.

Ao professor Rubismar Stolf pela atenção dispensada e ensinamentos valiosos.

A todos os professores da FEAGRI, em especial os professores Roberto, Mara e Edson, os quais contribuíram grandiosamente na minha formação.

Aos amigos de laboratório Gustavo, Ronny, Fran, Laura, Antonniane, Gilka, Lorena, Rose, Guilherme, Laércio, Janaína e Allan, pela amizade, parceria e apoio.

Aos amigos da graduação, em especial Matheus, Mariana, Gabriel, Gustavo, Garrido, André e Stephan, pela ajuda, amizade e companhia.

Aos funcionários do Laboratório de Solos, Célia, Júnior e Lucarelli, pelo apoio nas análises.

Aos funcionários da FEAGRI, pela atenção, convívio e trabalho prestado.

Aos funcionários do Laboratório de Mecânica do Solo da FEC pela ajuda proporcionada.

Aos amigos da C10 Marlus, Leonardo, Daniel e Gustavo pela acolhida, amizade e convívio.

A CAPES pela bolsa de estudo concedida e à FAPESP pelo suporte financeiro destinado à realização do projeto.

Muito Obrigado!

*“Se o que move o mundo são os questionamentos
cabe a você questionar-se constantemente”.*

*“Ninguém é digno das grandes vitórias se não
aprendeu a agradecer as dramáticas derrotas”*

(Augusto Cury).

SUMÁRIO

LISTA DE FIGURAS	xi
LISTA DE TABELAS	xiv
Resumo	xvii
Atributos do solo e suas relações com resíduos vegetais e matéria orgânica em áreas cultivadas com cana-de-açúcar	xvii
ABSTRACT	xix
Soil attributes and relations their with waste vegetable and organic matter in areas cultivation sugar cane	xix
1. INTRODUÇÃO.....	1
1.1. Justificativa.....	1
1.2. Hipótese.....	3
1.3. Objetivos.....	3
1.3.1. Geral	3
1.3.2. Específicos.....	3
2. Revisão bibliográfica.....	4
2.1. Qualidade do solo	4
2.1.1. Indicadores da qualidade física do solo	6
2.2. Compactação do solo.....	10
2.3. Variabilidade espacial de atributos do solo	13
2.4. Resíduos vegetais no sistema cana crua	16
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	19
3.1. Localização e descrição da área de estudo	19
3.2. Coleta das amostras de solo.....	21
3.3. Determinação dos atributos do solo	22
3.3.1. Análise Granulométrica.....	22
3.3.2. Densidade e porosidade do solo	22
3.3.3. Estabilidade de agregados	23
3.3.4. Teor de matéria orgânica do solo	23
3.3.5. Teor de água no solo e resistência do solo à penetração	24
3.3.6. Limites de consistência do solo	24
3.3.7. Ensaio de proctor normal.....	24
3.3.8. Capacidade Suporte de Carga do solo	25
3.3.9. Intervalo Hídrico Óimo	27
3.4. Mapeamento da produtividade da cana-de-açúcar	29
3.5. Análise estatística e geoestatística.....	31
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	33
4.1. Ensaio de Proctor normal	33
4.2. Área 1 – 16 anos de colheita mecanizada.....	39
4.2.1. Estabilidade de agregados	39
4.2.2. Teor de matéria orgânica	43
4.2.3. Granulometria, densidade e porosidade do solo.....	45
4.2.4. Capacidade Suporte de Carga do solo	46
4.2.5. Intervalo hídrico ótimo	49
4.3. Área 2 – 8 anos de colheita mecanizada.....	52
4.3.1. Estabilidade de agregados	52

4.3.2. Teor de matéria orgânica	55
4.3.3. Granulometria, densidade e porosidade do solo	57
4.3.4. Capacidade suporte de carga	59
4.3.5. Intervalo hídrico ótimo	61
4.4. Área 3 – Mais de 20 anos sob colheita manual, com queima.....	63
4.4.1. Estabilidade de agregados	63
4.4.2. Teor de matéria orgânica	66
4.4.3. Granulometria, densidade e porosidade do solo do solo	68
4.4.4. Capacidade suporte de carga do solo.....	70
4.4.5. Intervalo hídrico ótimo	72
4.5. Relações de atributos físicos com a produtividade da cultura.....	74
5. Conclusões.....	79
6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	79
7. APENDICE	94

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização das áreas estudadas na Usina São Martinho, Pradópolis-SP.	19
Figura 2. Precipitação média mensal do município de Pradópolis – SP. Série histórica mensal de 1966 a 2002 (Fonte: ANA, 2012).	19
Figura 3. Esquema do local de coleta das amostras de solo.	22
Figura 4. Consolidômetro automático com interação homem-máquina modelo CNTA-IHM/BR-001/07.	26
Figura 5. Penetrômetro eletrônico marca Marconi, modelo MA-933.	28
Figura 6. Detalhe da mensuração dos dados de produtividade da cultura.	30
Figura 7. Teor de matéria orgânica para os sistemas de cana queimada (CQ) e cana crua (CC) em diferentes profundidades. *Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.	33
Figura 8. Distribuição espacial do diâmetro médio ponderado (DMP, mm) e do diâmetro médio geométrico (DMG, mm) de um Latossolo Vermelho distroférico sob 16 anos de colheita mecanizada para a cultura da cana-de-açúcar, nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.	42
Figura 9. Distribuição espacial do teor de matéria orgânica (dag kg ⁻¹) de um Latossolo Vermelho distroférico sob 16 anos de colheita mecanizada para a cultura da cana-de-açúcar, nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.	45
Figura 10. Modelo de capacidade suporte de carga ($\sigma_p = 10^{(a+bU)}$) e σ_p estimados e observados para os limites de consistência de um Latossolo Vermelho distroférico sob 16 anos de colheita mecanizada, para a cultura da cana-de-açúcar. Em que, LC = Limite de contração; RF = Região de friabilidade; LP = Limite de plasticidade; RP = Região de plasticidade e LL = Limite de liquidez.	47
Figura 11. Distribuição espacial das pressões de preconsolidação (σ_p) estimadas ($\sigma_p = 10^{(a+bU)}$) e do teor de água no solo (kg kg ⁻¹) de um Latossolo Vermelho distroférico sob 16 anos de colheita mecanizada para a cultura da cana-de-açúcar, nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.	49
Figura 12. Variação do conteúdo volumétrico de água (θ , dm ³ dm ⁻³) com a densidade do solo (Ds), para os limites críticos de capacidade de campo (θ_{CC} ; 0,01 MPa), ponto de murcha permanente (θ_{PMP} ; 1,5 MPa), porosidade de aeração (θ_{PA} ; 10%) e resistência do solo à penetração (θ_{RP} ; 2,5 MPa) em um Latossolo Vermelho distroférico sob 16 anos de colheita mecanizada para a cultura da cana-de-açúcar.	51
Figura 13. Variação da resistência do solo à penetração (θ_{RP}) para os limites críticos de 2,0; 2,5; 3,0; 3,5 e 4,0 MPa com o conteúdo de água no solo e a densidade do solo em um Latossolo Vermelho distroférico sob 16 anos de colheita mecanizada para a cultura da cana-de-açúcar.	52
Figura 14. Distribuição espacial do diâmetro médio ponderado (DMP, mm) e do diâmetro médio geométrico (DMG, mm) de um Latossolo Vermelho distroférico sob 8 anos de colheita mecanizada para a cultura da cana-de-açúcar, nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.	54
Figura 15. Distribuição espacial do teor de matéria orgânica (dag kg ⁻¹) de um Latossolo Vermelho distroférico sob 8 anos de colheita mecanizada para a cultura da cana-de-açúcar, nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.	57
Figura 16. Modelo de capacidade suporte de carga ($\sigma_p = 10^{(a+bU)}$) e σ_p estimados e observados para os limites de consistência de um Latossolo Vermelho distroférico sob 8 anos de colheita	

mecanizada, para a cultura da cana-de-açúcar. Em que: LC = Limite de contração; RF = Região de friabilidade; LP = Limite de plasticidade; RP = Região de plasticidade e LL = Limite de liquidez.	59
Figura 17. Distribuição espacial das pressões de preconsolidação ($\sigma_p = 10^{(a + bU)}$) e do teor de água no solo (kg kg^{-1}) de um Latossolo Vermelho distroférico sob 8 anos de colheita mecanizada para a cultura da cana-de-açúcar, nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.	61
Figura 18. Variação do conteúdo volumétrico de água (θ , $\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$) com a densidade do solo (Ds), para os limites críticos de capacidade de campo (θ_{CC} ; 0,01 MPa), ponto de murcha permanente (θ_{PMP} ; 1,5 MPa), porosidade de aeração (θ_{PA} ; 10%) e resistência do solo à penetração (θ_{RP} ; 2,0 MPa) em um Latossolo Vermelho distroférico sob 8 anos de colheita mecanizada para a cultura da cana-de-açúcar.	62
Figura 19. Variação da resistência do solo à penetração (θ_{RP}) para os limites críticos de 2,0; 2,5; 3,0; 3,5 e 4,0 MPa com o conteúdo de água no solo e a densidade do solo em um Latossolo Vermelho distroférico sob 8 anos de colheita mecanizada para a cultura da cana-de-açúcar.	63
Figura 20. Distribuição espacial do diâmetro médio ponderado (DMP, mm) e do diâmetro médio geométrico (DMG, mm) de um Latossolo Vermelho distroférico sob colheita manual, com queima, para a cultura da cana-de-açúcar nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.	66
Figura 21. Distribuição espacial do teor de matéria orgânica (dag kg^{-1}) de um Latossolo Vermelho distroférico sob colheita manual, com queima, para a cultura da cana-de-açúcar nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.	68
Figura 22. Modelo de capacidade suporte de carga ($\sigma_p = 10^{(a + bU)}$) e σ_p estimados para os limites de consistência de um Latossolo Vermelho distroférico sob colheita manual, com queima, para a cultura da cana-de-açúcar. Em que: LC = Limite de contração; RF = Região de friabilidade; LP = Limite de plasticidade; RP = Região de plasticidade e LL = Limite de liquidez.	70
Figura 23. Distribuição espacial das pressões de preconsolidação ($\sigma_p = 10^{(a + bU)}$) e do teor de água no solo (kg kg^{-1}) de um Latossolo Vermelho distroférico sob colheita manual, com queima, para a cultura da cana-de-açúcar nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.	72
Figura 24. Variação do conteúdo volumétrico de água (θ , $\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$) com a densidade do solo (Ds), para os limites críticos de capacidade de campo (θ_{CC} ; 0,01 MPa), ponto de murcha permanente (θ_{PMP} ; 1,5 MPa), porosidade de aeração (θ_{PA} ; 10%) e resistência do solo à penetração (θ_{RP} ; 2,5 MPa) em um Latossolo Vermelho distroférico sob colheita manual, com queima, para a cultura da cana-de-açúcar.	73
Figura 25. Variação da resistência do solo à penetração (θ_{RP}) para os limites críticos de 2,0; 2,5; 3,0; 3,5 e 4,0 MPa com o conteúdo de água no solo e a densidade do solo em um Latossolo Vermelho distroférico sob colheita manual, com queima, para a cultura da cana-de-açúcar.	74
Figura 26. Relação da distribuição espacial da produtividade da cana-de-açúcar (Mg ha^{-1}) nas três áreas estudadas com a variação do conteúdo volumétrico de água (θ , $\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$) com a densidade do solo (Ds), para os limites críticos de capacidade de campo (θ_{CC} ; 0,01 MPa), ponto de murcha permanente (θ_{PMP} ; 1,5 MPa), porosidade de aeração (θ_{PA} ; 10%) e resistência do solo à penetração (θ_{RP} ; 2,5 MPa) para cada uma das áreas estudadas.	77

Figura 27. Modelos de capacidade suporte de carga ($\sigma_p = 10^{(a + bU)}$) e limites de consistência de um Latossolo Vermelho distroférico sob cultivo de cana-de-açúcar e vegetação natural (mata) na camada 0,00-0,30 m. Em que: LC = Limite de contração; RF = Região de friabilidade; LP = Limite de plasticidade; RP = Região de plasticidade e LL = Limite de liquidez; (a) = Área sob Mata; (b) = Colheita Mecanizada e (c) Colheita com queima e corte. 78

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Principais indicadores físicos, químicos e biológicos e suas relações com a qualidade do solo.	5
Tabela 2. Caracterização granulométrica ⁽¹⁾ e química ⁽²⁾ do Latossolo Vermelho nas camadas de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.....	20
Tabela 3. Valores de atributos físicos e mecânicos do solo para os sistemas de cana queimada (CQ) e cana crua (CC) em diferentes profundidades.	34
Tabela 4. Valores de densidade do solo, energia equivalente e energia dissipada em função da energia de compactação de 3,61 kgf cm cm ⁻³ da quantidade de palha existente sobre o solo no ensaio de Proctor para o sistema de cana crua (CC) em diferentes profundidades.	35
Tabela 5. Valores de densidade do solo, energia equivalente e energia dissipada em função da energia de compactação de 6,02 kgf cm cm ⁻³ da quantidade de palha existente sobre o solo no ensaio de Proctor para o sistema de cana crua (CC) em diferentes profundidades.	36
Tabela 6. Valores de densidade do solo, energia equivalente e energia dissipada em função da energia de compactação de 3,61 kgf cm cm ⁻³ da quantidade de palha existente sobre o solo no ensaio de Proctor para o sistema de cana queimada (CQ) em diferentes profundidades.	37
Tabela 7. Valores de densidade do solo, energia equivalente e energia dissipada em função da energia de compactação de 6,02 kgf cm cm ⁻³ da quantidade de palha existente sobre o solo no ensaio de Proctor para o sistema de cana queimada (CQ) em diferentes profundidades.	38
Tabela 8. Estatística descritiva do diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG) de um Latossolo Vermelho distroférico sob 16 anos de colheita mecanizada para a cultura da cana-de-açúcar, nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.	39
Tabela 9. Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais para o diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG) de um Latossolo Vermelho distroférico sob 16 anos de colheita mecanizada para a cultura da cana-de-açúcar, nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.	40
Tabela 10. Estatística descritiva do teor de matéria orgânica do solo (MO) de um Latossolo Vermelho distroférico sob 16 anos de colheita mecanizada da cultura da cana-de-açúcar, nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.	43
Tabela 11. Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais do teor de matéria orgânica de um Latossolo Vermelho distroférico sob 16 anos de colheita mecanizada para a cultura da cana-de-açúcar, nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.	44
Tabela 12. Estatística descritiva para a granulometria e porosidade do solo de um Latossolo Vermelho distroférico sob 16 anos de colheita mecanizada para a cultura da cana-de-açúcar, nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.	46
Tabela 13. Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais da pressão de preconsolidação (σ_p) estimadas ($\sigma_p = 10^{(a + bU)}$) e do teor de água no solo de um Latossolo Vermelho distroférico, sob 16 anos de colheita mecanizada para a cultura da cana-de-açúcar, nas profundidades de 0,00-0,10 m; 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.	48
Tabela 14. Estimadores dos parâmetros da regressão linearizada, para resistência do solo a penetração ($RP = MPa$), em função do conteúdo volumétrico da água ($\theta = m^3 m^{-3}$) e densidade ($Ds = Mg m^{-3}$) do solo: $\ln RP = \ln a + b \ln \theta + c \ln Ds$	50

Tabela 15. Estimadores dos parâmetros da regressão linearizada, para o conteúdo volumétrico de água do solo ($\theta = m^3 m^{-3}$), em função da densidade do solo ($Mg m^{-3}$) e do potencial mátrico ($\Psi=MPa$): $\ln \theta = \ln d + eDs + f \ln \Psi$.	50
Tabela 16. Estatística descritiva do diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG) de um Latossolo Vermelho distroférico sob 8 anos de colheita mecanizada para a cultura da cana-de-açúcar, nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.	53
Tabela 17. Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais do diâmetro médio ponderado (DMP) e do diâmetro médio geométrico (DMG) de um Latossolo Vermelho distroférico sob 8 anos de colheita mecanizada para a cultura da cana-de-açúcar, nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.	53
Tabela 18. Estatística descritiva do teor de matéria orgânica do solo (MO) de um Latossolo Vermelho distroférico sob 8 anos de colheita mecanizada para a cultura da cana-de-açúcar, nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.	55
Tabela 19. Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais do teor de matéria orgânica de um Latossolo Vermelho distroférico sob 8 anos de colheita mecanizada para a cultura da cana-de-açúcar, nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.	56
Tabela 20. Estatística descritiva da granulometria e da porosidade de um Latossolo Vermelho distroférico sob 8 anos de colheita mecanizada para a cultura da cana-de-açúcar, nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.	58
Tabela 21. Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais da pressão de preconsolidação (σ_p) estimadas ($\sigma_p = 10^{(a + bU)}$) e do teor de água no solo de um Latossolo Vermelho distroférico sob 8 anos de colheita mecanizada para a cultura da cana-de-açúcar, nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.	60
Tabela 22. Estatística descritiva do diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG) de um Latossolo Vermelho distroférico sob colheita manual, com queima, para a cultura da cana-de-açúcar nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.	64
Tabela 23. Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais do diâmetro médio ponderado (DMP) e do diâmetro médio geométrico (DMG) de um Latossolo Vermelho distroférico sob colheita manual, com queima, para a cultura da cana-de-açúcar nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.	65
Tabela 24. Estatística descritiva do teor de matéria orgânica do solo (MO) de um Latossolo Vermelho distroférico sob colheita manual, com queima, da cultura para a cana-de-açúcar, nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.	67
Tabela 25. Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais do teor de matéria orgânica de um Latossolo Vermelho distroférico sob colheita manual, com queima, para a cultura da cana-de-açúcar nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.	67
Tabela 26. Estatística descritiva da granulometria e da porosidade do solo de um Latossolo Vermelho distroférico sob colheita manual, com queima, para a cultura da cana-de-açúcar nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.	69
Tabela 27. Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais da pressão de preconsolidação (σ_p) estimadas ($\sigma_p = 10^{(a + bU)}$) e do teor de água no solo de um Latossolo Vermelho distroférico sob colheita manual, com queima, para a cultura da cana-de-açúcar nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.	71

Tabela 28. Estatística descritiva para a produtividade da cultura de cana-de-açúcar para área com cana-crua (16 anos), cana-crua (8 anos) e cana queimada (mais de 20 anos).	75
Tabela 29. Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais para a produtividade da cultura de cana-de-açúcar para área com cana-crua (16 anos), cana-crua (8 anos) e cana queimada (mais de 20 anos).....	76

Resumo

Atributos do solo e suas relações com resíduos vegetais e matéria orgânica em áreas cultivadas com cana-de-açúcar

É crescente a demanda global por fontes de energia renováveis, tais como o etanol, o qual no Brasil, possui como principal matriz energética a cultura da cana-de-açúcar. Neste contexto faz-se necessário a incorporação de novas tecnologias, como a mecanização da colheita, para o uso racional das áreas manejadas com cana-de-açúcar. O acúmulo superficial de resíduos vegetais da cana-de-açúcar na superfície do solo promove o enriquecimento das camadas superficiais com matéria orgânica bem como o incremento do intervalo hídrico ótimo, mitigando os efeitos da compactação do solo causados pelo tráfego de máquinas no sistema de cana colhida mecanicamente sem queima. Portanto, o objetivo deste trabalho foi estudar as alterações no comportamento físico e mecânico de um Latossolo Vermelho produzido pelo enriquecimento do conteúdo de matéria orgânica e, ainda, a capacidade dos resíduos vegetais acumulados na superfície do solo dissiparem cargas aplicadas sobre o mesmo, em áreas cultivadas com cana-de-açúcar colhidas com e sem queima. O projeto foi desenvolvido em três áreas cultivadas com cana-de-açúcar: 1- cana-de-açúcar sem queima e corte mecanizado, desde 1996 (com 16 anos de implantação do sistema de cana crua); 2- cana-de-açúcar sem queima e corte mecanizado, desde 2004 (com 8 anos de implantação do sistema de cana crua); 3- cana-de-açúcar com queima e corte manual, desde 1973 (cana queimada). Os atributos físicos avaliados foram: análise granulométrica, consistência do solo, densidade do solo, estabilidade de agregados, porosidade do solo e resistência do solo à penetração nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m. Determinou-se ainda o intervalo hídrico ótimo para desenvolvimento das plantas. Foram avaliadas as relações entre o teor de matéria orgânica e a compressibilidade do solo, as relações entre teor de matéria orgânica do solo e a umidade crítica para a compactação e as relações entre quantidade de resíduos vegetais na superfície e a densidade do solo obtida pelo teste Proctor. Os atributos de solo estudados apresentam estrutura de dependência espacial. O intervalo hídrico ótimo e σ_p mostraram-se sensíveis as alterações ocorridas no solo em detrimento dos sistemas de manejo estudados. A área sob colheita manual da cultura da cana-de-açúcar apresentou menor valor de densidade crítica para o intervalo hídrico ótimo, sendo que a maior produtividade da cultura

concentrou-se nas regiões de maior amplitude do intervalo hídrico ótimo e maior capacidade suporte de carga do solo.

Palavras Chave: geoestatística, pressão de preconsolidação e intervalo hídrico ótimo.

ABSTRACT

Soil attributes and relations their with waste vegetable and organic matter in areas cultivation sugar cane

An increasing global demand for renewable energy sources such as ethanol, which in Brazil, has as its primary energy matrix culture of sugar cane. In this context it is necessary to incorporate new technologies, mechanization of the harvest, for the rational use of managed areas with cane sugar. The accumulation of surface plant residues of sugar cane on the soil surface promotes the enrichment of the surface layers with organic matter as well as increasing the optimal water, mitigating the effects of soil compaction caused by machinery traffic on the system cane mechanically harvested without burning. Therefore, the aim of this work was to study the changes in physical and mechanical behavior of soil produced by enriching the content of organic matter, and also the ability of plant debris accumulated on the soil surface dissipate loads applied on it, in cultivated areas sugar cane harvested with and without burning. The project was developed in three areas cultivated with sugar cane: 1 - harvested with manual cutting and burning since 1973; 2 - mechanically harvested without burning since 2004 (8 years of implantation of sugarcane), 3 - mechanically harvested unburned since 1996 (16 years of implantation of sugarcane). The physical attributes were: particle size analysis, soil consistency, soil bulk density, aggregate stability, soil porosity and soil resistance to penetration depths of 0.00 to 0.10 m, 0.10-0.20 me 0.20-0.30 m. It was determined the optimal water yet to identify the critical limits of soil density where resistance to penetration and aeration porosity are restrictive to plant development. We evaluated the relationship between the organic matter content and soil compressibility, the relationships between organic matter content and soil moisture critical for the compression and the relationship between the amount of crop residue on the surface and soil density obtained by the Proctor test. The soil attributes have studied the spatial dependence structure. The least limiting water range and σ_p were sensitive to changes in the soil instead of studied treatments. The area under cultivation of manual harvesting cane sugar showed a lower value of the critical density for optimal water, and the greater crop concentrated in regions of higher altitude and lower load-bearing capacity.

Keywords: geostatistics, preconsolidation pressure and least limiting water range.

1. INTRODUÇÃO

1.1. Justificativa

O Brasil é o primeiro e o segundo maior produtor mundial de açúcar e etanol, respectivamente, sendo o maior exportador de ambos. Na safra brasileira de 2010/2011 foram moídas 714 milhões de toneladas de cana, com produtividade média de 79 Mg ha⁻¹, que resultou na produção de 38,7 milhões de toneladas de açúcar e 27,7 bilhões de litros de etanol (IBGE, 2012). As estimativas da safra 2011/2012 mostraram uma produção nacional de 558,775 Mg de cana-de-açúcar, em que a região centro sul representou 88,3% (493,264 Mg), sendo 54,4% (304,230 Mg) somente a produção do estado de São Paulo, o que representou 58,6% (21,068 Mg) da produção de açúcar e 51,2% (11,598 Mg) da produção de etanol total (UNICA, 2012). Dados da Companhia Nacional de Abastecimento (CONAB, 2012) indicam que a área plantada de cana-de-açúcar no período foi de 8,4 milhões de hectares, de modo que 52,6% (4,4 milhões de hectares) estão presentes no estado de São Paulo.

A demanda global por fontes de energia renováveis, em virtude da necessidade de redução do uso de combustíveis fósseis, responsáveis pela emissão de gases poluentes, coloca o Brasil em posição de destaque no setor sucroalcooleiro, ao passo que traz preocupações quanto a aspectos sociais e ambientais, denotando a necessidade da incorporação de novas tecnologias para maximizar a produção de cana-de-açúcar brasileira racionalizando todo o processo produtivo.

No estado de São Paulo, o cultivo de cana-de-açúcar atinge todas as regiões e adoção da colheita mecanizada é inevitável. O decreto de Lei Estadual 47.700, de 11 de março de 2003 regulamenta a Lei Estadual 11.241, de 19 de setembro de 2002, que determinou prazos para a eliminação gradativa do emprego do fogo para despalha da cana-de-açúcar nos canaviais paulistas. Esse decreto, de grande interesse agrícola e ecológico, estabelece prazos, procedimentos, regras e proibições que visam regulamentar as queimas em áreas agrícolas. Portanto, a colheita de cana sem queima é uma realidade presente no sistema de produção da cana-de-açúcar tanto no estado de São Paulo como no Brasil, que deve ser intensificada nos próximos anos.

Juntamente com a mecanização da colheita da cana-de-açúcar, o uso da agricultura de precisão (AP) surge como uma alternativa para a racionalização do setor sucroalcooleiro, visto que com o uso das ferramentas da AP os agricultores serão capazes de promover um manejo

localizado e preciso da área cultivada, permitindo a otimização do uso de insumos agrícolas, redução de custos da lavoura e a possibilidade de aumento da produtividade. Para o seu uso é necessário, o conhecimento da variabilidade dos atributos dos solos, na qual, a geoestatística é uma ferramenta fundamental.

Com a adoção da colheita mecanizada no sistema de manejo da cana-de-açúcar aumenta a preocupação com a compactação do solo e seus efeitos sobre os atributos do solo, com reflexos na produtividade da cultura. Esse aumento é causado principalmente pela utilização de máquinas e implementos de maior peso para as sucessivas operações de subsolagem, gradagem, plantio, tratos culturais, colheita e transbordo.

Concomitantemente à compactação, o sistema de colheita de cana crua permite acúmulo de resíduos orgânicos (palhada) sobre e na camada superficial do solo, diferentemente ao manejo de cana queimada. Esse efeito pode contrapor-se aos efeitos deletérios da compactação do solo, por aumentar a região de friabilidade em que o solo pode sofrer tráfego, aumentar a resistência do solo à deformação e por diminuir a resistência à penetração das raízes quando o solo está seco.

Com a utilização de máquinas e implementos com maior pressão se torna necessário o desenvolvimento de metodologias para mensurar a capacidade de suporte de carga do solo bem como o impacto destas práticas nos seus atributos físicos e mecânicos. Dentre esses atributos, destacam-se os componentes da porosidade relacionados com a retenção e o fluxo de água e ar no solo e o impedimento mecânico ao crescimento das raízes. A capacidade do solo em resistir às cargas aplicadas é fundamental neste contexto, pois possibilita definir regiões de maior ou menor susceptibilidade do solo à compactação pelo uso de máquinas em sistemas de colheita mecanizada da cultura da cana-de-açúcar (cana crua). Estudos científicos sob o efeito benéfico da manutenção dos resíduos vegetais na superfície do solo foram efetuados em sistema de plantio direto, porém, em áreas de cana-de-açúcar, manejadas sem a queima prévia do canavial na ocasião da colheita, são escassos os trabalhos com enfoque em compactação do solo.

Avaliar em escala local a susceptibilidade do solo à compactação causada pelo tráfego de máquinas agrícolas conjuntamente com o momento ideal para executar as operações mecanizadas no campo, deve ser uma preocupação dos pesquisadores da área de mecanização agrícola e manejo do solo, pois representa uma forma racional do uso de medidas preditivas e

preventivas da compactação, podendo reduzir significativamente os problemas de degradação dos solos agrícolas.

1.2. Hipótese

O acúmulo superficial de resíduos vegetais de cana-de-açúcar na superfície de um Latossolo Vermelho e, o conseqüente enriquecimento das camadas superficiais com matéria orgânica reduz os efeitos adversos ao solo promovidos pela compactação (aumento da resistência do solo à penetração, aumento da densidade do solo, redução da estabilidade de agregados e alteração no espaço poroso do solo) advinda pelo tráfego de máquinas, no sistema de cana colhida mecanicamente sem queima (cana crua), o que promove melhoria na produtividade da cultura.

1.3. Objetivos

1.3.1. Geral

Estudar as alterações no comportamento físico e mecânico do solo produzido pelo enriquecimento do conteúdo de matéria orgânica e a capacidade dos resíduos vegetais acumulados na superfície do solo dissipar cargas aplicadas sobre o mesmo, em áreas cultivadas com cana-de-açúcar colhidas com e sem queima, estabelecendo relação com a produtividade.

1.3.2. Específicos

1. Determinar a variabilidade espacial dos atributos resistência do solo à penetração, porosidade do solo, densidade do solo, estabilidade de agregados, teor de matéria orgânica do solo e produtividade da cultura em áreas cultivadas com cana-de-açúcar colhidas com e sem queima;
2. Identificar limites críticos de densidade do solo onde a resistência do solo à penetração e a porosidade de aeração são restritivos ao desenvolvimento das plantas, utilizando a metodologia do intervalo hídrico ótimo e relacionar estas informações com os mapas de krigagem dos atributos físicos e mecânicos do solo e produtividade da cana-de-açúcar;
3. Avaliar as relações entre o teor de matéria orgânica e a compressibilidade do solo, elasticidade do solo e a umidade crítica para a compactação;

4. Avaliar as relações entre quantidade de resíduos vegetais na superfície e a densidade do solo obtida pelo teste Proctor.

2. Revisão bibliográfica

2.1. Qualidade do solo

Qualidade física do solo é a capacidade do solo em promover condições favoráveis ao crescimento e desenvolvimento do sistema radicular das plantas. As condições favoráveis na zona radicular estão relacionadas com a estrutura do solo e são determinadas pela disponibilidade de água, aeração, temperatura e resistência que o solo oferece à penetração de raízes. No que diz respeito à funcionalidade, a estrutura do solo ideal é aquela que permite uma grande área de contato entre as raízes e o solo, apresentando espaço poroso suficiente para movimentação de água e difusão de gases, além da resistência do solo à penetração não ser impeditiva ao crescimento de raízes.

O uso sustentável dos recursos naturais, especialmente do solo e da água, tem-se constituído em tema de crescente relevância, em razão do aumento das atividades antrópicas. Consequentemente, cresce a preocupação com o uso sustentável e a qualidade desses recursos (ARAÚJO *et al.*, 2007; ARAÚJO *et al.*, 2010). A atividade agropecuária “altamente produtiva”, a qual tem ocorrido, frequentemente, à custa de grande degradação dos recursos naturais, com a contaminação dos cursos de água por produtos químicos e o aumento da concentração dos gases responsáveis pelo efeito estufa (RUSSELLE; FRANZLUEBBERS, 2007) vem promovendo uma preocupação com a sustentabilidade das atividades econômicas ligadas ao meio ambiente.

Num conceito mais amplo, Brown (1981) afirmou que “uma sociedade sustentável é aquela que satisfaz suas necessidades sem diminuir as perspectivas das gerações futuras”. Neste contexto, a atividade agropecuária deve basear-se no seguinte modelo ecológico: ser produtivamente eficiente, economicamente viável, responsável socialmente e ecologicamente compatível com o ambiente. Portanto, pode-se incluir num conceito de sustentabilidade dirigida à atividade agropecuária aspectos como rentabilidade econômica, produtividade, relações entre custo e benefício e conceitos ligados à preservação ambiental como poluição e qualidade do solo.

A qualidade do solo pode ser incluída como um dos principais fatores que definem a sustentabilidade de um sistema de exploração agropecuário. Doran e Parkin (1994) definiram qualidade do solo como sendo a capacidade do solo em manter a produtividade biológica, a qualidade ambiental e promover a vida vegetal e animal saudáveis na face da terra. O solo, como sistema aberto não atinge qualidade por si só num sistema de exploração agrícola, mas sim pela eficiência do funcionamento do sistema solo-planta-microorganismos (VEZZANI, 2001). Desta forma, o manejo do solo configura-se como um dos principais fatores que definem a qualidade do solo e a sustentabilidade de um sistema de produção (NICOLOSO, 2005).

A qualidade do solo é mensurada por meio do uso de indicadores, os quais são atributos, que medem ou refletem o status ambiental ou a condição de sustentabilidade do ecossistema (ARAÚJO; MONTEIRO, 2007). Os indicadores de qualidade do solo podem ser classificados como físicos, químicos e biológicos (Tabela 1).

Tabela 1. Principais indicadores físicos, químicos e biológicos e suas relações com a qualidade do solo.

Indicadores	Relação com a qualidade do solo
Matéria orgânica do solo (MOS)	Fertilidade, estrutura e estabilidade do solo
Físicos	
Estrutura do solo	Retenção, transporte de água e nutrientes
Infiltração e densidade do solo	Movimento de água e porosidade do solo
Capacidade de retenção de água	Armazenamento e disponibilidade de água
Químicos	
pH	Atividade biológica e disponibilidade de nutrientes
Condutividade elétrica	Crescimento vegetal e atividade microbiana
Conteúdo de N, P e K	Disponibilidade de nutrientes para as plantas
Biológicos	
Biomassa microbiana	Atividade microbiana e reposição de nutrientes
Mineralização de nutrientes (N, P e S)	Produtividade do solo e de suprimento de nutrientes
Respiração do solo	Atividade microbiana
Atividade enzimática do solo	Atividade microbiana e catalítica no solo

(Adaptado de DORAN; PARKIN, 1994)

Para avaliar a qualidade do solo, faz-se necessário selecionar algumas de suas propriedades que são consideradas como atributos indicadores (DORAN; PARKIN, 1994). Um eficiente indicador deve ser sensível às variações do manejo, bem correlacionado com as funções desempenhadas pelo solo, capaz de elucidar os processos do ecossistema, ser

compreensível e útil para o agricultor e, preferencialmente, de fácil e barata mensuração (DORAN; ZEISS, 2000), devendo ser, ainda, sensível às alterações na qualidade do solo induzidas por modificações recentes no manejo do solo.

Segundo Islam e Weil (2000), os possíveis indicadores de qualidade do solo podem ser agrupados em três grupos. 1) efêmeros, cujas alterações se dão rapidamente no tempo segundo o manejo, entre eles: pH, disponibilidade de nutrientes, densidade do solo, porosidade do solo e teor de água no solo; 2) intermediários, possuindo forte influência nos processos que ocorrem no solo, tais como: matéria orgânica do solo, estabilidade de agregados do solo e biomassa microbiana; e 3) permanentes, que são inerentes ao solo, como: profundidade do solo, granulometria e mineralogia do solo. Dentre estes, os indicadores do grupo intermediário são os mais aptos a serem utilizados como ferramentas de monitoramento da qualidade do solo (NICOLOSO, 2005).

Quantificar a qualidade do solo não é tarefa fácil; a dificuldade advém do fato de que a qualidade do solo depende de suas propriedades intrínsecas, de suas interações com o ecossistema e, ainda, de prioridades de uso, influenciadas inclusive, por aspectos socioeconômicos e políticos (DORAN; PARKIN, 1994).

Portanto, definidos os indicadores, pode-se avaliar o atual estado de qualidade do solo medindo e comparando estes atributos com os valores encontrados no solo sob estado natural ou com valores considerados ideais. Estes atributos de qualidade do solo podem ser correlacionados com a produtividade das culturas, o qual pode gerar conhecimentos para o aprimoramento do manejo do solo provendo melhorias para desenvolvimento de plantas.

2.1.1. Indicadores da qualidade física do solo

A estrutura do solo pode ser alterada por práticas de manejo, influenciando a produtividade das culturas por meio das alterações na disponibilidade de água, na difusão de oxigênio e na resistência do solo à penetração das raízes, entre outras. A capacidade do solo em promover condição adequada para o crescimento e desenvolvimento da planta é considerada uma qualidade física do solo.

As plantas necessitam de solos com condições físicas favoráveis para o seu desenvolvimento adequado. Essas condições determinam os fluxos de água, calor e gases no solo. O teor de água no solo, por sua vez, controla a aeração, a temperatura e a resistência mecânica do solo, as quais são afetadas pela densidade do solo e distribuição do tamanho de

poros. Esses fatores físicos interagem e regulam o crescimento e a funcionalidade das raízes, com reflexo no crescimento e produtividade dos cultivos (COLLARES *et al.*, 2006; SOUZA *et al.*, 2012).

A avaliação da qualidade física do solo tem sido baseada na quantificação de atributos do solo, que participam de processos relacionados com o desenvolvimento de culturas agrícolas. Dentre estes atributos os mais frequentemente determinados são: densidade do solo, granulometria do solo, agregação, estabilidade de agregados, distribuição de poros e características de retenção de água (LETEY, 1985; VICENTE *et al.*, 2012).

Diferentes atributos físicos têm sido usados na quantificação da qualidade física do solo, tais como, a densidade e a porosidade do solo são as mais amplamente utilizados (ARAÚJO *et al.*, 2010). Atributos do solo, tais como a densidade do solo, a porosidade do solo, a condutividade hidráulica, a curva característica de retenção de água (BALBINO *et al.*, 2004; PIRES *et al.*, 2009) e a resistência do solo à penetração (IMHOFF *et al.*, 2000; PACHECO;CANTALICE, 2011), têm sido comumente utilizados como indicadores de qualidade física, pela relativa facilidade de determinação e pelo baixo custo de obtenção das medidas.

Dentre os atributos físicos utilizados para avaliar a qualidade física do solo, a resistência do solo à penetração tem sido atualmente priorizada para avaliar sistemas de uso e manejo, por ser um atributo diretamente relacionado ao crescimento das plantas e de fácil e rápida determinação (STONE *et al.*, 2002; LIMA *et al.*, 2006; SOUZA *et al.*, 2010; ROQUE *et al.*, 2011; PACHECO;CANTALICE, 2011; OTTO *et al.*, 2011; LIMA *et al.*, 2012). Ainda, a resistência do solo à penetração apresenta maiores correlações com o crescimento radicular, destacando-se como a melhor estimativa do impedimento mecânico ao crescimento radicular (BENGOUGH; MULLINS, 1990; RALISCH *et al.*, 2008) e como um indicador mais sensível à compactação do solo (TORMENA; ROLOFF, 1996), comparado à densidade do solo.

Na tentativa de integrar e simplificar o monitoramento da qualidade física do solo Silva *et al.* (1994) propuseram o “Least Limiting Water Range” (LLWR) como um indicador da qualidade estrutural do solo para a produtividade das culturas. Esse indicador integra o efeito do potencial matricial, aeração e resistência do solo à penetração das raízes em uma única informação, possibilitando estabelecer as condições de umidade do solo limitantes ao

crescimento das plantas. A designação “Least Limiting Water Range” foi traduzida para o português e empregada como Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) por Tormena *et al.* (1998).

O IHO é determinado a partir dos limites críticos para os seguintes indicadores de qualidade física do solo: conteúdo de água retido na capacidade de campo a 0,8 MPa para solos textura arenosa e 0,1 MPa textura argilosa (θ_{CC}); conteúdo de água retido no ponto de murcha permanente a 1,5 MPa (θ_{PMP}); porosidade de aeração mínima de 10% ou $0,10 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ (θ_{PA}); e conteúdo de água em que a resistência do solo à penetração atinge valores de 2,0 a 3,5 MPa, dependentes da cultura e sistema de manejo de solo (SILVA *et al.*, 1994; TORMENA *et al.*, 2007; ROQUE *et al.*, 2011; CAVALIERI *et al.*, 2011; LIMA *et al.*, 2012).

Independentemente do valor crítico da resistência do solo à penetração a ser utilizado, a resistência do solo à penetração se correlacionará positivamente com a densidade do solo e negativamente com o conteúdo de água no solo (SILVA *et al.*, 1994; TORMENA *et al.*, 1998; CAVALIERI *et al.*, 2006; TORMENA *et al.*, 2007; BLAINSKI *et al.*, 2009; CAVALIERI *et al.*, 2011; LIMA *et al.*, 2012; BERTIOLI JUNIOR *et al.*, 2012). Em áreas sob cultivo de cana-de-açúcar, Roque *et al.* (2011), utilizaram o intervalo hídrico ótimo para perceber alterações no conteúdo de água disponível às plantas promovido por diferentes sistemas de colheita. Bertioli Junior *et al.* (2012) avaliaram a qualidade física de um Latossolo Vermelho distroférico muito argiloso com histórico de trinta anos sob plantio direto denotando a sensibilidade deste atributo como indicador de qualidade estrutural do solo.

O Intervalo Hídrico Ótimo (IHO) incorpora em um único dado a amplitude do teor de água do solo em que são mínimas as limitações ao desenvolvimento de plantas associadas à disponibilidade de água, aeração e resistência do solo à penetração. Por isso, o IHO integra as propriedades físicas do solo que diretamente influenciam o desenvolvimento das culturas. Vários trabalhos têm utilizado o IHO para estudar a qualidade física do solo em áreas de cana-de-açúcar (SEVERIANO *et al.*, 2008; SILVA *et al.*, 2009; CAVALIERI *et al.*, 2011; PACHECO; CANTALICE, 2011; ROQUE *et al.*, 2011).

A pressão de preconsolidação, definida como a carga máxima que o solo suportou no passado (KONDO; DIAS JÚNIOR, 1999; SILVA *et al.*, 2009), também tem sido frequentemente utilizada para avaliar a condição física dos solos, sendo empregado para prever a capacidade de suporte de carga do solo, uma vez que a aplicação de cargas maiores que esse valor induz a uma compactação adicional e, decorrente disso, à degradação da

qualidade estrutural do solo (SUZUKI *et al.*, 2009; SILVA *et al.*, 2009; VASCONCELOS *et al.*, 2012). Reichert *et al.* (2007) afirmaram que para ocorrer o aumento da compactação de determinado solo é necessária a aplicação de pressões superiores à pressão de preconsolidação, que constitui em um indicativo da capacidade de suporte de carga do solo em função da umidade do solo.

Indicações na literatura científica ressaltaram a importância de caracterizar o processo de compressão e de se obter o índice de compressão e a pressão de preconsolidação quando se trata de prevenir a degradação da qualidade física dos solos (KONDO; DIAS JÚNIOR, 1999; IMHOFF *et al.*, 2001; ASSIS; LANÇAS, 2005; LIMA *et al.*, 2006; SUZUKI *et al.*, 2009; SILVA *et al.*, 2009; PACHECO; CANTALICE, 2011; VASCONCELOS *et al.*, 2012). Em sistemas mecanizados, o conhecimento dos valores do índice de vazios, ou de densidade e dos indicadores resultantes da curva de compressão uniaxial a cada pressão exercida, pode apresentar grande relevância na adequação futura de máquinas que exerçam menores pressões sobre o solo e na redução do impacto causado a qualidade estrutural de terras agrícolas (KONDO; DIAS JÚNIOR, 1999). Silva *et al.* (2009) e Vasconcelos *et al.* (2012) discutiram sobre a eficiência da pressão de preconsolidação para o monitoramento de qualidade estrutural do solo, quando da avaliação de áreas cultivadas com cana-de-açúcar submetidas à colheita mecanizada. Severiano *et al.* (2008), avaliando alterações estruturais em um Latossolo Vermelho-Amarelo (LVA), textura média, em consequência das operações de colheita da cana-de-açúcar em diferentes épocas de safra, constataram que o atributo pressão de preconsolidação é sensível e apropriado para o diagnóstico da compactação do solo.

Em culturas perenes ou semiperenes, como a cana-de-açúcar, um preparo inadequado do solo pode ocasionar decréscimos da produção que serão ampliados a todo o ciclo de cultura, já que, geralmente, a produção das soqueiras é intimamente ligada à produção de corte anterior. O decréscimo da produção de cana-de-açúcar num campo de demonstração foi obtido por Fernandes *et al.* (1983). Após o primeiro corte, em um Latossolo Vermelho-Escuro argiloso com $0,32 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$ de água foi compactado em diferentes níveis, uma, duas e três passadas de um caminhão com apenas eixo traseiro e 16.000 kg de massa. Nota-se que embora a população de colmos tenha aumentado, provavelmente devido ao maior contato do solo úmido com o colmo, houve queda de aproximadamente 10 t ha^{-1} entre o nível máximo de compactação e a testemunha sem compactação.

Avaliações da qualidade física do solo podem ser feitas por meio de determinações indiretas que avaliam a quantidade de agregados estáveis em água (SILVA *et al.*, 2000; PACHECO; CANTALICE, 2011; SOUZA *et al.*, 2012). Métodos que quantifiquem e qualifiquem as condições estruturais são importantes para avaliar a qualidade do solo. Ceddia *et al.* (1999) estudando sistemas de colheita da cana-de-açúcar e alterações de atributos físicos, observaram no sistema de cana queimada a degradação dos atributos do solo evidenciada pela redução do diâmetro médio ponderado dos agregados estáveis e pelo aumento da densidade do solo. Souza *et al.* (2005) estudando os sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar, verificaram que o sistema de cana crua com incorporação da palha proporciona maior produção de colmos, maiores teores de matéria orgânica e maior estabilidade de agregados quando comparado ao sistema cana crua sem incorporação da palhada e cana queimada.

Considerando que o desenvolvimento do setor sucroalcooleiro ocorra de maneira sustentável é necessário quantificar os níveis de pressão que podem ser aplicados aos solos para evitar a sua compactação, bem como a identificação e a quantificação dos efeitos causados pelo manejo da cultura sobre o solo, de tal maneira que seja possível ajustar o manejo de forma condizente com o desenvolvimento sustentável para o setor.

2.2. Compactação do solo

A conversão de áreas naturais, tais como florestas, a sistemas agrícolas de produção promovem um desequilíbrio no ecossistema, a retirada da cobertura vegetal original e a implantação de culturas agrícolas, aliadas às práticas de manejo inadequadas, resultam no rompimento do equilíbrio entre o solo e o meio, alterando desta forma, seus atributos químicos, físicos e biológicos, comprometendo a sustentabilidade da sua utilização agrícola, visto que, o solo mantido em estado natural, sob vegetação nativa, apresenta características físicas adequadas ao desenvolvimento normal das plantas.

A compressão do solo se refere ao processo no qual, devido à ação antrópica, ocorre decréscimo no volume e deformação do solo, ou seja, quando uma força externa é aplicada (GUPTA; ALLMARAS, 1987; KOOLEN, 1994; DIAS JUNIOR 200). A compressão de solos saturados é chamada consolidação, enquanto que a compressão de solos não saturados é conhecida como compactação (GUPTA; ALLMARAS, 1987; HORN; LEBERT, 1994). Durante o processo de consolidação, a água é excluída dos poros da matriz do solo (BRADFORD; GUPTA, 1986). O processo de compactação, entretanto, é caracterizado pela

exclusão de ar (HAKANSSON *et al.*, 1988). Dias Júnior (2000) define compactação do solo como a compressão do solo não saturado, o que provoca uma reorganização estrutural das partículas e de seus agregados, resultando em aumento da densidade do solo e redução da porosidade total e dos macroporos. Para Hillel (1980) a compactação do solo ocorre quando o solo perde sua porosidade, em razão do rearranjo de suas partículas e agregados, em decorrência da deformação e da reorganização das partículas sólidas e do deslocamento do ar presente nos poros.

Segundo Alakukku e Elomen (1994) a compactação do solo destaca-se em nível mundial como sendo um dos fatores limitantes da qualidade física do solo das áreas agrícolas, prejudicando a obtenção de maiores índices de produtividade, visto que, em solos compactados, o desenvolvimento das plantas é menor em decorrência do impedimento mecânico ao crescimento radicular, o qual resulta em menor volume de solo explorado, menor absorção de água e nutrientes e, conseqüentemente, menor produção das culturas (VIEIRA; MUZILLI, 1984; BALL *et al.*, 1997; TORMENA *et al.*, 1998; RODRIGUES *et al.*, 2009; MATERECHERA, 2009; ALAMEDA *et al.*, 2012). Canillas e Salokhe (2002) apontam, ainda, a compactação dos solos como sendo um dos principais causadores da degradação dos solos agrícolas.

As zonas compactadas do solo são definidas como sendo o resultado da deterioração da sua estrutura, tendo como principal consequência a diminuição da porosidade do solo nas camadas logo abaixo da profundidade de trabalho dos órgãos ativos das máquinas. São descritos dois tipos de alterações nas camadas do solo: aquelas de origem genética que resultam da ação lenta e contínua dos processos pedogenéticos, formando horizontes de impedimento à penetração de raízes e água, denominadas adensamento; e aquelas resultantes de forças aplicadas ao solo, portanto, de origem antrópica, denominadas compactação (LANÇAS, 1996; BALL 1997; ALAMEDA *et al.*, 2012).

O processo de compactação depende de fatores externos e internos (LEBERT; HORN, 1991; DIAS JÚNIOR *et al.*, 1999). Os fatores externos são caracterizados pelo tipo, intensidade e frequência de carga aplicada (RAGHAVAN *et al.*, 1990; LEBERT; HORN, 1991; BEUTLER *et al.*, 2007), enquanto que os fatores internos são histórico da tensão (REINERT, 1990; DIAS JÚNIOR, 1994), umidade (SOANE, 1990; DIAS JÚNIOR, 1994; SAFFIH-HDADI *et al.*, 2009), textura (GUPTA; ALLMARAS, 1987; BEUTLER *et al.*,

2007), estrutura (DEXTER; TANNER, 1973; GUIMARÃES *et al.*, 2009), densidade inicial do solo (GUPTA *et al.*, 1985) e teor de carbono (HAKANSSON; VOORHEES, 1997; REINERT *et al.*, 2008).

Segundo Smucker e Erickson (1989), a compactação do solo pode ter efeitos benéficos ou adversos. Os efeitos benéficos têm sido atribuídos à melhoria do contato solo-semente e ao aumento da disponibilidade de água em anos secos (RAGHAVAN; MICKYES, 1983; DIAS JÚNIOR, 2000). Por outro lado, a compactação excessiva pode limitar a adsorção de nutrientes, infiltração e redistribuição de água, trocas gasosas e desenvolvimento do sistema radicular, resultando em decréscimo da produção, aumento da erosão e da potência necessária para o preparo do solo (SOANE, 1990).

A compactação do solo leva ao aumento da densidade do solo, ao aumento da resistência do solo à penetração radicular, à redução da aeração, à alteração do fluxo de calor, além de afetar diversos atributos do solo como a condutividade hidráulica, a permeabilidade do solo, a infiltração da água e outros atributos ligados à porosidade do solo (HAKANSSON; VOORHEES, 1997; RABELLO; CRUVINEL, 2009). Para Beltrame e Taylor (1980) no solo compactado há redução da infiltração de água, com conseqüente aumento do escoamento superficial, podendo causar redução do teor de água do solo para desenvolvimento da planta; redução da capacidade de aeração, ocasionado pela redução do espaço de vazios no solo; diminuição da permeabilidade, gerado pela redução dos macroporos e aumento da densidade do solo, provocando impedimento mecânico que limita o crescimento do sistema radicular.

O teor de água no solo é um fator indispensável para que o processo de compactação ocorra (HAMZA; ANDERSON, 2005; TIMM *et al.*, 2006) quando seco, o solo é bastante coeso e apresenta grande resistência à compactação; em contrapartida, à medida que ele vai umedecendo, ocorre a formação de um pequeno filme de água entre os agregados do solo, facilitando o deslocamento e o rearranjo das partículas sólidas da matriz do solo, diminuindo a resistência do solo à compactação (HILLEL, 1980).

A pressão exercida pelo tráfego de máquinas sobre o solo, quando esse se encontra em condições de excesso de umidade e não revolvimento anual do solo, é uma das principais causas da compactação excessiva observada em áreas agrícolas e que resulta em danos à produção das culturas vegetais, pois o teor de água no solo é um dos principais fatores controladores da compactação (HAMZA; ANDERSON, 2005). Portanto, algumas atividades,

como a aplicação de agroquímicos para o combate de pragas e doenças ou a colheita, não permitem que o agricultor possa utilizar máquinas apenas quando o solo está em condições adequadas (RICHART *et al.*, 2005). Assim, além do desenvolvimento de máquinas com menor potencial para a compactação, o manejo do solo com vistas a melhorar sua resistência à compactação é uma alternativa que pode ajudar a mitigar tais danos.

O crescimento do setor sucroalcooleiro no estado de São Paulo tem sido sustentado com a utilização intensiva de máquinas e implementos agrícolas (SOUZA *et al.*, 2005). Isso contribui para aumentar as áreas com problemas de compactação, provavelmente pela ausência de um cronograma de trabalho bem definido ou de modelos capazes de estimar a capacidade de suporte do solo (FIGUEIREDO *et al.*, 2000). Muitas vezes, o preparo do solo é realizado sem levar em conta sua umidade, a qual é um fator controlador da compactação (DIAS JÚNIOR; PIERCE, 1996).

Pesquisadores têm demonstrado claramente o efeito da compactação nos atributos físicos do solo (SILVA *et al.*, 1994; DIAS JÚNIOR, 2000; TORMENA *et al.*, 2002; FIDALSKI *et al.*, 2007). A compactação aumenta a densidade do solo e a resistência do solo à penetração (IMHOFF *et al.*, 2001) e diminui a porosidade total, tamanho e continuidade dos poros (SOUZA *et al.*, 2006a). Reduções significativas ocorrem principalmente no volume de macroporos, enquanto os microporos permanecem praticamente inalterados. Segundo Hakansson e Voorhees (1997) sistemas que proporcionam pouco revolvimento do solo e apresentam tráfego de máquinas pesadas, pode promover compactação do solo até 0,4 m, como no sistema de cultivo da cana-de-açúcar.

Portanto, a compreensão do processo de compactação dos solos agrícolas é fundamental, tendo em vista um manejo racional do solo, sendo que a mitigação dos efeitos da compactação do solo contribui para o desenvolvimento do sistema radicular das culturas possibilitando a sustentabilidade da agricultura.

2.3. Variabilidade espacial de atributos do solo

O solo é um corpo natural dinâmico e variável, o qual demonstra mudança espacial de seus atributos tanto vertical como horizontalmente apresentando-se como corpo não homogêneo. A heterogeneidade é uma característica intrínseca dos solos, porém, o cultivo resulta em alterações aumentando ainda mais a variabilidade dos seus atributos. Em uma área

na qual o solo apresenta-se aparentemente homogêneo, uma propriedade em alguns pontos pode revelar grandes variações de valores, pois o solo é produto da ação de diversos fatores de formação (material de origem, clima, organismos, relevo e tempo) e varia continuamente na superfície.

Avanços tecnológicos na agropecuária demonstram a necessidade de mensurar a variação espacial dos atributos do solo, com o objetivo de melhorar o aproveitamento de recursos naturais e financeiros, uma vez que essa variabilidade espacial dos atributos químicos, físicos e biológicos do solo influencia a eficiência do manejo das culturas e seu desenvolvimento (MONTANARI *et al.*, 2012). A aplicação de tecnologia associada à variabilidade espacial faz-se necessária, sobretudo na pesquisa agrícola que estuda o solo e a sua capacidade produtiva (GREGO; VIEIRA, 2005).

A variabilidade de atributos do solo é espacialmente dependente, ou seja, dentro de certo domínio, as diferenças entre os valores de um atributo do solo podem ser expressas em função da distância de separação entre as observações medidas, demonstrando que a variabilidade do solo não é puramente aleatória, ou seja, apresenta correlação espacial (SALVIANO *et al.*, 1998; SILVA *et al.*, 2003; CORÁ *et al.*, 2004; SOUZA *et al.* 2004a; NOVAES FILHO *et al.*, 2007). De acordo com BERNER *et al.* (2007), essa dependência pode invalidar o uso de análises estatísticas convencionais em experimentos de campo, especialmente naqueles que utilizam grandes parcelas.

Quando um determinado atributo do solo varia de um local para outro, com algum grau de organização ou continuidade expresso por meio da dependência espacial, a estatística clássica deve ser aliada a geoestatística. Por estatística clássica entende-se aquela que utiliza variáveis como média e desvio padrão para representar uma população e, baseia-se na hipótese principal de que as variações de um local para outro são aleatórias e com distribuição de frequência (VIEIRA, 2000).

Os métodos geoestatísticos foram originalmente desenvolvidos e aplicados em mineração, mas passaram a ser usados para uma análise e descrição detalhada da variabilidade dos atributos do solo (VIEIRA, 2000; CARVALHO *et al.*, 2002). A geoestatística é baseada na teoria das variáveis regionalizadas, onde a variabilidade espacial é caracterizada por meio de autorrelação, semivariogramas e métodos de interpolação (SILVA *et al.*, 1989; VIEIRA *et al.*, 1997), que definem o grau de dependência na área medida e o alcance de cada

amostragem. Neste sentido, a teoria das variáveis regionalizadas apresenta-se como importante ferramenta para análise da estrutura da dependência espacial das variáveis, indicando o número e a distribuição de amostras a serem coletadas, sem prejuízo para a representatividade, possibilitando maior detalhamento da área (VENDRUSCULO, 2002).

De acordo com Novaes Filho *et al.* (2007), o estudo da variabilidade espacial de atributos do solo tem grande importância na orientação de amostragens, interpretação dos resultados e, ainda no levantamento e na classificação de solos. Os atributos do solo vêm apresentando dependência espacial, o que significa dizer que pontos próximos têm valores de atributos mais similares do que pontos separados por distâncias maiores (VIEIRA, 2000).

As frações granulométricas do solo (areia, silte e argila) têm sido mencionadas dentre os atributos físicos do solo, como as de menor variação de acordo com a escala de amostragem (AMARO FILHO *et al.*, 2007; CAMPOS *et al.*, 2007). Em relação aos modelos ajustados a densidade do solo, porosidade total, macro e microporosidade têm se ajustado normalmente aos modelos matemáticos esférico e exponencial (SOUZA *et al.*, 2004a; CAMPOS *et al.*, 2007). Quanto ao alcance os maiores valores têm sido atribuídos à porosidade total e umidade do solo (SOUZA *et al.*, 2004a) e os menores valores à resistência do solo à penetração (GREGO; VIEIRA, 2005). A dependência espacial quando presente tem sido relatada como de moderada a forte para a maioria dos atributos físicos do solo (SOUZA *et al.*, 2006b; SIQUEIRA *et al.*, 2008).

Geralmente, a variabilidade das produtividades das culturas acompanha a do solo e, é imprescindível conhecer quais atributos exercem as maiores influências (Marques Júnior *et al.*, 2000). Dessa forma, pesquisas têm sido desenvolvidas no sentido de estudar a correlação entre atributos do solo e produtividade das culturas (SOUZA *et al.*, 2010; MONTANARI *et al.*, 2012). Megda *et al.* (2008), estudando produtividade de feijão e atributos físicos em Latossolo Vermelho, encontraram baixa correlação linear, porém, do ponto de vista espacial, encontraram correlação inversa entre produtividade de feijão e porosidade total expressa pelo semivariograma cruzado. Santos *et al.* (2006) encontraram correlação linear não significativa entre a produtividade de milho e os atributos físicos do solo em sistema plantio direto. Johann *et al.* (2004), estudando atributos físicos e produtividade de soja, observaram que a resistência do solo à penetração na camada de 0,0 a 0,1 m, foi a característica do solo que apresentou a melhor correlação com a produtividade.

Portanto, conhecer a variabilidade espacial de atributos do solo relacionados a processos responsáveis pela produtividade das culturas é importante para definição de um manejo do solo o qual vise à sustentabilidade da produção agrícola.

2.4. Resíduos vegetais no sistema cana crua

Com a adoção da colheita mecanizada nas áreas cultivadas com cana-de-açúcar, em virtude das preocupações ambientais, a quantidade de material orgânico aportado ao solo nestas áreas aumentou substancialmente, o que pode vir a contribuir positivamente para sustentabilidade da produção de cana-de-açúcar.

Aproximadamente 22% da fitomassa seca total da planta de cana-de-açúcar é aproveitada na indústria e os 78% restantes são os resíduos de colheita, sendo que a quantidade de palhada de canaviais colhidos sem queima varia de 10 a 30 t ha⁻¹ (TRIVELIN *et al.*, 1996). A palha da cana-de-açúcar, após o corte permanece sobre o solo. Os resíduos da colheita podem ser deixados no campo em área total, entrelinhas ou entrelinhas alternadas. Atualmente, o sistema de colheita mecânica de cana crua é considerado plenamente viável, pois a presença de palhada sobre o solo proporciona proteção e fornecimento de matéria orgânica para o solo, melhorando seus atributos físicos e químicos (FURLANI NETO *et al.*, 1996; SOUZA *et al.*, 2005).

Os estudos de Mendonza *et al.* (2000) em áreas cultivadas com cana-de-açúcar sob diferentes sistemas de corte num Argissolo Amarelo, textura arenosa, verificaram, após 5 anos, incremento no teor de carbono orgânico na camada de 0,0 a 0,1 m, com aumento da fração humina e ácidos fúlvicos na matéria orgânica do solo, importantes na agregação do solo, em cana crua comparada à queimada. Braida *et al.* (2006) estudando o efeito dos resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio proctor em sistema de plantio direto, verificaram que a presença de palha sobre o solo, durante a realização do ensaio Proctor, resultou em dissipação de parte da energia de compactação utilizada, com redução da densidade máxima obtida, confirmando a hipótese de que a palha existente sobre o solo foi capaz de absorver parte da energia de compactação produzida pelo trânsito de máquinas e animais.

Além dos efeitos sobre a coesão e o atrito entre as partículas minerais, acredita-se que a matéria orgânica possa aumentar a elasticidade do solo. Os materiais orgânicos são flexíveis,

pouco densos e elásticos, ou seja, apresentam uma elevada capacidade de recuperar a forma original após sofrer deformação por aplicação de uma força. Soane (1990) apresenta resultados de pesquisas que demonstram que o índice de relaxação da palha de trigo, por exemplo, pode chegar a 50%, dependendo do estado de decomposição e do tamanho das partículas.

Teoricamente, a elasticidade permitiria que as partículas orgânicas, que ligam partículas minerais do solo, sejam deformadas enquanto as partículas minerais são deslocadas, durante a deformação provocada pela aplicação de uma carga, sem que as ligações se rompam totalmente (SOANE, 1990). Ao cessar a aplicação da carga, as partículas orgânicas tenderiam a retornar à forma original, deslocando consigo as partículas minerais, resultando em expansão do solo após o descarregamento. Esse efeito seria tanto maior quanto maior fosse a presença de partículas orgânicas estabelecendo ligações entre as partículas minerais.

Além do provável enriquecimento de matéria orgânica do solo, o sistema de cana crua permite o acúmulo de resíduos orgânicos na superfície do solo. A baixa densidade desses resíduos orgânicos, associada com sua susceptibilidade à deformação e elasticidade, torna-os potencialmente capazes de atenuar as cargas aplicadas sobre o solo. Essa possibilidade foi confirmada por Dao (1996), ao observar que a remoção dos resíduos vegetais da superfície do solo resultou em aumentos na densidade do solo, especialmente na camada entre 0,05 e 0,125 m de profundidade, no sistema de cultivo convencional e, entre 0,0 e 0,1 m no plantio direto. O autor conclui, ainda, que a manutenção de grandes quantidades de resíduos vegetais na superfície do solo contribuiu para uma maior macroporosidade na camada superficial em solos sob cultivo conservacionista.

Durante a compressão de um corpo deformável, como os resíduos vegetais, enquanto o mesmo se deforma não há transmissão total da carga recebida. Isso só irá acontecer depois que ele sofreu a deformação. Assim, durante a passagem de uma carga sobre um terreno, contendo na superfície resíduos vegetais mais deformáveis que o solo, espera-se uma redução do tempo de efetiva aplicação da carga sobre o solo. Essa redução é o tempo necessário para deformar o resíduo vegetal (SOANE, 1990; BRAIDA, 2004).

Por outro lado, a deformação de um corpo que sofre o impacto de uma carga é feita à custa da energia resultante desse impacto. Parte dessa energia é absorvida pelo corpo, o que permite que um corpo elástico recupere parte a forma inicial após a retirada da carga aplicada

(BRAIDA *et al.*, 2008). Outra parte desta energia é dissipada na forma de calor ou transformada em outras formas de energia. Portanto, espera-se que os resíduos existentes sobre o terreno absorvam parte da carga aplicada sobre o mesmo, reduzindo a carga efetiva aplicada sobre o solo e, com isso, ocorra redução da resistência do solo à penetração (BRAIDA, 2004).

Estudos têm demonstrado que resíduos da colheita diminuem o efeito da compactação do solo pelo aumento do teor de matéria orgânica nas camadas superficiais, como também pela diminuição da energia dos rodados devido à cobertura do solo (ZHANG *et al.*, 1997; SOUZA *et al.*, 2005). Entretanto, a influência da adição de matéria orgânica na compactação do solo não é bem documentada. Particularmente, a informação é escassa em interações entre a matéria orgânica, e o teor de água do solo na hora da compactação e da energia comprimida da máquina agrícola em áreas cultivadas com cana-de-açúcar.

O aumento na quantidade de palha na superfície do solo pode reduzir significativamente a pressão atuante no solo, até 0,2 m de profundidade, bem como reduzir o afundamento superficial, confirmando a hipótese de que os resíduos superficiais podem dissipar cargas aplicadas sobre o solo. Assim, acredita-se que o sistema de cana colhida mecanicamente (cana crua) pode reduzir o efeito da compactação em áreas cultivadas com cana-de-açúcar. Para isso, no entanto, é preciso que o sistema seja conduzido de forma tal que permita a manutenção de uma camada de resíduos vegetais na superfície do solo desde sua implantação.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1. Localização e descrição da área de estudo

O experimento foi realizado em lavouras comerciais de cana-de-açúcar pertencentes à Usina São Martinho, localizada no Município de Pradópolis – SP (21°18'67" de latitude sul e 48°11'38" de longitude oeste, 630 m de altitude).

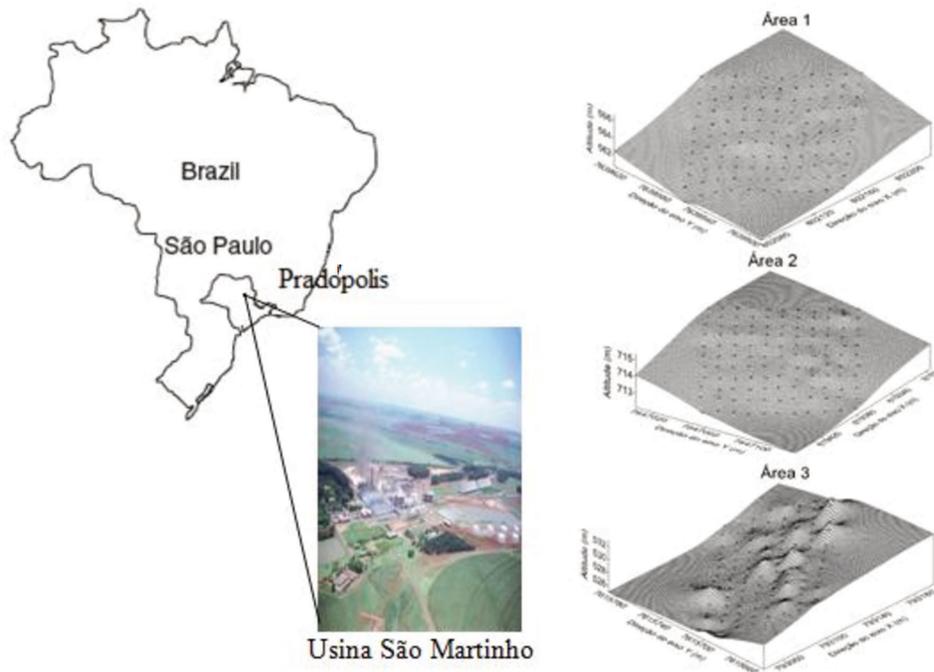


Figura 1. Localização das áreas estudadas na Usina São Martinho, Pradópolis-SP.

O clima da região é o mesotérmico de inverno seco (Cwa), pelo critério de classificação de Köppen, com precipitação anual de 1.408 mm, com chuvas concentradas no período de novembro a março (Figura 2).

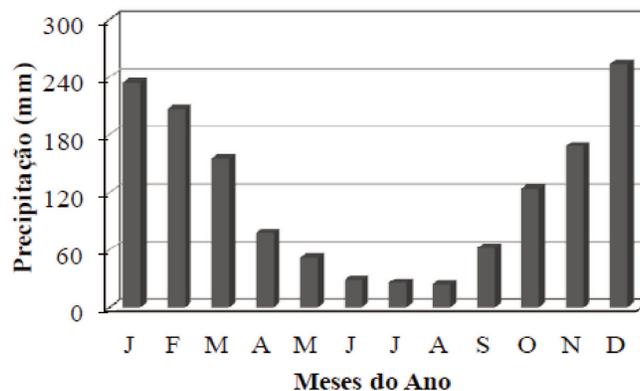


Figura 2. Precipitação média mensal do município de Pradópolis – SP. Série histórica mensal de 1966 a 2002 (Fonte: ANA, 2012).

O solo foi coletado em três áreas (Figura 1), cultivadas com cana-de-açúcar (*Saccharum officinarum*), descritas a seguir: 1- cana-de-açúcar sem queima e corte mecanizado, desde 1996 (com 16 anos de implantação do sistema de cana crua); 2- cana-de-açúcar sem queima e corte mecanizado, desde 2004 (com 8 anos de implantação do sistema de cana crua); 3- cana-de-açúcar com queima e corte manual, desde 1973 (cana queimada) e preparo reduzido.

O solo nas três áreas foi classificado como Latossolo Vermelho distrófico típico (LVd), textura argilosa com horizonte A moderado, conforme Embrapa (2006). A caracterização física e química do solo é apresentada na Tabela 2:

Tabela 2. Caracterização granulométrica⁽¹⁾ e química⁽²⁾ do Latossolo Vermelho nas camadas de 0,00-0,10, 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m.

Camadas (m)	pH	P mg dm ⁻³	K -----mmol _c dm ⁻³	Ca	Mg	H+Al -----mmol _c dm ⁻³	SB	CTC	V ----%----	MO	Argila -----g kg ⁻¹ -----	Silte	Areia
0,00-0,10	5,4	163	12	64	30	42	106	149	72	5,4	534	310	154
0,10-0,20	4,8	45	8	24	14	47	46	93	49	3,8	555	298	146
0,20-0,30	4,9	71	9	32	18	52	59	111	53	3,6	581	288	129

⁽¹⁾Método da pipeta com baixa rotação (Camargo *et al.*, 1986); ⁽²⁾Métodos de análise química (Raij *et al.*, 2001).

As áreas 1, 2 e 3 foram reformadas em agosto de 2007, ocasião em que realizou-se inicialmente a eliminação mecânica da soqueira da lavoura anteriormente instalada e subsolagem na profundidade de 0,45 m apenas nos sulcos de plantio (subsolador marca Stara e modelo Asa Lazer de 5 hastes, espaçadas 0,40 m uma das outras com ponteiros tipo “botinhas”), seguido de gradagem com grade aradora (28 discos com diâmetro de 28”). O manejo de adubação seguiu as recomendações para a cultura, foram aplicados 2,5 Mg ha⁻¹ de calcário dolomítico antes do revolvimento do solo com grade aradora e 20 Mg ha⁻¹ de torta de filtro no plantio. Em julho de 2009 e 2010, após cada colheita, foram aplicados na área 280 e 260 kg ha⁻¹, respectivamente, do formulado 32-00-02 e 100 m³ ha⁻¹ de vinhaça, sendo a cultura mantida livre de infestação de pragas e plantas daninhas.

A cana-de-açúcar (*Saccharum* sp.), variedade RB855453, foi instalada em agosto de 2007, apresentando em 2010 uma produtividade referente à terceira colheita (segunda soca). A variedade RB855453 apresenta como características morfológicas e agrônomicas: colmos eretos de difícil tombamento, colmos medianamente empalhados, de diâmetro médio a grosso,

com cor verde amarelado, mas levemente arroxeadada quando exposta ao sol, com elevada produtividade e teor de sacarose, alta exigência em ambientes de produção, brotação ótima, perfilhamento médio, bom fechamento, teor de fibra médio, época recomendada para colheita de maio a julho (HOFFMANN *et al.*, 2008).

As operações mecanizadas foram realizadas com trator marca Case IH modelo Magnum MX-270, tração 4x4, potência máxima do motor de 270 cv (198 kW), massa de 11,7 Mg (4,7 Mg sobre o eixo dianteiro e 7,0 Mg sobre o traseiro) e pneus marca Trelleborg TM900, sendo os traseiros do tipo 650/85 R38 e os dianteiros o 600/70 R30, com pressão de inflação de 20 e 23 libras (110 e 150 kPa), respectivamente, para tracionar os implementos.

Nas áreas 2 e 3, sob colheita mecanizada, foi utilizada colhedora de esteira marca Case IH modelo A-7700, bitola de 1,88 m, rodado tipo esteira, potência máxima do motor de 335 cv (246 kW) e massa de 18,5 Mg com esteiras de 2,96 x 0,46 m e trator Case MX-270, tracionando um transbordo de três compartimentos, massa total de 40 Mg e pneus Trelleborg Twin404 600/50 R22,5 com pressão de inflação de 20 libras (110 kPa).

3.2. Coleta das amostras de solo

Fez-se a amostragem das três áreas, em agosto de 2009, sendo coletadas amostras deformadas e indeformadas. As amostras deformadas foram usadas nas seguintes determinações: granulometria, ensaio de Proctor, teor de água no solo, teor de matéria orgânica, limites de liquidez, plasticidade e contração e as indeformadas nas seguintes determinações: porosidade do solo (total, macro e microporosidade), densidade do solo, estabilidade de agregados em água.

A amostragem da resistência do solo à penetração, porosidade do solo, densidade do solo, estabilidade de agregados e teor de matéria orgânica foi realizada nos pontos de cruzamento de uma malha, com intervalos regulares de 10 m nas três áreas, perfazendo o total de 121 pontos por área. Em cada ponto desta malha foi levantada a sua cota, com o auxílio de uma estação total e georreferenciados com DGPS. Para determinação dos demais atributos do solo em estudo, foram coletadas amostras em 36 pontos, da malha amostral citada acima, espaçados em intervalos regulares de 20 m.

Para a retirada das amostras, foram abertas trincheiras, espaçadas a 0,20 m da soqueira (Figura 3); 121 mini-perfis com 0,50 m de profundidade, 0,40 m de largura e 0,60 m

de comprimento foram abertos em cada uma das áreas, perfazendo um total de 363 mini-perfis por área, sendo a amostragem realizada nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m (Figura 3).

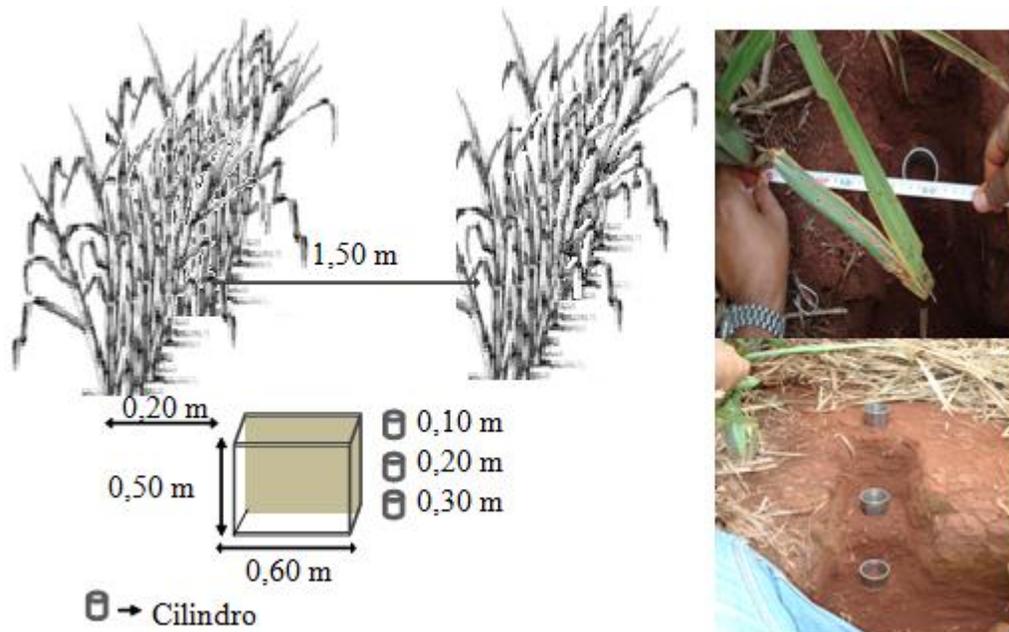


Figura 3. Esquema do local de coleta das amostras de solo.

3.3. Determinação dos atributos do solo

3.3.1. Análise Granulométrica

A análise granulométrica da terra fina foi realizada pelo método da pipeta, utilizando-se solução de NaOH 0,1N como dispersante químico e agitação com aparato de baixa rotação (CAMARGO *et al.*, 1986). A areia grossa e fina foi separada por tamisação e o silte calculado por diferença.

3.3.2. Densidade e porosidade do solo

Amostras indeformadas foram coletadas para determinação da microporosidade em mesa de tensão e corresponde à umidade volumétrica da amostra submetida a uma tensão de 6 kPa após saturação (EMBRAPA, 1997). A porosidade total e a densidade do solo foram obtidas mensurando o teor de água que ocupou todo espaço poroso e a massa de solo seco, respectivamente, ambos em relação ao volume de solo, enquanto a macroporosidade por diferença entre a umidade volumétrica da amostra saturada (porosidade total) e na microporosidade (EMBRAPA, 1997).

3.3.3. Estabilidade de agregados

As amostras de solo para determinação da estabilidade de agregados foram coletadas nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m e acondicionadas em sacos plásticos com capacidade de 2,0 kg, de modo que os agregados não sofressem deformação. Em laboratório, procedeu-se um prévio destorroamento das amostras fazendo uma leve pressão para o rompimento dos agregados em seus pontos de fraqueza. Posterior a esse procedimento transferiu-se parte do volume de solo coletado para um jogo de duas peneiras de malha de 6,35 mm e de 2,0 mm, procedendo-se o tamisamento em um agitador de peneiras por 15 minutos. Para o estudo da estabilidade de agregados, foi utilizado o material que passou na peneira com malha de 6,35 mm e ficou retido na peneira com malha de 2,00 mm.

A estabilidade de agregados foi medida pelo método descrito por Kemper e Chepil (1965), por meio de tamisamento úmido, utilizando-se uma sub-amostra de 20 g. Para peneiramento dos agregados em água, utilizou-se as peneiras com diâmetros de malha 4,76, 2,0, 1,0, 0,5 e 0,25 mm, separando os agregados nas seguintes classes: C₁ (9,52-4,76 mm), C₂ (4,76-2,0 mm), C₃ (2,0-1,0 mm), C₄ (1,0-0,5 mm), C₅ (0,5-0,25 mm) e C₆ (< 0,25 mm).

O estado de agregação das amostras de solo foi avaliado pelos índices de diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG). Foram utilizadas as seguintes equações:

$$DMP = \sum_{i=1}^n x_i w_i \quad (1)$$

$$DMG = \exp \left[\frac{\sum_{i=1}^n w_i \log x_i}{\sum_{i=1}^n x_i} \right] \quad (2)$$

Em que:

w_i = proporção em massa de cada classe em relação ao total;

x_i = diâmetro médio das classes (mm).

3.3.4. Teor de matéria orgânica do solo

As amostras de solo para determinação do teor de matéria orgânica do solo foram coletadas nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m e acondicionadas em sacos plásticos, posteriormente secas ao ar, destorroadas e passadas em peneira de 2,0 mm de abertura. Foram retiradas 50 g de solo, da amostra, moídas em grau de porcelana e passadas

em peneira de malha de 0,42 mm de abertura. A quantificação do teor de matéria orgânica foi obtida por meio da metodologia proposta pela EMBRAPA (1997).

3.3.5. Teor de água no solo e resistência do solo à penetração

O teor de água no solo foi obtido pelo método gravimétrico em amostras deformadas (EMBRAPA, 1997). Para determinação da resistência do solo à penetração, foi utilizado um penetrômetro de impacto modelo IAA/Planalsucar com ângulo de cone de 30°. A transformação da penetração da haste do aparelho no solo (cm/impacto) em resistência à penetração foi obtida pela fórmula de Stolf (1991), a seguir:

$$R = \frac{[Mg + mg + \left(\frac{M}{M+m} \times \frac{Mg \times h}{x}\right)]}{A} \quad (3)$$

onde: **R** é a resistência à penetração, kgf cm⁻² (kgf cm⁻² * 0,098 = MPa); **M** a massa do êmbolo, 4 kg (Mg - 4 kgf); **m** a massa do aparelho sem êmbolo, 3,2 kg (Mg - 3,2 kgf); **h** a altura de queda do êmbolo, 40 cm; **x** a penetração da haste do aparelho, cm/impacto, e **A** a área do cone, 1,29 cm².

3.3.6. Limites de consistência do solo

O limite de liquidez (LL), que corresponde ao teor de umidade do solo quando são necessários 25 golpes no aparelho de Casagrande para fechar uma ranhura padrão aberta na superfície da amostra e o limite de plasticidade (LP), que corresponde à umidade na qual ao se moldar um cilindro de solo com 3,0 mm de diâmetro surgem fissuras na superfície do mesmo (início da fragmentação), foram determinados conforme SOWERS (1965) enquanto que o limite de contração, o qual representa o teor de umidade abaixo do qual o solo não mais se contrai, mesmo que continue a perder umidade, foi determinado conforme BOWLES (1986).

3.3.7. Ensaio de proctor normal

A densidade do solo máxima e a umidade ótima de compactação foram determinadas pelo ensaio de Proctor normal, como também a capacidade da palhada dissipar parte da energia exercida pelas rodas das máquinas. O ensaio consiste em compactar uma amostra de solo dentro de um cilindro, com um volume aproximado de 1000 cm³, em três camadas sucessivas, com a aplicação de 25 golpes com um soquete com peso de 2,5 kg a uma altura de queda de 0,3 m. Desta forma tem-se uma energia de compactação de 6,0 kg cm cm⁻³. O ensaio foi repetido para diferentes umidades (pelo menos cinco corpos de prova com umidades

crescentes), obtendo-se assim, para cada valor de umidade, uma densidade do solo. Em seguida foram plotados os resultados em um gráfico (umidade gravimétrica *versus* densidade do solo) e ajustando em seguida um polinômio de 2^o grau ($D_s = aU^2 + bU + c$), obtendo-se, a curva de compactação, com a umidade ótima ($U_{ót}$) e densidade do solo máxima ($DS_{máx}$) obtidas pela expressão:

$$U_{ót} = \frac{-b}{2a} \quad (4)$$

$$DS_{máx} = \frac{-(b^2 - 4ac)}{4a} \quad (5)$$

em que: a, b e c = coeficientes da equação.

Para avaliar a capacidade dos resíduos vegetais em absorver a energia de impacto de tráfego de maquinário agrícola, o ensaio Proctor foi realizado com a aplicação de uma camada de palha, que foi retirada após colheita da cana-de-açúcar, sobre o solo dentro do cilindro do aparelho de Proctor, em quantidades de palha correspondentes a 0, 3, 6, 12 e 20 t ha⁻¹ de matéria seca, conforme trabalho desenvolvido por Braida et al. (2006). Essas determinações foram realizadas com o emprego de dois níveis de energia (3,61 e 6,02 kgf cm cm⁻³) e 3 repetições, resultando em 10 tratamentos: 1- sem palha e 6,02 kgf cm cm⁻³; 2- 3 t ha⁻¹ de palha e 6,02 kgf cm cm⁻³; 3- 6 t ha⁻¹ de palha e 6,02 kgf cm cm⁻³; 4- 12 t ha⁻¹ de palha e 6,02 kgf cm cm⁻³; 5- sem palha e 3,61 kgf cm cm⁻³; 6- 3 t ha⁻¹ de palha e 3,61 kgf cm cm⁻³; 7- 6 t ha⁻¹ de palha e 3,61 kgf cm cm⁻³ e 8- 12 t ha⁻¹ de palha e 3,61 kgf cm cm⁻³.

Para realização do ensaio, foram coletadas 3 amostras de solo na profundidade superficial (0,00 a 0,05 m de profundidade) com 4,0 kg de solo. Depois de coletadas, as amostras foram levadas para o laboratório, onde foram destorroadas, peneiradas (peneira com abertura da malha de 2,0 mm) e secas ao ar.

3.3.8. Capacidade Suporte de Carga do solo

Para determinação da capacidade suporte do solo, foram amostrados em cada uma das áreas 121 pontos, nos quais se coletaram amostras indeformadas em anéis metálicos (0,05 m de diâmetro por 0,05 m de altura), nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m logo após a colheita da cana-de-açúcar totalizando 363 amostras por área.

A capacidade de suporte de carga do solo representou uma função que relacionou a pressão de preconsolidação do solo com o conteúdo de água no solo. As amostras com

estrutura preservada foram saturadas e secas ao ar no laboratório para obter amostras com conteúdo de água variando de solo seco a saturado, simulando condições do solo no campo (DIAS JÚNIOR, 1994; SILVA *et al.*, 2009).

A pressão de preconsolidação foi quantificada por meio do ensaio de compressão uniaxial, aplicando cargas de 25, 50, 100, 200, 400, 800 e 1600 kPa nas amostras indeformadas (DIAS JÚNIOR, 1994; DIAS JÚNIOR; PIERCE, 1995). Cada pressão foi aplicada até atingir 90% da deformação máxima para, em seguida, aumentar a pressão (TAYLOR, 1971). Os ensaios de compressão uniaxial foram realizados em consolidômetro automático com interação homem-máquina modelo CNTA-IHM/BR-001/07 (Figura4) acoplado ao *software* Linker® (SILVA *et al.*, 2007). As medidas de deformação da amostra para cada pressão aplicada durante o ensaio foram realizadas por meio de um transdutor de deslocamento vertical e registradas por meio de um sensor com aquisição automatizada de dados (SILVA *et al.*, 2007).

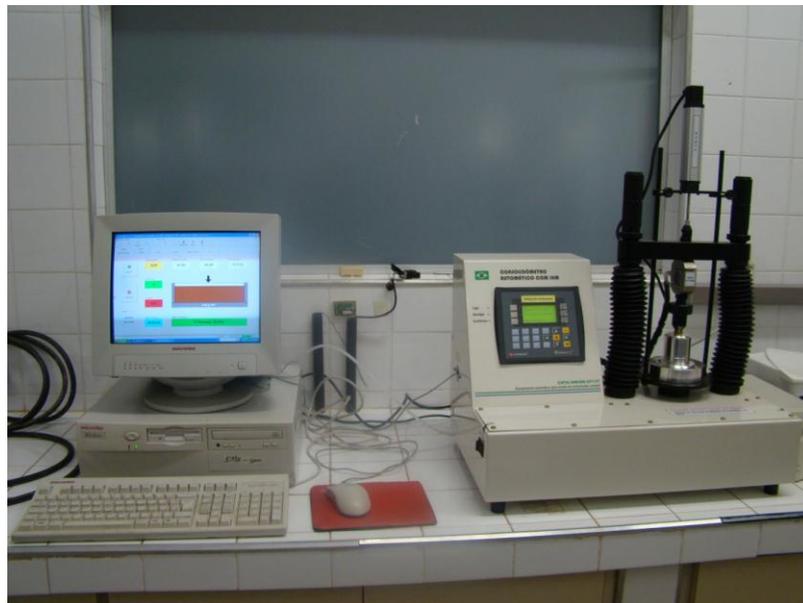


Figura 4. Consolidômetro automático com interação homem-máquina modelo CNTA-IHM/BR-001/07.

Após o ensaio de compressão, as amostras foram secas em estufa a 105°C até massa constatare para determinação da densidade do solo (EMBRAPA, 1997). A partir da curva de compressão (densidade do solo x pressão), foi estimada a pressão de preconsolidação, observando a sugestão dos métodos M1 e M3, conforme Dias Júnior (1994) e Dias Júnior e

Pierce (1995). Curvas de compressão do solo foram obtidas para as amostras em diferentes conteúdos de água no solo, permitindo construir o modelo de capacidade de suporte de carga do solo. Os dados experimentais foram ajustados ao modelo proposto por Dias Júnior (1994):

$$\sigma_p = 10^{(a+b*U)} \quad (1)$$

em que: σ_p é a pressão preconsolidação do solo (kPa), a e b são coeficientes da equação e U é o conteúdo de água no solo (kg kg^{-1}).

3.3.9. Intervalo Hídrico Ótimo

Após o mapeamento da variabilidade espacial da densidade do solo nas áreas de estudo, foram definidas 5 faixas de densidade do solo sendo duas referentes aos valores extremos (inferior e superior), para cada faixa de densidade do solo foram coletadas 32 amostras indeformadas, nas profundidades de 0,00-0,10 m e 0,20-0,30 m, com auxílio de anéis volumétricos do tipo Köpeck com 0,05 m de altura por 0,05 m de diâmetro interno, totalizando 320 amostras por área.

O intervalo hídrico ótimo (IHO) é uma variável do solo que engloba informações da resistência do solo à penetração (RP), densidade do solo (D_s), porosidade de aeração (PA) e conteúdo volumétrico de água do solo (θ).

No laboratório, as amostras foram preparadas e saturadas por meio da elevação gradual de uma lâmina de água numa bandeja, até atingir cerca de 2/3 da altura dos anéis. Em seguida, foram submetidas a diferentes tensões 2, 6, 8, 10, 33, 100, 500 e 1500 kPa, em câmaras de Richards com placas porosas (SILVA *et al.*, 1994). Após atingirem o equilíbrio em cada tensão, as amostras foram pesadas e determinadas a resistência do solo à penetração (RP).

A RP foi determinada em laboratório utilizando um penetrômetro eletrônico marca Marconi, modelo MA-933 (Figura 5), com velocidade constante de $0,1 \text{ m seg}^{-1}$, equipado com uma célula de carga de 200 N, haste com cone de 4,0 mm de diâmetro de base e semi-ângulo de 30° , receptor e interface acoplado a um microcomputador, para registro das leituras por meio de um *software* próprio do equipamento. Para cada amostra foram obtidos 750 valores (250 pontos em 3 repetições por cilindro).



Figura 5. Penetrômetro eletrônico marca Marconi, modelo MA-933.

Em seguida, as amostras foram secas em estufa a 105°C até massa constate. O teor de água no solo em base volumétrica foi quantificado pelo quociente do volume de água retida na amostra em cada tensão e o volume do solo de cada amostra. A D_s foi obtida pela relação massa de solo seco e volume do cilindro (EMBRAPA, 1997).

Os dados de RP foram ajustados em função da densidade do solo e da umidade volumétrica, usando o modelo não linear utilizado por Busscher (1990) e Leão *et al.* (2006):

$$RP = a * D_s^b * \theta^c \quad (7)$$

em que: RP é a resistência do solo à penetração (MPa); D_s é a densidade do solo ($Mg\ m^{-3}$); θ é o conteúdo volumétrico de água do solo ($m^3\ m^{-3}$); e a, b e c são os coeficientes do modelo. Foi determinado o teor de água no solo para cada densidade na qual se atinge a resistência do solo à penetração (θ_{RP}) de 2,0; 2,5; 3,0 e 3,5 MPa (SILVA *et al.*, 1994; CAMARGO; ALLEONI, 1997; LAPEN *et al.*, 2004; SILVA *et al.*, 2011).

A curva de retenção de água no solo que relaciona ao potencial matricial, a umidade e a densidade do solo foi ajustada ao modelo utilizada por Tormena *et al.* (1998) e Leão *et al.* (2006):

$$\theta = \exp(a + b * D_S) * \psi^c \quad (8)$$

em que: θ é o conteúdo volumétrico de água ($m^3 m^{-3}$), ψ é o potencial matricial (MPa); D_S é a densidade do solo ($Mg m^{-3}$); e a , b , c são coeficientes de ajuste do modelo. Assim, foi determinada a variação da umidade na capacidade de campo (θ_{CC}) na tensão de 0,01 MPa (HAISE *et al.*, 1955), e no ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) na tensão de 1,5 MPa (SAVAGE *et al.*, 1996) em função da D_S .

A porosidade de aeração (PA) mínima foi de $0,10 m^3 m^{-3}$, considerado o valor mínimo responsável por uma taxa de difusão adequada de oxigênio da atmosfera até as raízes (GRABLE; SIEMER, 1968; DEXTER, 1988). O teor de água no solo considerando a PA (θ_{PA}) foi calculado pela equação:

$$\theta_{PA} = \left[1 - \frac{D_S}{D_P} \right] - 0,1 \quad (9)$$

em que: θ_{PA} é o conteúdo volumétrico de água ($m^3 m^{-3}$), considerando uma porosidade de aeração de $0,10 m^3 m^{-3}$; D_P e D_S são a densidade de partículas ($Mg dm^{-3}$) e do solo ($Mg dm^{-3}$), respectivamente.

Para determinar o IHO, foi utilizado o método descrito por SILVA *et al.* (1994) e TORMENA *et al.* (1998). Os valores de θ_{RP} , θ_{CC} e θ_{PMP} foram linearizados de acordo com a D_S utilizando a transformação logarítmica. Os limites superiores do IHO foram θ_{CC} e/ou θ_{PA} , enquanto os limites inferiores foram θ_{PMP} e/ou θ_{RP} . A densidade do solo crítica ao crescimento e desenvolvimento das plantas (D_{SC}) foi considerada como o valor de D_S em que o IHO é igual a zero.

3.4. Mapeamento da produtividade da cana-de-açúcar

Para o mapeamento da produtividade da cultura da cana-de-açúcar foram avaliados 121 pontos, em cada uma das três áreas estudadas, referentes aos pontos de cruzamento de uma malha amostral com intervalos regulares de 10 m. Em cada ponto desta malha foi levantada a sua cota, com o auxílio de uma estação total e georreferenciados com DGPS. Para quantificação em toneladas de cana-de-açúcar produzida por hectare foram amostrados 2,0 metros lineares na linha de plantio adjacente ao centro do ponto de cruzamento da malha amostral.

Após a identificação dos pontos, fez-se o corte da cana-de-açúcar manualmente, eliminando-se a palha e os ponteiros, após limpos os colmos foram pesados em balança digital portátil (Figura 6). Os dados foram tabulados e interpolados digitalmente, utilizando-se técnicas de geoestatística e interpolação por meio de krigagem.



Figura 6. Detalhe da mensuração dos dados de produtividade da cultura.

3.5. Análise estatística e geoestatística

Os atributos físicos do solo e os teores de carbono orgânico foram avaliados por meio da análise descritiva, sendo calculados a média, mediana, variância, valores máximos e mínimos, o coeficiente de variação, o coeficiente de assimetria e o coeficiente de curtose. A hipótese de normalidade dos dados foi testada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, por meio do programa computacional SAS (SCHLOTZHAVER; LITTELL, 1997).

A dependência espacial foi analisada por meio de ajustes de semivariogramas (VIEIRA, 2000), com base na pressuposição de estacionariedade da hipótese intrínseca, a qual é estimada por:

$$\hat{\gamma}(h) = \frac{1}{2N(h)} \sum_{i=1}^{N(h)} [Z(x_i) - Z(x_i+h)]^2 \quad (10)$$

em que $N(h)$ é o número de pares experimentais de observações $Z(x_i)$ e $Z(x_i+h)$ separados por um vetor h . O semivariograma é representado pelo gráfico $\hat{\gamma}(h)$, versus h . Do ajuste de um modelo matemático aos valores calculados de $\hat{\gamma}(h)$, são estimados os coeficientes do modelo teórico para o semivariograma (o efeito pepita, C_0 ; patamar, C_0+C_1 ; e o alcance, a). Para analisar o grau da dependência espacial dos atributos em estudo, foi utilizado a classificação de Cambardella *et al.* (1994), em que são considerados de dependência espacial forte os semivariogramas que têm um efeito pepita < 25% do patamar, moderada quando está entre 25 e 75% e fraca, > 75%.

Os modelos de semivariogramas considerados foram o esférico, o exponencial, o linear e o gaussiano, sendo ajustados por meio do programa GS⁺ (versão 7.0) (GAMMA DESIGN SOFTWARE, 2004). Posteriormente, tais modelos foram usados no desenvolvimento de mapas de isolinhas (krigagem). Em caso de dúvida entre mais de um modelo para o mesmo semivariograma, foi considerado o maior valor do coeficiente de correlação obtido pelo método de validação cruzada. Para elaboração dos mapas de distribuição espacial das variáveis, foi utilizado o programa Surfer 9.0 (GOLDEN SOFTWARE, 1999).

As análises de regressão relativas aos diversos atributos físicos e aos ensaios de compressibilidade e Proctor normal foram realizadas segundo o uso do software Sigma Plot® 8.0 e para comparações entre as regressões do ensaio de compressibilidade. As equações ajustadas foram linearizadas e depois comparadas de acordo com o procedimento descrito por Snedecor e Cochran (1989). A análise estatística também constituiu do ajuste de equações

entre o teor de matéria orgânica e umidade ótima, densidade máxima do solo e resistência do solo à penetração que foi realizado usando-se o programa Sigma Plot® 8.0.

Para análise do intervalo hídrico ótimo, foram coletados 160 cilindros (5 densidades, 8 tensões e 4 repetições). Foi utilizado o algoritmo de Leverberg-Marquardt, ajustando modelos lineares. Foi realizada análise de variância para a regressão e os coeficientes foram analisados pelo teste t-Student, ambos ao nível de 5% de significância.

Para o ensaio do Proctor normal com adição de palha, foi utilizado o delineamento inteiramente casualizado em arranjo fatorial 5x2. Os resultados obtidos no ensaio foram submetidos à análise de variância e, se necessário, foi realizado a comparação de médias pelo teste de Tukey ($p < 0,05$) utilizando-se o software SAS (SCHLOTZHAVER; LITTELL, 1997).

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1. Ensaio de Proctor normal

No tratamento com cana queimada, a quantidade de material vegetal deixado na superfície do solo é menor que $3,0 \text{ t ha}^{-1}$, por um período significativo da cultura da cana-de-açúcar, entre a colheita e o início do fechamento das entre linhas. No tratamento com cana crua foi adicionada maior massa de resíduos orgânicos (15 t ha^{-1}).

Os teores de matéria orgânica foram mais alterados na profundidade de 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m, com decréscimo deste atributo em profundidade (Figura 7), apresentando menor teor no sistema de colheita de cana queimada em relação ao sistema de cana crua confirmando os resultados obtidos por Blair *et al.* (1998), Skjemstad *et al.* (1999), Blair (2000) e Mendonza *et al.* (2000).

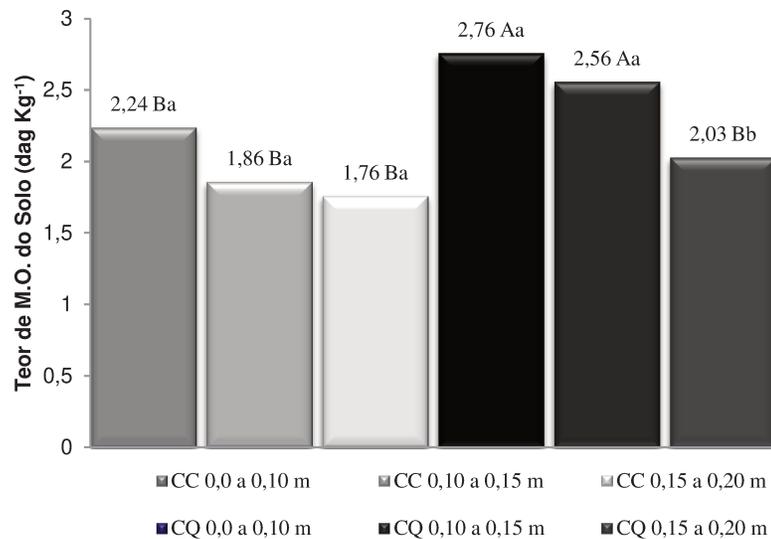


Figura 7. Teor de matéria orgânica para os sistemas de cana queimada (CQ) e cana crua (CC) em diferentes profundidades. *Médias seguidas da mesma letra não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

No tratamento com cana crua, a adição de matéria orgânica na forma de palha (folhas e pontas) foi em média de 15 t ha^{-1} (Figura 7). Segundo Shinitzer (1991), esse material em decomposição origina uma série de compostos orgânicos como açúcares, aminoácidos, ceras, fenóis, ligninas e ácidos. Souza *et al.* (2006c) afirmam que o teor de matéria orgânica aumenta em profundidade com o sistema de colheita mecanizada a partir do terceiro ciclo de cultivo com este sistema de manejo.

Observam-se valores superiores de densidade do solo para a cana crua em comparação ao sistema de cana queimada, com diferença significativa nas profundidades de 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m (Tabela 3). Os sistemas de manejo com cana-de-açúcar aumentaram a densidade do solo até a profundidade de 0,30 m. Hakansson e Voorhees (1997) também verificaram que sistemas com pouco revolvimento do solo e tráfego de máquinas pesadas compactam o solo até 0,40 m.

Tabela 3. Valores de atributos físicos e mecânicos do solo para os sistemas de cana queimada (CQ) e cana crua (CC) em diferentes profundidades.

Sistema de Colheita	Profundidade (m)					
	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30
	Limite de Liquidez (kg kg^{-1})			Limite de Plasticidade (kg kg^{-1})		
CQ	0,44 Aa	0,43 Aa	0,43 Aa	0,36 Aa	0,37 Aa	0,31 Aa
CC	0,40 Aa	0,40 Aa	0,41 Aa	0,34 Aa	0,33 Aa	0,33 Aa
	Densidade do Solo (Mg m^{-3})			Densidade Máxima (Mg m^{-3})		
CQ	1,38 Ba	1,36 Ba	1,41 Aa	1,62 Aa	1,63 Aa	1,65 Aa
CC	1,48 Aa	1,42 Aa	1,44 Aa	1,56 Ba	1,57 Ba	1,61 Aa
	Umidade Ótima (kg kg^{-1})			Grau de Compactação (%)		
CQ	0,24 Ba	0,25 Ba	0,24 Aa	85 Aa	84 Aa	85 Aa
CC	0,28 Aa	0,29 Aa	0,26 Aa	94 Aa	90 Aa	89 Aa

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

O aumento da densidade do solo até a profundidade de 0,30 m no sistema de cana crua deve-se ao tráfego de máquinas pesadas durante o plantio e colheita (Tabela 3). Corroborando os resultados de Flowers e Lal (1998), quando afirmam que a principal causa da compactação em solos agrícolas é o tráfego de máquinas em operações de preparo do solo, semeadura, tratos culturais e colheita. Silva *et al.* (2000) constataram que o efeito da diminuição da compactação pode ser anulado por uma única passagem do pneu da colhedora. Os maiores valores de densidade do solo na profundidade de 0,00-0,10 m, na cana crua, são coerentes com o maior tráfego de máquinas na colheita, corroborando com os dados de Hartemink (1998).

Os maiores valores de densidade do solo nos primeiros ciclos de implantação do sistema de cana crua se devem ao não revolvimento do solo e com o passar dos anos o efeito nocivo dessa compactação desaparece, à medida que o sistema se estabelece adequadamente (Tabela 3). Souza *et al.* (2006c) avaliando os atributos físicos do solo em diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar, verificaram comportamento semelhante a este estudo. A análise de variância não mostrou efeitos significativos para o limite de liquidez e plasticidade no

sistema de cana queimada e cana colhida mecanicamente (cana crua) para todas as profundidades estudadas.

Observam-se os maiores valores de umidade ótima e menores de densidade máxima para o sistema de cana crua quando comparada com a área de cana queimada nas profundidades de 0,00-0,10 m e 0,10-0,20 m (Tabela 3). Condizentes com o teor de matéria orgânica nestas profundidades, ou seja, o efeito da matéria orgânica sobre a densidade máxima obtida pelo teste Proctor normal, mostrou a mesma tendência, ou seja, reduziu a densidade máxima, corroborando os resultados obtidos por Silva *et al.* (1986). Considerando os limites estabelecidos para o grau de compactação por Linstrom e Voorhess (1994), que considerou elevados valores acima de 86%, com efeitos prejudiciais ao desenvolvimento e rendimento das culturas, observa-se que para os sistemas de cana queimada e cana crua o limite crítico foi atingido.

Os valores de densidade observados, mesmo com a menor energia de compactação empregada, são superiores aos normalmente observados no campo, demonstrando que a energia empregada no ensaio de Proctor é superior àquela produzida pelas máquinas e animais que normalmente transitam sobre o solo (Tabelas 4, 5, 6 e 7).

Tabela 4. Valores de densidade do solo, energia equivalente e energia dissipada em função da energia de compactação de 3,61 kgf cm cm⁻³ da quantidade de palha existente sobre o solo no ensaio de Proctor para o sistema de cana crua (CC) em diferentes profundidades.

Palha (t ha ⁻¹)	Profundidade (m)					
	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30
	Densidade do solo (Mg m ⁻³)			Umidade Crítica (kg kg ⁻¹)		
0	1,65 Aa	1,57 Aa	1,59 Aa	0,22 Ba	0,22 Ba	0,23 Ba
3	1,48 Ba	1,47 Ba	1,46 Ba	0,27 Aa	0,27 Aa	0,26 Aa
6	1,46 Ba	1,44 Ba	1,46 Ba	0,28 Aa	0,28 Aa	0,27 Aa
12	1,45 Ba	1,44 Ba	1,45 Ba	0,28 Aa	0,28 Aa	0,27 Aa
20	1,42 Ba	1,43 Ba	1,44 Ba	0,29 Aa	0,29 Aa	0,28 Aa
	Energia equivalente (kgf cm cm ⁻³)			Energia dissipada (Mg m ⁻³)		
0	3,61 – 100	3,61 – 100	3,61 – 100	0,00 Ba	0,00 Ba	0,00 Ba
3	3,24 – 89	3,38 – 93	3,31 – 91	10,30 Aa	7,50 Ab	8,18 Ab
6	3,19 – 88	3,31 – 91	3,31 – 91	11,52 Aa	8,13 Ab	8,18 Ab
12	3,17 – 87	3,31 – 91	3,29 – 91	12,12 Aa	8,75 Ab	8,81 Ab
20	3,11 – 86	3,29 – 91	5,27 – 90	13,94 Aa	8,76 Ab	9,43 Ab

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

A energia de compactação utilizada no ensaio de Proctor normal corresponde, aproximadamente, a 15 passadas de um trator de 0,720 Mg na roda, cerca de 140 kPa, em solo

franco-arenoso. Além disso, deve-se considerar que o ensaio de Proctor é realizado com solo desestruturado, o que, teoricamente aumenta sua susceptibilidade à compactação. Apesar disso, esse ensaio tem demonstrado ser um bom método para determinação da umidade crítica para a compactação (FIGUEIREDO *et al.*, 2000; BRAIDA *et al.*, 2006).

Com os dados de densidade do solo obtidos nos ensaios, calculou-se a energia equivalente em cada nível de energia com e sem palha e fez-se uma estimativa da percentagem de energia dissipada pela palha na superfície do solo (Tabelas 4, 5, 6 e 7). Observa-se que quando aplicados 15 golpes, ou seja, a energia equivalente de 3,61 kgf cm cm⁻³ para área de cana crua, a palha de cana absorveu 10,30%, 11,52%, 12,12% e 13,94% da energia aplicada na profundidade de 0,00-0,10 m, para os tratamentos de 3, 6, 12 e 20 t ha⁻¹, respectivamente, diferindo das demais profundidades estudadas. Com o aumento da energia aplicada utilizando-se 25 golpes (energia equivalente 6,02 kgf cm cm⁻³), a palha de cana absorveu o equivalente a 10,78%, 11,98%, 12,57% e 13,17% da energia que foi aplicada sobre o solo na profundidade de 0,00-0,10 m, para os tratamentos de 3, 6, 12 e 20 t ha⁻¹, diferindo das profundidades de 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m, provavelmente devido a maior quantidade de matéria orgânica na camada superficial do solo (Tabelas 4 e 5). Concordando com os resultados obtidos por Braida *et al.* (2006), avaliando o efeito de resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio de Proctor.

Tabela 5. Valores de densidade do solo, energia equivalente e energia dissipada em função da energia de compactação de 6,02 kgf cm cm⁻³ da quantidade de palha existente sobre o solo no ensaio de Proctor para o sistema de cana crua (CC) em diferentes profundidades.

Palha (t ha ⁻¹)	Profundidade (m)					
	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30
	-----Densidade do solo (Mg m ⁻³)----			-----Umidade Crítica (kg kg ⁻¹)-----		
0	1,65 Aa	1,62 Aa	1,63 Aa	0,22 Ba	0,23 Ba	0,21 Ba
3	1,52 Aa	1,54 Aa	1,53 Aa	0,27 Aa	0,26 Aa	0,25 Aa
6	1,46 Ba	1,47 Ba	1,49 Ba	0,28 Aa	0,26 Aa	0,26 Aa
12	1,46 Ba	1,46 Ba	1,48 Ba	0,28 Aa	0,27 Aa	0,26 Aa
20	1,45 Ba	1,46 Ba	1,45 Ba	0,32 Aa	0,31 Aa	0,31 Ba
	-energia equivalente (kgf cm cm ⁻³)			-----energia dissipada (Mg m ⁻³)-----		
0	6,02 – 100	6,02 – 100	6,02 – 100	0,00 Ba	0,00 Ba	0,00 Ba
3	5,37 – 89	5,57 – 92	5,50 – 91	10,78 Aa	6,37 Ab	8,59 Ab
6	5,30 – 88	5,53 – 92	5,50 – 91	11,98 Aa	8,28 Ab	8,60 Ab
12	5,26 – 87	5,49 – 91	5,47 – 90	12,57 Aa	8,28 Ab	9,20 Ab
20	5,23 – 85	5,45 – 89	5,36 – 89	13,17 Aa	8,92 Ab	11,04 Ab

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

A densidade do solo e umidade crítica obtida foi dependente da quantidade de palha existente sobre o solo (Tabelas 4, 5, 6 e 7). Quanto maior a quantidade de palha adicionada sobre o solo, durante a realização do ensaio de Proctor, menores os valores de densidade e maiores para umidade, diferindo do tratamento com 0,0 t ha⁻¹, nas áreas com cana queimada e cana crua. Resultados semelhantes foram observados por Braida *et al.* (2006), estudando o efeito de resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio de Proctor. Esses resultados confirmam as observações feitas por Dao (1996), cujos resultados mostraram que a densidade do solo foi menor quando sobre o mesmo havia resíduos vegetais.

A presença de palha sobre o solo, durante a realização do ensaio de Proctor resultou em dissipação de parte da energia de compactação utilizada, com redução da densidade máxima obtida, confirmando a hipótese de que a palha existente sobre o solo é capaz de absorver parte da energia de compactação produzida pelo trânsito de máquinas e animais. Segundo Braida *et al.* (2006) a eficácia dessa capacidade, no entanto, depende da quantidade de palha, da energia aplicada e das condições do solo.

Tabela 6. Valores de densidade do solo, energia equivalente e energia dissipada em função da energia de compactação de 3,61 kgf cm cm⁻³ da quantidade de palha existente sobre o solo no ensaio de Proctor para o sistema de cana queimada (CQ) em diferentes profundidades.

Palha (t ha ⁻¹)	Profundidade (m)					
	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30
	-----Densidade do solo (Mg m ⁻³)----			-----Umidade Crítica (kg kg ⁻¹)-----		
0	1,67 Aa	1,64 Aa	1,66 Aa	0,20 Ba	0,22 Ba	0,21 Ba
3	1,62 Ba	1,60 Ba	1,63 Ba	0,26 Aa	0,26 Aa	0,26 Aa
6	1,60 Ba	1,62 Ba	1,64 Ba	0,25 Aa	0,25 Aa	0,26 Aa
12	1,61 Ba	1,62 Ba	1,61 Ba	0,27 Aa	0,27 Aa	0,28 Aa
20	1,53 Ca	1,57 Ca	1,56 Ca	0,28 Aa	0,27 Aa	0,17 Aa
	-energia equivalente (kgf cm cm ⁻³)			-----energia dissipada (kg dm ⁻³)-----		
0	3,61 – 100	3,61 – 100	3,61 – 100	0,00 Ca	0,00 Ca	0,00 Ca
3	3,50 – 97	3,52 – 96	3,54 – 98	2,99 Ba	2,44 Ba	2,18 Ba
6	3,46 – 96	3,57 – 99	3,57 – 99	4,19 Ba	1,22 Ba	1,20 Ba
12	3,48 – 96	3,57 – 99	3,50 – 97	3,59 Ba	1,22 Bb	3,01 Ba
20	3,31 – 92	3,46 – 96	3,39 – 94	8,38 Aa	4,27 Ab	6,02 Aa

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

Observa-se que a energia dissipada na área com cana crua foi maior que na área com a cana queimada (Tabelas 4, 5, 6 e 7). Indicando que o sistema de colheita mecanizada promove ao longo do ciclo da cultura de cana-de-açúcar o acúmulo de matéria orgânica, reduzindo a densidade máxima e aumentando a umidade crítica para compactação do solo,

significando que o mesmo torna-se mais resistente à compactação. A magnitude desses efeitos, contudo, é dependente do tempo de implantação do sistema de manejo com manutenção da palha na superfície do solo.

Os resultados obtidos apontam para a confirmação da hipótese geral em estudo, confirmando que a condução do sistema de cana colhida mecanicamente (cana crua), com vistas a permitir a manutenção de resíduos vegetais na superfície do solo e o enriquecimento das camadas superficiais com matéria orgânica, pode ser usada como estratégia para reduzir os efeitos deletérios, ao solo, do tráfego de máquinas. Os estudos de compactação confirmaram que os resíduos vegetais na superfície do solo possuem capacidade de dissipar parte da energia compactante no ensaio de Proctor.

Tabela 7. Valores de densidade do solo, energia equivalente e energia dissipada em função da energia de compactação de $6,02 \text{ kgf cm cm}^{-3}$ da quantidade de palha existente sobre o solo no ensaio de Proctor para o sistema de cana queimada (CQ) em diferentes profundidades.

Palha (t ha ⁻¹)	Profundidade (m)					
	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30	0,00-0,10	0,10-0,20	0,20-0,30
	Densidade do solo (Mg m ⁻³)			Umidade Crítica (kg kg ⁻¹)		
0	1,70 Aa	1,67 Aa	1,65 Aa	0,24 Aa	0,25 Aa	0,23 Aa
3	1,62 Ba	1,62 Ba	1,63 Ba	0,24 Aa	0,26 Aa	0,25 Aa
6	1,57 Ba	1,60 Ba	1,62 Ba	0,26 Aa	0,26 Aa	0,26 Aa
12	1,58 Ba	1,61 Ba	1,61 Ba	0,25 Aa	0,25 Aa	0,27 Aa
20	1,56 Ba	1,55 Ca	1,56 Ca	0,26 Aa	0,27 Aa	0,26 Aa
	energia equivalente (kgf cm cm ⁻³)			energia dissipada (Mg m ⁻³)		
0	6,02 – 100	6,02 – 100	6,02 – 100	0,00 Ca	0,00 Da	0,00 Ca
3	5,74 – 95	5,84 – 97	5,95 – 99	4,71 Ba	2,99 Cb	1,21 Bb
6	5,56 – 92	5,77 – 96	5,91 – 98	7,65 Aa	4,19 Ab	1,82 Bc
12	5,60 – 93	8,80 – 96	5,87 – 96	7,06 Aa	3,59 Bb	2,42 Bb
20	5,52 – 92	5,59 – 93	5,69 – 95	8,24 Aa	7,19 Aa	5,45 Ab

Médias seguidas pela mesma letra não diferem entre si ao nível de 5% de probabilidade pelo teste de Tukey.

4.2. Área 1 – 16 anos de colheita mecanizada

4.2.1. Estabilidade de agregados

A análise descritiva dos dados indicou ajuste à distribuição normal (Tabela 8). Os valores da média e mediana para a estabilidade de agregados em água avaliada pelos índices do diâmetro médio ponderado (DMP) e do diâmetro médio geométrico (DMG), nas três profundidades, estão próximas, bem como, os coeficientes de assimetria e curtose encontram-se próximo de zero, denotando uma distribuição simétrica dos dados. De acordo com Isaaks e Srivastava (1989), o coeficiente de assimetria é mais sensível a valores extremos do que a média e o desvio padrão, uma vez que um único valor pode influenciar fortemente o coeficiente de assimetria, pois os desvios entre cada valor e a média são levados a terceira potência.

Tabela 8. Estatística descritiva do diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG) de um Latossolo Vermelho distroférico sob 16 anos de colheita mecanizada para a cultura da cana-de-açúcar, nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.

Parâmetro	DMP (mm)			DMG (mm)		
	0,00-0,10m	0,10-0,20m	0,20-0,30m	0,00-0,10m	0,10-0,20m	0,20-0,30m
Média	2,64	2,14	1,71	1,30	1,28	1,16
Mediana	2,63	2,14	1,61	1,29	1,27	1,13
Mínimo	0,79	0,63	0,68	1,0	1,0	1,0
Máximo	3,70	3,15	3,45	1,65	1,63	1,80
DP	0,54	0,53	0,59	0,15	0,145	0,136
CV (%)	20,34	24,55	34,82	11,52	11,40	11,72
C _s	-0,057	-0,238	0,885	0,234	0,227	1,531
C _k	0,937	-0,189	0,425	-0,483	-0,594	3,81
p	0,059 ^{ns}	0,054 ^{ns}	0,103 [*]	0,062 ^{ns}	0,063 ^{ns}	0,1231 [*]

DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação; C_s = assimetria; C_k = curtose; p = estatística do teste Kolmogorov-Smirnov; ns = não significativo ao nível de 5% pelo teste Kolmogorov-Smirnov; * = significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste Kolmogorov-Smirnov.

Os resultados referentes ao teste Kolmogorov-Smirnov indicaram normalidade para DMP e DMG em todas as profundidades estudadas excetuando-se a de 0,20-0,30 m (Tabela 8). Isso pode ser um indicativo de que as medidas de tendência central não são dominadas por valores atípicos na distribuição (CAMBARDELLA *et al.*, 1994), demonstrando que os dados estão adequados para o uso da geoestatística.

Adotando-se a classificação para o coeficiente de variação (CV) proposta por Warrick e Nielsen (1980), o DMG apresentou valores baixos (< 12%) em todas as profundidades estudadas, enquanto que o DMP apresentou valor médio (entre 12 e 24%) na profundidade 0,00-0,10 m e valores altos (> 24%) para as profundidades de 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m (Tabela

7). Estudando um Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar, Souza *et al.* (2009), também encontraram valores médios de CV para DMP na profundidade de 0,10 m.

Segundo Gonçalves *et al.* (2001), para a estimativa por krigagem, a normalidade dos dados é interessante na avaliação da dependência espacial, porém, mais importante que isso é sua utilização para verificar a não-tendência dos dados, conforme mostra o presente estudo. Desta forma, a análise geoestatística constatou que os atributos estudados apresentaram dependência espacial, o que foi comprovado pelos parâmetros dos semivariogramas ajustados aos modelos esférico e exponencial (Tabela 9).

Quanto à variabilidade espacial, foi observada dependência espacial para DMP e DMG em todas as profundidades estudadas (Tabela 9). Resultado semelhante foi observado por Camargo *et al.* (2008); Souza *et al.* (2009) e Vieira *et al.* (2011). Para o DMP o modelo que melhor se ajustou aos semivariogramas experimentais foi o esférico. Corroborando com observado por Souza *et al.* (2009) estudando DMP em um Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar. Os atributos físicos DMP e DMG apresentaram valores de alcance próximos nas profundidades estudadas, o alcance indica o limite da dependência espacial da variável, ou seja, determinações realizadas a distâncias maiores que o alcance tem distribuição espacial aleatória e, por isso, são independentes entre si.

Tabela 9. Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais para o diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG) de um Latossolo Vermelho distroférrico sob 16 anos de colheita mecanizada para a cultura da cana-de-açúcar, nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.

Parâmetro	DMP (mm)			DMG (mm)		
	0,00-0,10 m	0,10-0,20 m	0,20-0,30 m	0,0-0,10 m	0,10-0,20 m	0,20-0,30 m
Modelo	Esférico	Esférico	Esférico	Exponenc	Exponenc	Exponencial
C ₀	0,0556	0,037	0,1858	0,00506	0,0059	0,0054
C ₀ +C ₁	0,2362	0,209	0,3736	0,01742	0,0213	0,0186
a (m)	17,0	22,8	33,0	29,04	27,70	29,03
GDE (%)	23,54	17,70	49,73	28,2	46,20	43,50
R ² (%)	93,1	86,7	96,4	95,1	99,0	96,8
SQR	1,12E ⁻⁴	8,35E ⁻⁴	9,19E ⁻⁴	9,806E ⁻⁷	8,277E ⁻⁷	1,684E ⁻⁶

C₀ = efeito pepita; C₀+C₁ = patamar; a = alcance; GDE = grau de dependência espacial; R² = coeficiente de determinação do modelo; SQR = soma de quadrados do resíduo.

A razão do efeito pepita sobre o patamar em percentagem do atributo DMP indica grau de dependência espacial forte para as profundidades de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m e moderado para a profundidade de 0,20-0,30 m (Tabela 9). Portanto, a distribuição espacial do DMP nas três profundidades do solo estudadas, não é puramente aleatória, sendo que os

semivariogramas explicam a maior parte da variância dos dados experimentais, corroborando com relatado por Vieira *et al.* (2011) estudando a variabilidade espacial da estabilidade de agregados em Latossolos do estado de São Paulo sob sistemas de plantio direto.

Quanto ao DMG, o modelo que melhor se ajustou aos semivariogramas experimentais foi o exponencial (Tabela 9). Resultado semelhante ao observado por Camargo *et al.* (2008) estudando DMG em um Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar. A razão do efeito pepita sobre o patamar em percentagem do atributo DMG indica grau de dependência espacial moderado para todas as profundidades estudadas. Portanto, a distribuição espacial do DMG no solo estudado, não é puramente aleatória, sendo que os semivariogramas explicam a maior parte da variância dos dados experimentais. Concordando com os resultados obtidos por Salton *et al.* (2008) estudando o efeito de sistemas de manejo sobre a agregação de um Latossolo Vermelho distroférico típico no estado do Mato Grosso do Sul.

Observa-se uma menor variação espacial dos atributos DMP e DMG na profundidade de 0,20-0,30 m, concordando com o maior alcance da dependência espacial (Figura 8). Maiores valores de DMP foram encontrados na superfície do solo. Salton *et al.* (2008) associaram maiores valores do DMP na superfície do solo ao maior teor de matéria orgânica, o qual contribui para a agregação das partículas do solo. Além disso, a colheita mecanizada da cana promove uma cobertura de resíduo vegetal que contribui para absorver a pressão exercida pelo maquinário sobre o solo e preservar sua estrutura (SOUZA *et al.*, 2005).

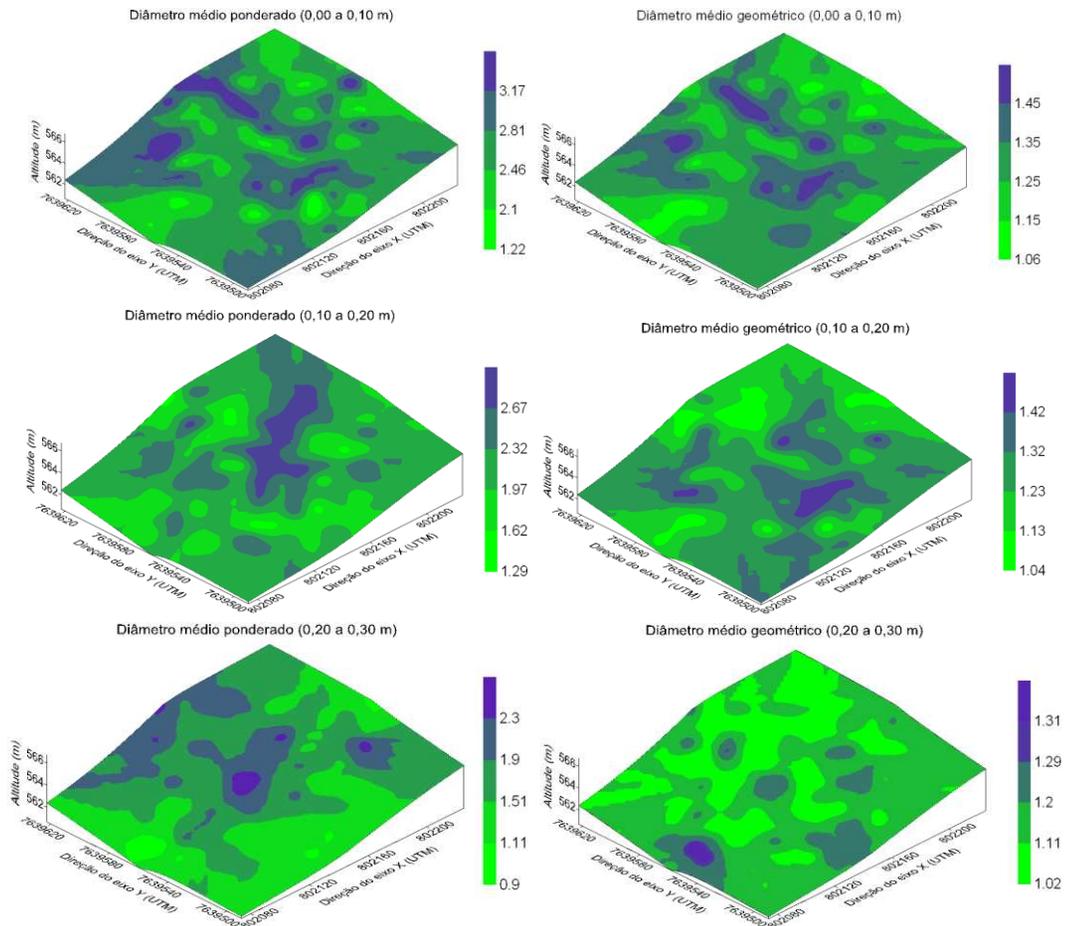


Figura 8. Distribuição espacial do diâmetro médio ponderado (DMP, mm) e do diâmetro médio geométrico (DMG, mm) de um Latossolo Vermelho distroférico sob 16 anos de colheita mecanizada para a cultura da cana-de-açúcar, nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.

Além do teor de matéria orgânica e o aumento de resíduos na superfície do solo em áreas de cana-de-açúcar, o sistema radicular dessa cultura também contribui para uma melhor estruturação do solo (Tabela 9 e Figura 8). Carvalho *et al.* (2011) estudando a variabilidade espacial da estabilidade de agregados em Latossolo Vermelho sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar concluíram que a palhada deixada sobre a superfície do solo, auxilia na elevação e manutenção dos teores de matéria orgânica do solo contribuindo para a formação e estabilização dos agregados. O sistema radicular da cana-de-açúcar também contribui para a agregação do solo, mediante a ação mecânica das raízes e excreção de substâncias com ação cimentante (VEZZANI; MIELNICZUK, 2011).

4.2.2. Teor de matéria orgânica

Os resultados referentes à análise descritiva para o teor de matéria orgânica do solo (MO) indicaram ajuste à distribuição não normal, com valores de assimetria e curtose distanciando-se de zero (Tabela 10). Os resultados referentes ao teste Kolmogorov-Smirnov indicaram a não normalidade dos dados de MO em todas as profundidades estudadas. Mais importante que a normalidade é que os semivariogramas apresentem patamares bem definidos e, que a distribuição não apresenta caudas muito alongadas o que poderia comprometer as estimativas da krigagem, as quais são baseadas nos valores médios (ISAACS; SRIVASTAVA, 1989). Adotando-se a classificação para o coeficiente de variação (CV) proposta por Warrick e Nielsen (1980), a MO apresentou valores médios (entre 12 e 24%) nas três profundidades estudadas. Resultados semelhantes aos apresentados por Souza *et al.* (2009) estudando um Latossolo Vermelho distrófico e Latossolo Vermelho eutroférico, sob cultivo de cana-de-açúcar nas camadas de 0,20 e 0,40 m.

Tabela 10. Estatística descritiva do teor de matéria orgânica do solo (MO) de um Latossolo Vermelho distrófico sob 16 anos de colheita mecanizada da cultura da cana-de-açúcar, nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.

Parâmetro	Matéria Orgânica (dag kg ⁻¹)		
	0,00-0,10m	0,10-0,20m	0,20-0,30m
Média	3,23	2,69	2,19
Mediana	3,1	2,60	2,10
Mínimo	2,3	1,9	1,5
Máximo	6,4	5,9	4,3
DP	0,66	0,563	0,436
CV (%)	20,57	20,92	19,92
Cs	1,88	2,34	1,525
Ck	6,44	9,77	4,286
p	0,146*	0,173*	0,162*

DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação; Cs = assimetria; Ck = curtose; p = estatística do teste Kolmogorov-Smirnov. * = significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste Kolmogorov-Smirnov.

O teor de matéria orgânica do solo (MO) apresentou valor médio de 3,23 dag kg⁻¹ na profundidade de 0,00-0,10 m decrescendo em profundidade, sendo que em média as profundidades de 0,10-0,20 e 0,20-0,30 m apresentaram valores de 2,69 e 2,19 dag kg⁻¹, respectivamente (Tabela 9). Estes resultados devem-se provavelmente ao fato da palhada gerada sob colheita mecanizada da cultura da cana-de-açúcar ter sido aportada na superfície do solo sem que houvesse incorporação, proporcionando maiores incrementos nas camadas superficiais do solo. Resultados semelhantes foram relatados por Galdos *et al.* (2010),

estudando a dinâmica da matéria orgânica do solo num Latossolo Vermelho sob colheita mecanizada da cultura da cana-de-açúcar.

Observou-se dependência espacial para o teor de matéria orgânica em todas as profundidades estudadas, sendo que o modelo que melhor se ajustou aos semivariogramas experimentais foi o esférico (Tabela 11). Concordando com os resultados obtidos por Cavalcante *et al.* (2007), avaliando a variabilidade espacial de MO, P, K e CTC do solo sob diferentes usos e manejos em um Latossolo Vermelho distrófico. A razão do efeito pepita sobre o patamar em percentagem em todas as profundidades estudadas foi menor que 25% indicando grau de dependência espacial forte. Portanto, a distribuição espacial do teor de matéria orgânica nas três profundidades estudadas, não é puramente aleatória, sendo que os semivariogramas explicam a maior parte da variância dos dados experimentais.

Tabela 11. Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais do teor de matéria orgânica de um Latossolo Vermelho distroférico sob 16 anos de colheita mecanizada para a cultura da cana-de-açúcar, nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.

Parâmetro	Teor de matéria orgânica (dag kg ⁻¹)		
	0,00-0,10 m	0,10-0,20 m	0,20-0,30 m
Modelo	Esférico	Esférico	Esférico
C ₀	0,0876	0,0577	0,0337
C ₀ +C ₁	0,3892	0,3114	0,2014
a (m)	26,40	19,70	20,30
GDE (%)	22,51	18,53	16,73
R ² (%)	97,0	97,6	97,0
SQR	8,155E ⁻⁴	3,053E ⁻⁴	1,849E ⁻⁴

C₀ = efeito pepita; C₀+C₁: = patamar; a = alcance; GDE = grau de dependência espacial; R² = coeficiente de determinação do modelo; SQR = soma de quadrados do resíduo.

Verificou-se uma variabilidade espacial da matéria orgânica uniforme com menor variação na profundidade de 0,00-0,10 m, concordando com o maior alcance da dependência espacial (Figura 9). Estudando a dinâmica da matéria orgânica do solo em áreas sob colheita mecanizada para a cultura da cana-de-açúcar, Galdos *et al.* (2010), encontraram resultados semelhantes aos apresentados nesse trabalho com maiores valores de matéria orgânica encontrados na camada mais superficial do solo. Souza *et al.* (2005), avaliando diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar, observaram que o manejo mecanizado promove um maior aporte de resíduos orgânicos na camada superficial do solo promovendo um aumento do

teor de matéria orgânica ao longo do tempo em comparação ao sistema de manejo com cana queimada.

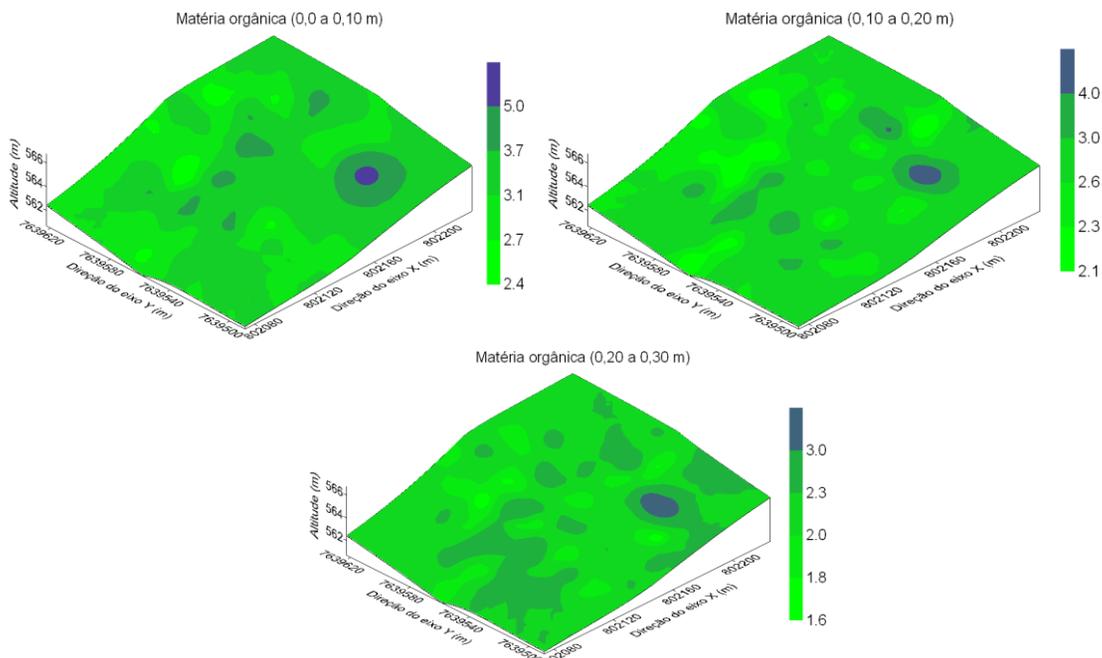


Figura 9. Distribuição espacial do teor de matéria orgânica (dag kg^{-1}) de um Latossolo Vermelho distroférrico sob 16 anos de colheita mecanizada para a cultura da cana-de-açúcar, nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.

4.2.3. Granulometria, densidade e porosidade do solo

Os valores da média e mediana, para todas as variáveis, estão próximos, mostrando distribuições simétricas, o que pode ser confirmado pelos valores de assimetria próximos de zero. Os resultados do teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov indicaram normalidade para todas variáveis na profundidade de 0,00-0,10 m. SOUZA *et al.* (2004b) avaliando a variabilidade espacial de atributos físicos do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar, encontraram normalidade para a densidade do solo e porosidade do solo.

Adotando-se a classificação para o coeficiente de variação (CV) proposta por Warrick e Nielsen (1980), a porosidade total, microporosidade, densidade do solo e teor de argila apresentaram valores baixos ($< 12\%$) em todas as profundidades estudadas, areia e silte apresentaram valores médios (entre 12 e 24%) e a macroporosidade apresentou valores altos ($> 24\%$) para todas as profundidades estudadas, respectivamente (Tabela 12). Concordando com relato por Gonçalves *et al.* (2001) para a densidade do solo em um Argissolo Vermelho e

Souza *et al.* (2004d) para os atributos granulométricos em um Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar.

Tabela 12. Estatística descritiva para a granulometria e porosidade do solo de um Latossolo Vermelho distroférrico sob 16 anos de colheita mecanizada para a cultura da cana-de-açúcar, nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.

Parâmetro	Porosidade (m ³ m ⁻³)			Densidade do Solo (Mg m ⁻³)	Textura (g kg ⁻¹)		
	Total	Macro	Micro		Areia	Argila	Silte
0,00-0,10 m							
Média	0,570	0,098	0,472	1,2	193	594	213
Mediana	0,565	0,088	0,470	1,2	192	593	209
Mínimo	0,462	0,001	0,370	1,0	137	493	159
Máximo	0,683	0,276	0,632	1,5	308	693	288
DP	0,037	0,067	0,055	0,114	33,81	45,71	28,98
CV (%)	6,62	68,37	11,67	9,35	17,53	7,69	13,58
Cs	0,38	0,53	0,27	0,42	0,69	-0,07	0,49
Ck	0,23	-0,46	-0,43	-0,01	0,48	-0,69	-0,26
p	0,074 ^{ns}	0,073 ^{ns}	0,058 ^{ns}	0,21 ^{ns}	0,077 ^{ns}	0,064 ^{ns}	0,063 ^{ns}
0,10-0,20 m							
Média	0,549	0,079	0,470	1,3	186	620	194
Mediana	0,549	0,075	0,461	1,3	181	626	190
Mínimo	0,489	0,007	0,379	1,0	132	373	145
Máximo	0,617	0,193	0,606	1,5	378	706	280
DP	0,029	0,043	0,042	0,114	41,197	51,26	28,87
CV (%)	5,38	54,77	8,96	9,02	22,12	8,27	14,86
Cs	0,084	0,332	0,543	-0,034	2,13	-1,705	0,539
Ck	-0,6960	-0,529	0,332	-0,412	7,107	5,443	0,046
p	0,051 ^{ns}	0,068 ^{ns}	0,097*	0,181*	0,125*	0,120*	0,090*
0,20-0,30 m							
Média	0,534	0,065	0,468	1,3	170	646	184
Mediana	0,529	0,063	0,457	1,3	170	647	179
Mínimo	0,447	0,001	0,369	1,0	114	412	76
Máximo	0,657	0,163	0,628	1,6	278	732	310
DP	0,030	0,037	0,042	0,1	26,77	41,96	34,50
CV (%)	5,70	57,03	9,08	7,86	15,74	6,49	18,79
Cs	1,086	0,559	0,792	-0,189	1,06	-1,70	0,536
Ck	3,0	-0,04	1,052	0,413	2,346	7,869	1,22
p	0,10*	0,078 ^{ns}	0,11*	0,227*	0,074 ^{ns}	0,115*	0,083

DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação; C_s = assimetria; C_k = curtose; p = estatística do teste Kolmogorov-Smirnov. ^{ns} = não significativo a 5 % de probabilidade pelo teste Kolmogorov-Smirnov; * = significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste Kolmogorov-Smirnov; ** = significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Kolmogorov-Smirnov.

4.2.4. Capacidade Suporte de Carga do solo

Os coeficientes de determinação das equações, excetuando-se a profundidade de 0,00-0,10 m, foram significativos e variaram de 87,66 a 89,90%. Os parâmetros do modelo apresentaram 99% de significância para todas as profundidades estudadas, excetuando o

coeficiente angular das profundidades de 0,00-0,10 e 0,10-0,20 m os quais não foram significativos.

As equações ajustadas ao modelo de compressibilidade, obtidas para as diferentes profundidades de solo estudadas, diferenciaram-se estatisticamente quando comparadas entre si (Figura 10), utilizando-se o procedimento descrito em Snedecor e Cochran (1989). Portanto, pode-se inferir que a pressão de preconsolidação (σ_p) nas profundidades estudadas são diferentes e devem ser previstas por equações distintas. Esta diferença provavelmente está associada a distinção dos atributos físicos do solo em profundidade e ao histórico do manejo de cada profundidade, os quais, com o decorrer do tempo são continuamente alterados. Resultados semelhantes foram encontrados por Silva *et al.* (2009), avaliando a modelagem da compactação em áreas sob cultivo de cana-de-açúcar.

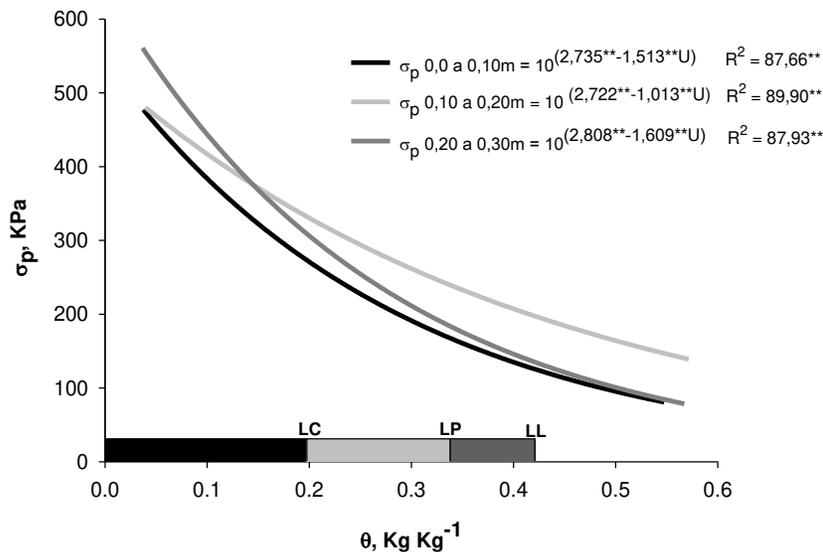


Figura 10. Modelo de capacidade suporte de carga ($\sigma_p = 10^{(a + bU)}$) e σ_p estimados e observados para os limites de consistência de um Latossolo Vermelho distroférico sob 16 anos de colheita mecanizada, para a cultura da cana-de-açúcar. Em que, LC = Limite de contração; RF = Região de friabilidade; LP = Limite de plasticidade; RP = Região de plasticidade e LL = Limite de liquidez.

A modelagem da σ_p foi feita por meio do cruzamento dos dados pontuais do teor de água no solo com os modelos preditivos para cada camada de solo (Tabela 13). Quanto à variabilidade espacial, foi observada dependência espacial para o teor de água no solo e σ_p em todas as profundidades estudadas sendo que, o modelo que melhor se ajustou aos semivariogramas experimentais foi o esférico. A razão do efeito pepita sobre o patamar em

percentagem do teor de água no solo e da σ_p em todas as profundidades estudadas foi menor que 25% indicando grau de dependência espacial forte, de acordo com o critério estabelecido por Cambardella *et al.* (1994) (Tabela 13). Portanto, a distribuição espacial do teor de água no solo e da σ_p nas três profundidades não é puramente aleatória, sendo que os semivariogramas explicam a maior parte da variância dos dados experimentais.

Tabela 13. Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais da pressão de preconsolidação (σ_p) estimadas ($\sigma_p = 10^{(a + bU)}$) e do teor de água no solo de um Latossolo Vermelho distroférrico, sob 16 anos de colheita mecanizada para a cultura da cana-de-açúcar, nas profundidades de 0,00-0,10 m; 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.

Parâmetro	σ_p (KPa)			Teor de água no solo (kg kg^{-1})		
	0,00-0,10 m	0,10-0,20 m	0,20-0,30 m	0,0-0,10 m	0,10-0,20 m	0,20-0,30 m
Modelo	Esférico	Esférico	Esférico	Esférico	Esférico	Esférico
C_0	920,0	127,0	10,0	1,150	1,37	1,38
C_0+C_1	12300,0	543	6357,0	12410,0	5,953	5,832
a (m)	18,2	17,20	17,30	17,10	17,20	15,30
GDE (%)	7,48	23,39	0,02	9,27	23,01	23,66
R^2 (%)	94,5	93,39	91,10	93,10	92,30	94,10
SQR	619015	713	299371,0	0,631	0,118	0,0985

C_0 = efeito pepita; C_0+C_1 = patamar; a = alcance; GDE = grau de dependência espacial; R^2 = coeficiente de determinação do modelo; SQR = soma de quadrados do resíduo.

Observa-se que os menores valores de σ_p foram encontrados nas regiões que apresentaram maiores valores de teor de água no solo (Figura 10), corroborando com a pesquisa de Dias Junior e Pierce (1996) os quais afirmam que a suscetibilidade do solo à compactação torna-se crítica em condições de excessivos conteúdos de água no solo, devido à baixa capacidade de suporte de carga do solo nessas condições.

Em condições semelhantes de conteúdo de água, observa-se que valores de σ_p , na profundidade de 0,20-0,30 m, foram proporcionalmente menores do que os valores de σ_p , nas demais profundidades (Figura 11). Essa menor capacidade de suporte de carga pode estar associada aos maiores valores médios de densidade do solo ($1,3 \text{ kg dm}^{-3}$), teor de argila (646 g kg^{-1}) e menores valores de porosidade total ($0,534 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e do teor de matéria orgânica ($2,19 \text{ dag kg}^{-1}$) na profundidade de 0,20-0,30 m, quando comparados aos valores encontrados nas profundidades mais superficiais do solo. Estes resultados estão de acordo com os encontrados por Silva *et al.* (2003), estudando a relação de atributos físicos do solo com a σ_p em Latossolo Vermelho distrófico.

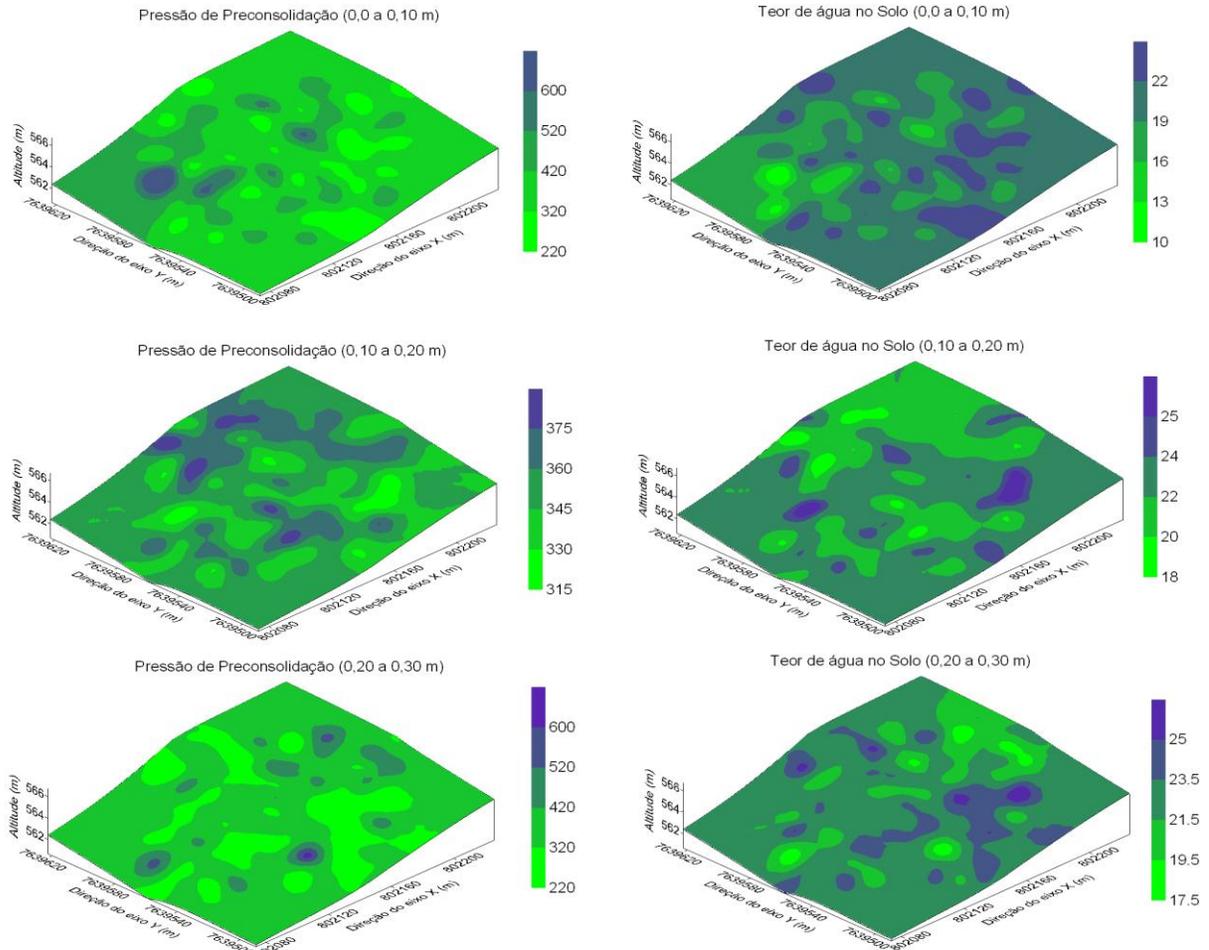


Figura 11. Distribuição espacial das pressões de preconsolidação (σ_p) estimadas ($\sigma_p = 10^{(a + bU)}$) e do teor de água no solo (kg kg^{-1}) de um Latossolo Vermelho distroférico sob 16 anos de colheita mecanizada para a cultura da cana-de-açúcar, nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.

4.2.5. Intervalo hídrico ótimo

Não foi observado efeito significativo, a 5% de probabilidade, entre as camadas de solo sobre as curvas de retenção de água no solo. Tal fato deve-se a expressão da variabilidade das curvas de retenção de água por meio da densidade do solo, assim um único modelo foi ajustado para explicar a curva de retenção de água no solo. O mesmo se repetiu para a curva de resistência do solo à penetração. O modelo ajustado para estimativa da resistência do solo à penetração explicou 77% da variabilidade dos dados (Tabela 14). Os coeficientes do modelo demonstram que a resistência variou positivamente com a densidade do solo e negativamente com o conteúdo de água, corroborando com os resultados obtidos por (Silva *et al.*, 1994; Tormena *et al.*, 1998; Freddi *et al.*, 2009; Roque *et al.*, 2011; Silva *et al.*, 2011; Lima *et al.*, 2012).

Tabela 14. Estimadores dos parâmetros da regressão linearizada, para resistência do solo a penetração (RP = MPa), em função do conteúdo volumétrico da água ($\theta = \text{m}^3 \text{m}^{-3}$) e densidade ($D_s = \text{Mg m}^{-3}$) do solo: $\ln RP = \ln a + b \ln \theta + c \ln D_s$.

	Parâmetros	Erro padrão	t	Probabilidade*
<i>a</i>	-1,00964	0,10289	-9,81	<0,0001
<i>b</i>	-1,18793	0,06684	-17,77	<0,0001
<i>c</i>	3,09928	0,27025	11,47	<0,0001

*Probabilidade de significância para os valores estimados dos parâmetros.

Por meio da estimativa dos coeficientes apresentados na tabela 14, obteve-se a equação abaixo (11). O conteúdo de água em que a resistência à penetração atingiu 2,5 MPa foi calculado pela equação (12) obtida de (11).

$$RP = 0,3435 \theta^{-1,18793} D_s^{3,09928} \quad (11)$$

$$\theta = \left[\frac{2,5}{(0,36435 D_s^{3,09928})} \right]^{\left(\frac{1}{-1,18793} \right)} \quad (12)$$

em que: RP = resistência do solo à penetração (MPa); D_s = densidade do solo (Mg m^{-3}) e θ = conteúdo de água ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$).

O modelo ajustado para estimativa do conteúdo de água do solo explicou 80% da variabilidade dos dados. Os coeficientes do modelo apresentados na tabela 15 demonstram que a retenção de água do solo aumentou positivamente com a densidade do, visto que o coeficiente *f* apresenta sinal positivo, estando em concordância com resultados obtidos por Silva *et al.* (1994) e Tormena *et al.* (1998).

Tabela 15. Estimadores dos parâmetros da regressão linearizada, para o conteúdo volumétrico de água do solo ($\theta = \text{m}^3 \text{m}^{-3}$), em função da densidade do solo (Mg m^{-3}) e do potencial mátrico ($\Psi = \text{MPa}$): $\ln \theta = \ln d + e D_s + f \ln \Psi$.

	Parâmetros	Erro padrão	t	Probabilidade*
<i>d</i>	-2,18351	0,11740	-19,72	<0,0001
<i>e</i>	-0,17785	0,00546	-32,55	<0,0001
<i>f</i>	0,37361	0,09092	4,11	<0,0001

*Probabilidade de significância para os valores estimados dos parâmetros.

As equações 13 e 14 foram utilizadas para estimar a umidade volumétrica na capacidade de campo ($\Psi = 10 \text{ kPa}$) e no ponto de murchamento permanente ($\Psi = 1.500 \text{ kPa}$), a partir da densidade do solo:

$$\theta = \exp^{(-2,1835 \pm 0,3736 \cdot D_s)} * 10^{-0,17785} \quad (2)$$

$$\theta = \exp^{(-2,1835 \pm 0,3736 \cdot D_s)} * 1500^{-0,17785} \quad (3)$$

em que: θ é a umidade volumétrica do solo ($\text{m}^3 \text{m}^{-3}$); D_s é a densidade do solo (Mg m^{-3}) e ψ é o pó potencial matricial (kPa).

Os valores dos potenciais na capacidade de campo (θ_{CC}) e do ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) nos limites críticos de potenciais de água no solo e a resistência do solo à penetração (θ_{RP}) aumentaram de acordo com a densidade do solo (Figura 12). Resultados semelhantes foram observados por Tormena *et al.* (1998) e Leão *et al.* (2004). Ressalta-se na Figura 12 que, a θ_{RP} foi superior ao θ_{PMP} em quase toda a extensão de valores de densidade, semelhante aos resultados encontrados por Benjamim *et al.* (2003).

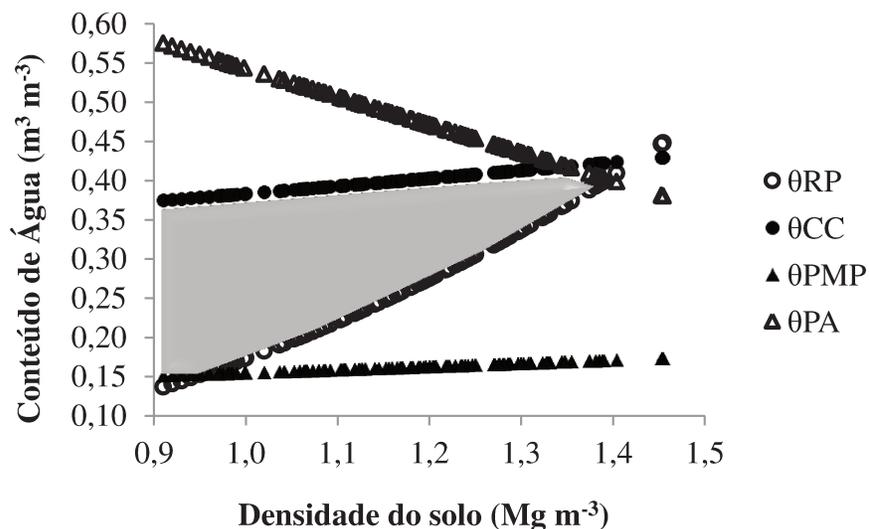


Figura 12. Variação do conteúdo volumétrico de água (θ , $\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$) com a densidade do solo (D_s), para os limites críticos de capacidade de campo (θ_{CC} ; 0,01 MPa), ponto de murcha permanente (θ_{PMP} ; 1,5 MPa), porosidade de aeração (θ_{PA} ; 10%) e resistência do solo à penetração (θ_{RP} ; 2,5 MPa) em um Latossolo Vermelho distroférrico sob 16 anos de colheita mecanizada para a cultura da cana-de-açúcar.

A resistência do solo à penetração foi o limite inferior do IHO, que teve como limites superiores a θ_{CC} e a porosidade de aeração (θ_{PA}), tal comportamento deve-se provavelmente, ao fato de que com o aumento da densidade ocorre decréscimo da θ_{PA} a 10%, indicando também uma redução dos poros de maior diâmetro (Figura 12). Esses resultados são similares aos obtidos por Silva *et al.* (1994), Tormena *et al.* (2007) e Pereira *et al.* (2010) na determinação do IHO.

A densidade do solo crítica, ou seja, a densidade em que o intervalo hídrico ótimo é nulo, foi $1,39 \text{ Mg m}^{-3}$ no entanto, analisando a Figura 13, pode-se fazer inferência de limitação de distribuição do sistema radicular da cultura da cana-de-açúcar pela resistência do solo a penetração (θ_{RP}) com um conteúdo de água entre $0,23$ a $0,27 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, visto que em média a densidade encontrada na área de estudo foi de $1,2 \text{ Mg m}^{-3}$ na profundidade de $0,00-0,10 \text{ m}$ e de $1,3 \text{ Mg m}^{-3}$ para as profundidade de $0,10-0,20 \text{ m}$ e $0,20-0,30 \text{ m}$, nestas condições a θ_{RP} encontrou-se acima do limite crítico reportado pela literatura que é de $2,0 \text{ MPa}$ (SILVA *et al.*, 1994). Pode-se observa ainda, que o aumento da densidade do solo resultou em incremento dos valores de θ_{RP} . Resultados semelhantes foram observados por Freddi *et al.* (2008). Elevando-se o limite de θ_{RP} para $4,0 \text{ MPa}$ a limitação de distribuição do sistema radicular da cultura da cana-de-açúcar pela θ_{RP} seria alcançada com um conteúdo de água entre $0,23$ a $0,27 \text{ dm}^3 \text{ dm}^{-3}$, nestas condições a amplitude do IHO passaria ser maior (Figura 13).

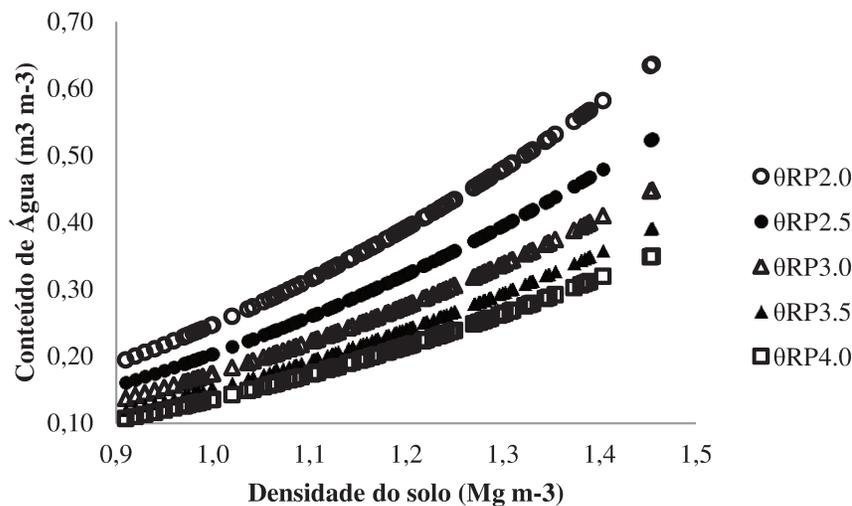


Figura 13. Variação da resistência do solo à penetração (θ_{RP}) para os limites críticos de $2,0$; $2,5$; $3,0$; $3,5$ e $4,0 \text{ MPa}$ com o conteúdo de água no solo e a densidade do solo em um Latossolo Vermelho distroférico sob 16 anos de colheita mecanizada para a cultura da cana-de-açúcar.

4.3. Área 2 – 8 anos de colheita mecanizada

4.3.1. Estabilidade de agregados

A análise descritiva dos dados indicou ajuste à distribuição normal para o diâmetro médio ponderado (DMP) e para o diâmetro médio geométrico (DMG) para a profundidade de $0,00-0,10 \text{ m}$, comprovado pelos resultados referentes ao teste Kolmogorov-Smirnov que indicaram normalidade para DMP e DMG na profundidade de $0,00-0,10 \text{ m}$ (Tabela 16). Resultados semelhantes foram observados por Camargo *et al.* (2008) estudando a correlação

espacial entre a mineralogia e estabilidade de agregados em Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar.

Tabela 16. Estatística descritiva do diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG) de um Latossolo Vermelho distroférico sob 8 anos de colheita mecanizada para a cultura da cana-de-açúcar, nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.

Parâmetro	DMP (mm)			DMG (mm)		
	0,00-0,10m	0,10-0,20m	0,20-0,30m	0,0-0,10m	0,10-0,20m	0,20-0,30m
Média	1,32	1,46	1,51	0,97	0,72	0,64
Mediana	1,31	1,46	1,54	0,96	0,66	0,59
Mínimo	1,01	1,02	1,11	0,45	0,38	0,41
Máximo	1,71	2,03	1,77	1,90	1,61	2,16
DP	0,131	0,151	0,132	0,262	0,236	0,217
CV (%)	9,942	10,341	8,782	27	32,933	33,781
C _s	0,279	-0,130	-0,629	0,826	1,598	3,513
C _k	0,243	1,555	0,266	1,329	2,858	19,572
p	0,061 ^{ns}	0,107*	0,105*	0,071 ^{ns}	0,163*	0,210*

DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação; C_s = assimetria; C_k = curtose; p = estatística do teste Kolmogorov-Smirnov. ^{ns} = não significativo a 5% de probabilidade pelo teste Kolmogorov-Smirnov; * = significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste Kolmogorov-Smirnov.

Adotando-se a classificação para o coeficiente de variação (CV) proposta por Warrick e Nielsen (1980), o DMP apresentou valores baixos (< 12%) em todas as profundidades estudadas, enquanto que o DMG apresentou valores altos (> 24%) para todas as profundidades. Concordando com os resultados obtidos por Souza *et al.* (2004c), avaliando a variabilidade espacial da estabilidade de agregados e matéria orgânica em área cultivada com cana-de-açúcar.

Tabela 17. Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais do diâmetro médio ponderado (DMP) e do diâmetro médio geométrico (DMG) de um Latossolo Vermelho distroférico sob 8 anos de colheita mecanizada para a cultura da cana-de-açúcar, nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.

Parâmetro	DMP (mm)			DMG (mm)		
	0,00-0,10 m	0,10-0,20 m	0,20-0,30 m	0,0-0,10 m	0,10-0,20 m	0,20-0,30 m
Modelo	Esférico	Esférico	Esférico	Esférico	Esférico	Esférico
C ₀	0,00001	0,00437	0,00016	0,00010	0,0011	0,0082
C ₀ +C ₁	0,01262	0,01814	0,01302	0,04760	0,0534	0,0456
a (m)	16,90	17,4	16,8	18,30	17,90	31,0
GDE (%)	0,08	24,09	0,12	0,21	2,06	17,80
R ² (%)	94,0	95,3	95,6	91,8	94,9	92,2
SQR	1,677E ⁻⁶	8,191E ⁻⁷	1,436E ⁻⁶	4,884E ⁻⁵	1,914E ⁻⁵	3,189E ⁻⁵

C₀ = efeito pepita; C₀+C₁ = patamar; a = alcance; GDE = grau de dependência espacial; R² = coeficiente de determinação do modelo; SQR = soma de quadrados do resíduo.

Para o DMP e DMG o modelo que melhor se ajustou aos semivariogramas experimentais foi o esférico (Tabela 17). A razão do efeito pepita sobre o patamar em

percentagem para ambos os atributos indica grau de dependência espacial forte para todas as profundidades estudadas, evidenciando que a distribuição espacial do DMP e DMG nas três profundidades estudadas, não é puramente aleatória, sendo que os semivariogramas explicam a maior parte da variância dos dados experimentais. Estes resultados corroboram com os observados por Camargo *et al.* (2008) e Souza *et al.* (2009) estudando a dependência espacial de atributos físicos do solo em Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar.

Observa-se que os atributos DMP e DMG apresentaram o mesmo comportamento nas diferentes profundidades estudadas (Figura 14). Os mapas de krigagem mostram que os valores para estes atributos variaram de 1,6 a 1,2 mm para o DMP e 1,6 a 0,4 mm para o DMG. Souza *et al.* (2005) estudando diferentes sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar, observaram valores superiores para o DMP e DMG ao encontrado nesta pesquisa.

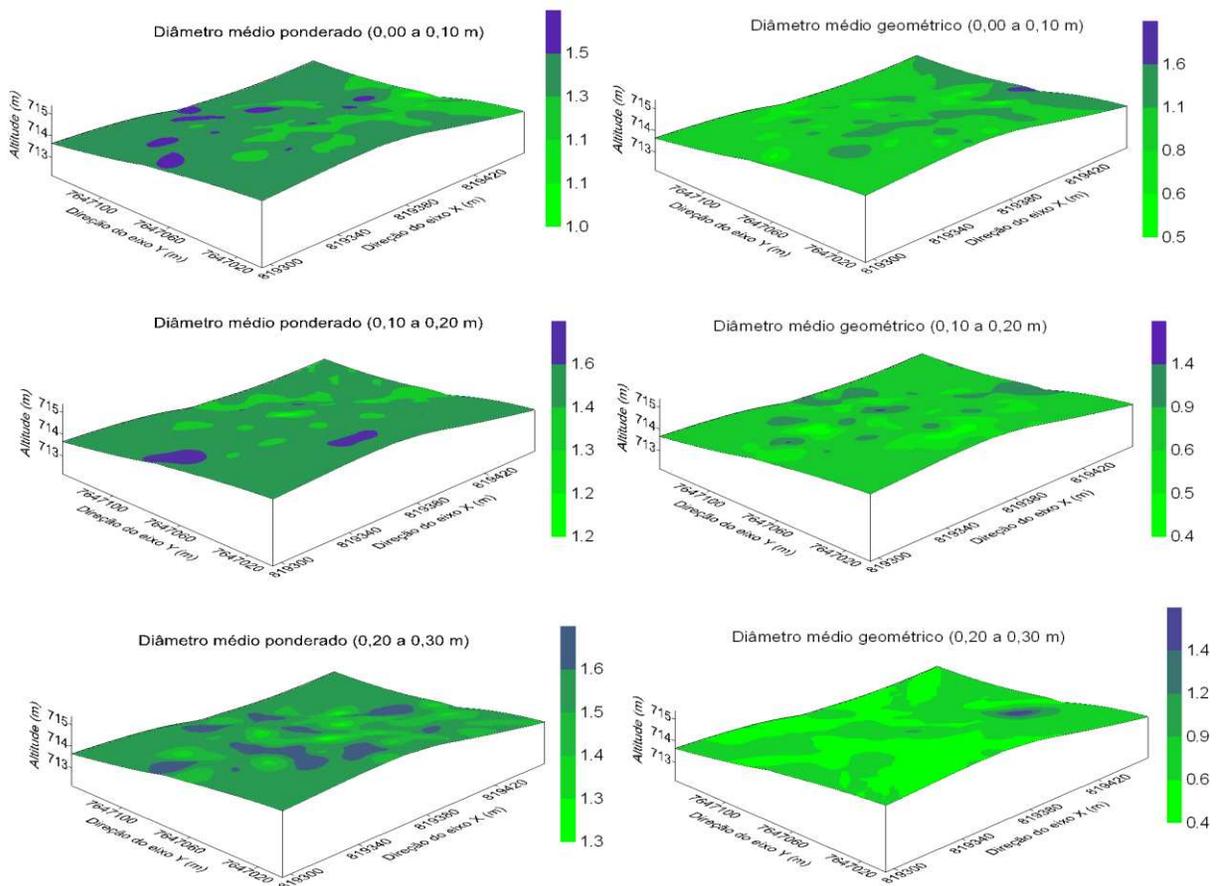


Figura 14. Distribuição espacial do diâmetro médio ponderado (DMP, mm) e do diâmetro médio geométrico (DMG, mm) de um Latossolo Vermelho distroférico sob 8 anos de colheita mecanizada para a cultura da cana-de-açúcar, nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.

4.3.2. Teor de matéria orgânica

Os resultados referentes à análise descritiva para o teor de matéria orgânica do solo (MO) apresentaram ajuste à distribuição não normal (Tabela 18). Os resultados referentes ao teste Kolmogorov-Smirnov indicaram a não normalidade dos dados de MO em todas as profundidades estudadas. No entanto, os valores da média e mediana, para todas as profundidades, estão próximos, bem como, os coeficientes de assimetria e curtose encontram-se próximo de zero, denotando a ausência de caudas muito alongadas na distribuição dos dados, favorecendo assim o uso da geoestatística. Zanão Júnior *et al.* (2007) avaliando a variabilidade espacial do pH, micronutrientes e teor de matéria orgânica, observaram normalidade para teor de matéria orgânica para um Latossolo Vermelho sob sistema plantio direto.

Adotando-se a classificação para o coeficiente de variação (CV) proposta por Warrick e Nielsen (1980), o teor de MO apresentou valores médios (entre 12 e 24%) nas três profundidades estudadas. Souza *et al.* (2004c), estudando a variabilidade espacial da estabilidade de agregados e matéria orgânica em área cultivada com cana-de-açúcar em um Latossolo Vermelho, também encontraram resultados semelhantes para o teor de matéria orgânica.

Tabela 18. Estatística descritiva do teor de matéria orgânica do solo (MO) de um Latossolo Vermelho distroférrico sob 8 anos de colheita mecanizada para a cultura da cana-de-açúcar, nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.

Parâmetro	Matéria Orgânica (dag kg ⁻¹)		
	0,00-0,10m	0,10-0,20m	0,20-0,30m
Média	2,1	2,0	1,9
Mediana	2,2	2,1	1,9
Mínimo	1,0	1,2	1,0
Máximo	3,4	2,9	3,1
DP	0,428	0,350	0,414
CV (%)	20,44	17,72	22,08
C _s	-0,241	-0,027	-0,114
C _k	0,051	-0,426	0,093
p	0,132*	0,168*	0,134*

DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação; C_s = assimetria; C_k = curtose; p = estatística do teste Kolmogorov-Smirnov; * = significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste Kolmogorov-Smirnov.

Quanto à variabilidade espacial, foi observada dependência espacial para o teor de matéria orgânica em todas as profundidades estudadas, sendo que o modelo que melhor se

ajustou aos semivariogramas experimentais foi o esférico (Tabela 19). Segundo Grego e Vieira (2005) os modelos matemáticos esférico e exponencial são o que predomina nos trabalhos de ciência do solo. McBratney e Webster (1986) estudaram modelos de ajuste do semivariograma para os atributos do solo e relataram que os modelos esféricos e exponenciais são os mais encontrados.

Tabela 19. Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais do teor de matéria orgânica de um Latossolo Vermelho distroférico sob 8 anos de colheita mecanizada para a cultura da cana-de-açúcar, nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.

Parâmetro	Teor de Matéria Orgânica (dag kg ⁻¹)		
	0,00-0,10 m	0,10-0,20 m	0,20-0,30 m
Modelo	Esférico	Esférico	Esférico
C ₀	0,0757	0,0427	0,0304
C ₀ +C ₁	0,1994	0,1354	0,1428
a (m)	61,7	61,60	26,60
GDE (%)	37,96	31,54	21,29
R ² (%)	96,3	98,40	91,50
SQR	4,493E ⁻⁴	1,085E ⁻⁴	1,849E ⁻⁴

C₀ = efeito pepita; C₀+C₁ = patamar; a = alcance; GDE = grau de dependência espacial; R² = coeficiente de determinação do modelo; SQR = soma de quadrados do resíduo.

Verifica-se pela análise visual dos mapas de contorno do teor de matéria orgânica o predomínio de manchas nítidas com distribuição espacial desse atributo variando entre 3,4 e 1,6 dag kg⁻¹; 2,9 e 1,2 dag kg⁻¹; 3,1 e 1,6 dag kg⁻¹ para as profundidades de 0,00-0,10 m; 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m, respectivamente (Figura 15). Os maiores valores de matéria orgânica foram observados na profundidade superficial do solo com redução em profundidade. Pode-se ressaltar ainda a relação entre os mapas, evidenciada pela similaridade apresentada entre os valores de C₀ e GDE (Tabela 19). Estudando atributos do solo em áreas sob colheita mecanizada para a cultura da cana-de-açúcar, Souza *et al.* (2009), encontraram resultados semelhantes aos apresentados nesse trabalho com maiores valores de matéria orgânica encontrados na camada superficial do solo. Tais afirmações corroboram com relatado por Cavalieri *et al.* (2011) ao avaliar a qualidade física de três solos sobre colheita mecanizada da cultura da cana-de-açúcar.

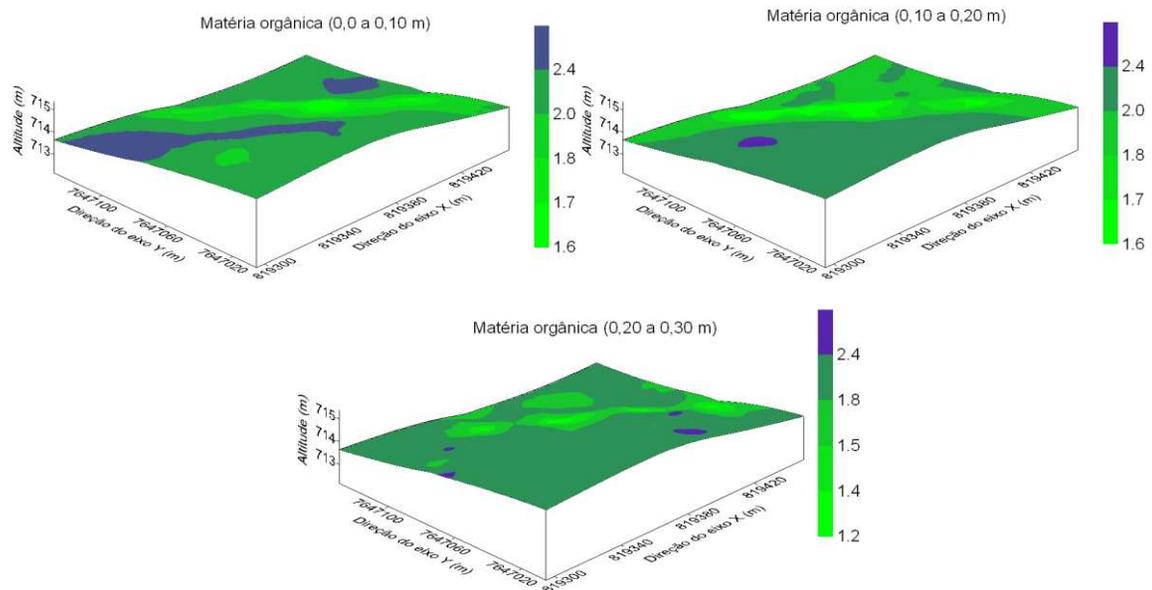


Figura 15. Distribuição espacial do teor de matéria orgânica (dag kg^{-1}) de um Latossolo Vermelho distroférico sob 8 anos de colheita mecanizada para a cultura da cana-de-açúcar, nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.

4.3.3. Granulometria, densidade e porosidade do solo

Os valores da média e mediana, para todas as variáveis, não estão próximos, mostrando distribuições assimétricas, o que pode ser confirmado pelos valores de assimetria distanciando-se de zero (Tabela 20). Os resultados do teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov indicaram não normalidade para todas variáveis em todas as profundidades estudadas, excetuando-se a porosidade total, macroporosidade e a areia na profundidade de 0,20-0,30 m. Souza *et al.* (2004d) estudando a variabilidade espacial da granulometria de um Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar, verificaram normalidade para todos os atributos granulométricos.

Adotando-se a classificação para o coeficiente de variação (CV) proposta por Warrick e Nielsen (1980), a porosidade total e a densidade do solo apresentaram valores baixos (< 12%) em todas as profundidades estudadas, a microporosidade apresentou valores baixos para as profundidades de 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m e valor médio (entre 12 e 24%) para profundidade de 0,00-0,10 m, o teor de argila e areia apresentaram valores baixos para todas as profundidades estudadas enquanto que o silte apresentou valores médios em todas as profundidades estudadas (Tabela 20). A argila e areia dos latossolos são atributos estáveis, ou seja, modificam-se pouco ao longo do tempo por ação do intemperismo, portanto, apresentam

baixos valores de CV. Resultados semelhantes para a densidade do solo foram observados por Souza *et al.* (1997), para granulometria por Souza *et al.* (2004d) e para porosidade do solo por Gonçalves *et al.* (2001).

Tabela 20. Estatística descritiva da granulometria e da porosidade de um Latossolo Vermelho distroférrico sob 8 anos de colheita mecanizada para a cultura da cana-de-açúcar, nas profundidade de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.

Parâmetro	Porosidade (m ³ m ⁻³)			Densidade do Solo (Mg m ⁻³)	Granulometria (g kg ⁻¹)		
	Total	Macro	Micro		Areia	Argila	Silte
0,00-0,10 m							
Média	0,529	0,134	0,394	1,4	391	453	156
Mediana	0,532	0,143	0,383	1,4	391	445	152
Mínimo	0,303	0,007	0,145	1,1	150	388	84
Máximo	0,603	0,270	0,560	1,6	471	696	226
DP	0,037	0,0621	0,059	0,094	41,789	39,948	23,81
CV (%)	7,04	46,13	15,08	6,95	10,68	8,81	15,29
Cs	-1,824	-0,007	0,143	0,112	-2,673	2,603	0,451
Ck	10,251	-0,475	2,356	0,092	13,496	12,626	0,367
p	0,091 ^{**}	0,066 ^{**}	0,116 [*]	0,203 [*]	0,1271 [*]	0,126 [*]	0,099 [*]
0,10-0,20 m							
Média	0,498	0,109	0,388	1,4	387	456	157
Mediana	0,490	0,105	0,380	1,4	388	453	153
Mínimo	0,426	0,007	0,323	1,2	294	374	99
Máximo	0,607	0,250	0,559	1,7	467	535	237
DP	0,038	0,050	0,043	0,115	32,89	27,96	26,39
CV (%)	7,76	45,50	11,29	8,20	8,50	6,13	16,86
Cs	0,562	0,484	1,670	0,405	-0,359	0,241	0,658
Ck	-0,066	-0,025	3,066	-0,240	0,077	0,284	0,321
p	0,103 [*]	0,071 ^{**}	0,178 [*]	0,199 [*]	0,071 [*]	0,081 [*]	0,085 [*]
0,20-0,30 m							
Média	0,484	0,092	0,392	1,5	372	471	158
Mediana	0,486	0,089	0,381	1,5	372	464	151
Mínimo	0,402	0,003	0,323	1,2	232	385	108
Máximo	0,585	0,200	0,554	1,7	456	601	218
DP	0,032	0,046	0,042	0,103	35,52	34,78	25,95
CV (%)	6,80	49,99	10,81	7,02	9,56	7,38	16,42
Cs	0,304	0,202	1,457	-0,003	-0,352	0,593	0,476
Ck	0,535	-0,376	2,275	-0,153	1,243	0,930	-0,586
p	0,048 ^{ns}	0,045 ^{ns}	0,165 [*]	0,195 [*]	0,044 ^{ns}	0,095 [*]	0,128 [*]

DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação; C_s = assimetria; C_k = curtose; p = estatística do teste Kolmogorov-Smirnov. ^{ns} = não significativo a 5% de probabilidade pelo teste Kolmogorov-Smirnov; * = significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste Kolmogorov-Smirnov; ** = significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Kolmogorov-Smirnov.

4.3.4. Capacidade suporte de carga

As equações ajustadas ao modelo de compressibilidade (Figura 16), obtidas para as diferentes profundidades de solo estudadas, diferenciaram-se estatisticamente quando comparadas entre si, utilizando-se o procedimento descrito em Snedecor e Cochran (1989). Os coeficientes de determinação para todas as equações foram significativos e variaram de 98,54 a 98,75%, sendo que os parâmetros do modelo apresentaram 99% de significância para todas as profundidades estudadas. Portanto, pode-se inferir que a pressão de preconsolidação (σ_p) nas profundidades estudadas são diferentes e devem ser preditas por equações distintas, corroborando com observado por Silva *et al.* (2009) estudando a modelagem da compactação em áreas sob cultivo de cana-de-açúcar.

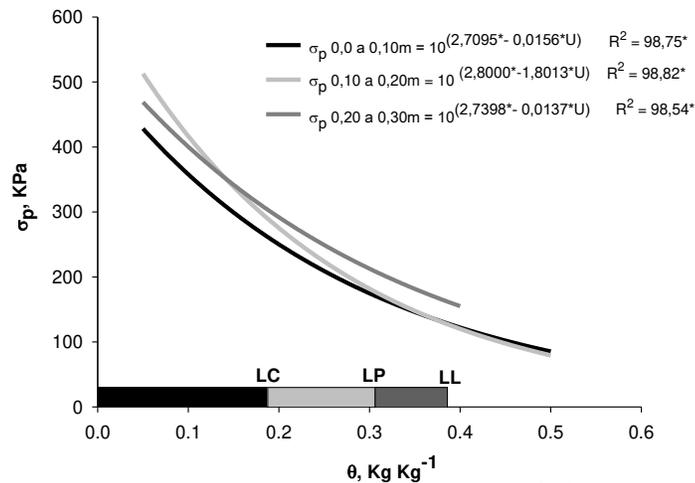


Figura 16. Modelo de capacidade suporte de carga ($\sigma_p = 10^{(a + bU)}$) e σ_p estimados e observados para os limites de consistência de um Latossolo Vermelho distroférico sob 8 anos de colheita mecanizada, para a cultura da cana-de-açúcar. Em que: LC = Limite de contração; RF = Região de friabilidade; LP = Limite de plasticidade; RP = Região de plasticidade e LL = Limite de liquidez.

Foi observada dependência espacial para o teor de água no solo e σ_p em todas as profundidades estudadas, sendo que o modelo que melhor se ajustou aos semivariogramas experimentais foi o esférico (Tabela 21). A razão do efeito pepita sobre o patamar em percentagem para o teor de água no solo e σ_p em todas as profundidades estudadas ficou entre 25 e 75% indicando grau de dependência espacial moderada, com exceção para a profundidade de 0,20-0,30 em que σ_p apresentou grau de dependência espacial inferior a 25% o qual é considerado como forte, de acordo com o critério estabelecido por Cambardella *et al.* (1994). Portanto, a distribuição espacial do teor de água no solo e da σ_p nas três profundidades

estudadas, não é puramente aleatória, sendo que os semivariogramas explicam a maior parte da variância dos dados experimentais.

Tabela 21. Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais da pressão de preconsolidação (σ_p) estimadas ($\sigma_p = 10^{(a + bU)}$) e do teor de água no solo de um Latossolo Vermelho distroférrico sob 8 anos de colheita mecanizada para a cultura da cana-de-açúcar, nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.

Parâmetro	σ_p (KPa)			Teor de água no solo (kg kg^{-1})		
	0,00-0,10 m	0,10-0,20 m	0,20-0,30 m	0,0-0,10 m	0,10-0,20 m	0,20-0,30 m
Modelo	Esférico	Esférico	Esférico	Esférico	Esférico	Esférico
C_0	14070,0	7930,0	7750,0	6,98	4,56	6,26
C_0+C_1	29320,0	22260,0	35170,0	15,43	12,04	13,58
a (m)	75,10	74,70	58,30	39,90	76,90	54,80
GDE (%)	47,99	35,62	22,04	45,24	37,87	44,18
R^2 (%)	96,70	99,9	98,1	97,60	99,40	97,90
SQR	5,296E ⁶	48018	9,319E ⁶	0,770	0,228	96,40

C_0 = efeito pepita; C_0+C_1 = patamar; a = alcance; GDE = grau de dependência espacial; R^2 = coeficiente de determinação do modelo; SQR = soma de quadrados do resíduo.

Os menores valores de σ_p foram encontrados nas regiões que apresentaram maiores valores de teor de água no solo, corroborando com a afirmativa de Dias Junior e Pierce (1996), os quais asseguram que a suscetibilidade do solo à compactação torna-se crítica em condições de excessivos conteúdos de água no solo, devido à baixa capacidade de suporte de carga do solo nessas condições (Figura 17). Desta forma a σ_p indica regiões de manejo específico as quais podem ser monitoradas pelo teor de água no solo. O maior conteúdo de água nestas regiões do mapa pode estar relacionado aos maiores valores de matéria orgânica do solo e estabilidade estrutural pelo índice DMP apresentadas nestas regiões do mapa (Figuras 14 e 15, respectivamente).

A profundidade de 0,20-0,30 m, apresentou a menor capacidade de suporte de carga, provavelmente associada aos maiores valores médios de densidade do solo ($1,5 \text{ Mg m}^{-3}$), teor de argila (471 g kg^{-1}) e menores valores de porosidade total ($0,48 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$) e de matéria orgânica ($1,9 \text{ dag kg}^{-1}$), quando comparados aos valores encontrados nas profundidades mais superficiais do solo (Figura 17). Estes resultados estão de acordo com os encontrados por Silva *et al.* (2003), estudando a relação de atributos físicos do solo com a σ_p em Latossolo Vermelho distrófico.

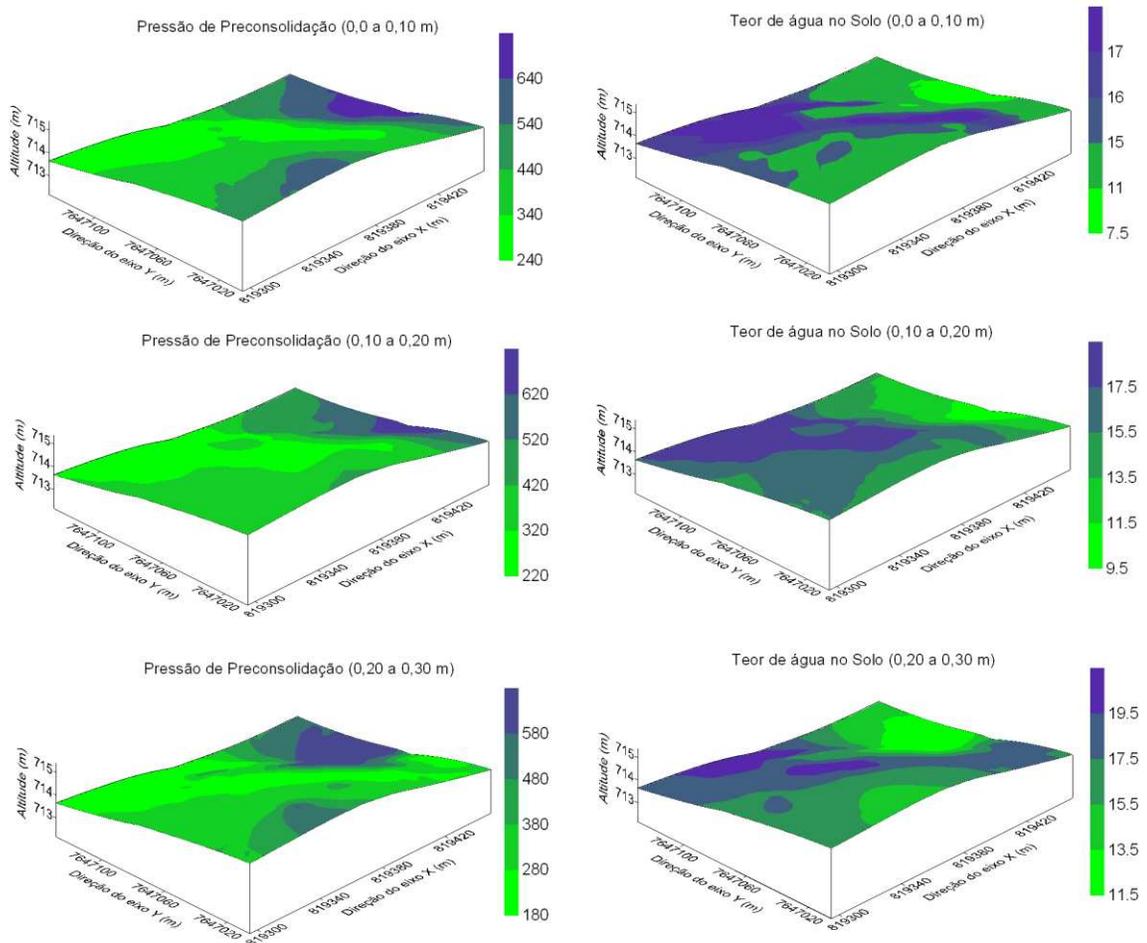


Figura 17. Distribuição espacial das pressões de preconsolidação (σ_p) estimadas ($\sigma_p = 10^{(a + bU)}$) e do teor de água no solo (kg kg^{-1}) de um Latossolo Vermelho distroférico sob 8 anos de colheita mecanizada para a cultura da cana-de-açúcar, nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.

4.3.5. Intervalo hídrico ótimo

Os valores dos potenciais na capacidade de campo (θ_{CC}) e do ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) nos limites críticos de potenciais de água no solo e a resistência do solo à penetração (θ_{RP}) aumentaram de acordo com a densidade do solo (Figura 18). Resultados semelhantes foram observados por Tormena *et al.* (1998) e Leão *et al.* (2004). Ressalta-se, ainda que, a θ_{RP} foi superior ao θ_{PMP} em quase toda a extensão de valores de densidade do solo, semelhante aos resultados encontrados por Benjamim *et al.* (2003).

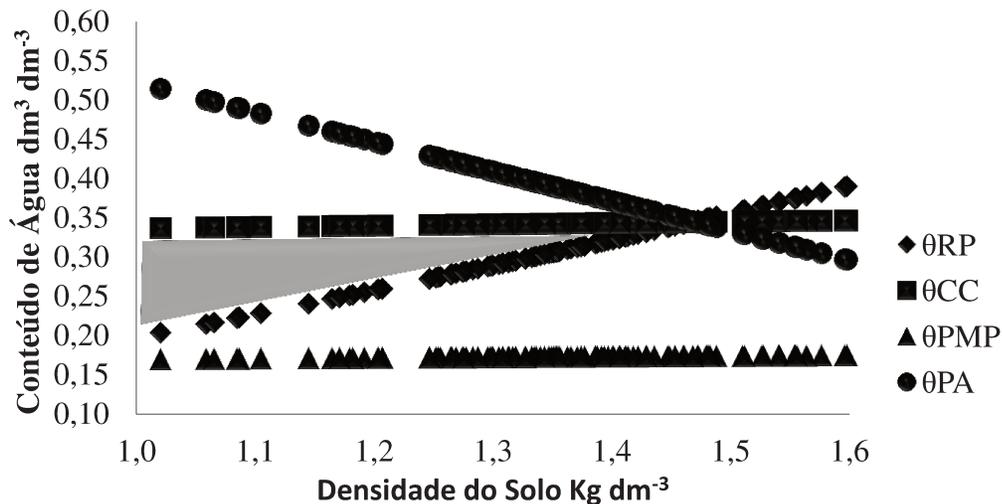


Figura 18. Variação do conteúdo volumétrico de água (θ , $\text{dm}^3 \text{dm}^{-3}$) com a densidade do solo (D_s), para os limites críticos de capacidade de campo (θ_{CC} ; 0,01 MPa), ponto de murcha permanente (θ_{PMP} ; 1,5 MPa), porosidade de aeração (θ_{PA} ; 10%) e resistência do solo à penetração (θ_{RP} ; 2,0 MPa) em um Latossolo Vermelho distroférico sob 8 anos de colheita mecanizada para a cultura da cana-de-açúcar.

A θ_{CC} e a θ_{RP} foram os limites inferiores do IHO, que teve como limite superior a θ_{CC} (Figura 18). A θ_{CP} é limitante com valores de densidade inferiores a $1,11 \text{ Mg m}^{-3}$, resultados semelhantes foram relatados por Kaiser *et al.* (2009), estudando o intervalo hídrico ótimo no perfil explorado pelas raízes de feijoeiro em um latossolo sob diferentes níveis de compactação.

A densidade do solo crítica, ou seja, a densidade em que o IHO é nulo, foi $1,40 \text{ Mg m}^{-3}$ no entanto, analisando a Figura 19, pode fazer inferência de limitação de distribuição do sistema radicular da cultura da cana-de-açúcar pela resistência do solo à penetração (θ_{RP}) com um conteúdo de água entre $0,34$ a $0,42 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, visto que em média a densidade encontrada na área de estudo foi de $1,4 \text{ Mg m}^{-3}$ na profundidade de $0,00$ - $0,10 \text{ m}$ e de $1,5 \text{ Mg m}^{-3}$ para as profundidades de $0,10$ - $0,20 \text{ m}$ e $0,20$ - $0,30 \text{ m}$, nestas condições a θ_{RP} encontrou-se acima do limite crítico reportado pela literatura que é de $2,0 \text{ MPa}$ (SILVA *et al.*, 1994). Pode-se observar ainda, que o aumento da densidade do solo resultou em incremento dos valores de θ_{RP} , resultados semelhantes foram observados por Freddi *et al.* (2008).

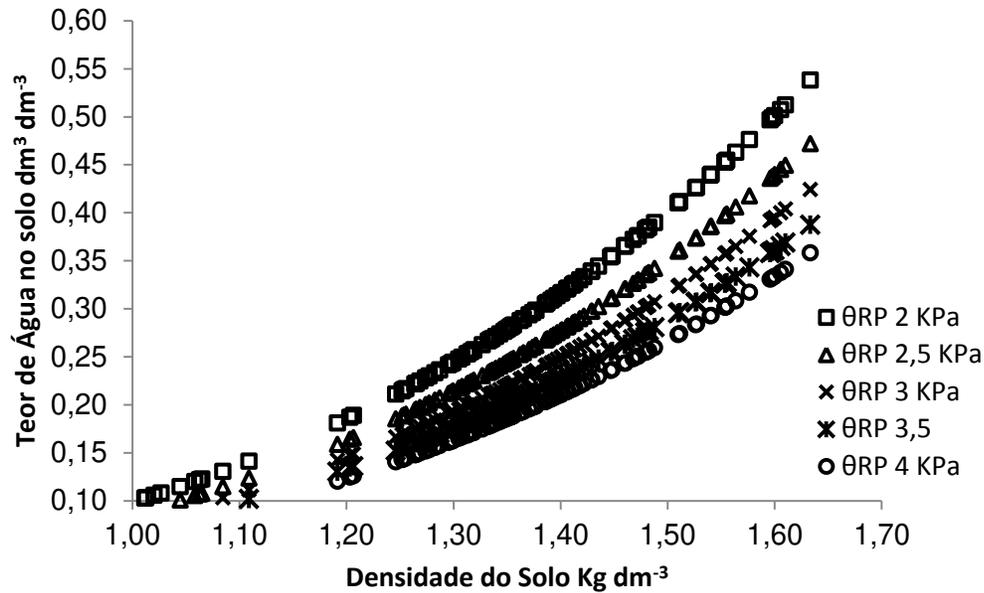


Figura 19. Variação da resistência do solo a penetração (θ_{RP}) para os limites críticos de 2,0; 2,5; 3,0; 3,5 e 4,0 MPa com o conteúdo de água no solo e a densidade do solo em um Latossolo Vermelho distroférico sob 8 anos de colheita mecanizada para a cultura da cana-de-açúcar.

Elevando-se o limite de θ_{RP} para 4,0 MPa a limitação de distribuição do sistema radicular para a cultura da cana-de-açúcar pela θ_{RP} seria alcançada com um conteúdo de água entre 0,23 a 0,29 $m^3 m^{-3}$, nestas condições o limite superior do IHO passaria ser a θ_{CC} (Figura 19).

4.4. Área 3 – Mais de 20 anos sob colheita manual, com queima

4.4.1. Estabilidade de agregados

Os resultados referentes ao teste Kolmogorov-Smirnov indicaram normalidade para diâmetro médio ponderado (DMP) em todas as profundidades estudadas, sendo que o diâmetro médio geométrico (DMG) apresentou comportamento inverso (Tabela 22). No entanto, os valores da média e mediana para o DMG, nas três profundidades estudadas, estão próximos, bem como, os coeficientes de assimetria encontra-se próximo de zero, denotando uma distribuição simétrica dos dados. Segundo Cressie (1991), em se tratando de dados obtidos na natureza, o ajuste de uma distribuição teórica é apenas aproximado, não sendo necessária, portanto, a normalidade dos dados para as análises geoestatísticas e, sim que a distribuição dos dados não tenha caudas muito alongadas.

Tabela 22. Estatística descritiva do diâmetro médio ponderado (DMP) e diâmetro médio geométrico (DMG) de um Latossolo Vermelho distroférico sob colheita manual, com queima, para a cultura da cana-de-açúcar nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.

Parâmetro	DMP (mm)			DMG (mm)		
	0,00-0,10m	0,10-0,20m	0,20-0,30m	0,00-0,10m	0,10-0,20m	0,20-0,30m
Média	1,35	1,37	1,37	0,99	0,98	0,95
Mediana	1,36	1,37	1,37	0,94	0,94	0,94
Mínimo	1,04	1,05	1,03	0,55	0,58	0,62
Máximo	1,64	1,68	1,7	1,68	1,94	1,63
DP	0,118	0,114	0,126	0,202	0,231	0,201
CV (%)	8,78	8,35	9,15	20,23	23,52	21,18
Cs	-0,116	-0,026	0,248	0,920	1,679	0,832
Ck	-0,219	0,047	0,096	1,087	4,396	1,055
p	0,059 ^{ns}	0,044 ^{ns}	0,076 ^{ns}	0,139 [*]	0,113 [*]	0,084 ^{**}

DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação; C_s = assimetria; C_k = curtose; p = estatística do teste Kolmogorov-Smirnov; ^{ns} = não significativo ao nível de 5% pelo teste Kolmogorov-Smirnov; * = significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste Kolmogorov-Smirnov.

Adotando-se a classificação para o coeficiente de variação (CV) proposta por Warrick e Nielsen (1980), o DMP apresentou valores baixos (< 12%) em todas as profundidades estudadas, enquanto que o DMG apresentou valores médios (entre 12 e 24%) para as profundidades estudadas (Tabela 22). Resultados semelhantes foram observados por Melo *et al.* (2004), avaliando os atributos físicos de latossolos adubados durante cinco anos com biossólido. Mesmo que os valores de CV sejam baixos e/ou moderados, este não é um bom indicador da variabilidade espacial dos atributos do solo, pois podem ocorrer no campo valores extremamente altos ou baixos.

Quanto à variabilidade espacial, foi observada dependência espacial para DMP e DMG em todas as profundidades estudadas com ajuste ao modelo esférico para ambos os atributos (Tabela 23). Resultados semelhantes foram observados por Souza *et al.* (2009), estudando a variabilidade espacial da estabilidade de agregados em latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar. Pesquisas de variabilidade espacial têm mostrado o modelo esférico como de maior ocorrência (SOUZA *et al.*, 2003; GREGO; VIEIRA, 2005; MONTANARI *et al.*, 2005).

Tabela 23. Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais do diâmetro médio ponderado (DMP) e do diâmetro médio geométrico (DMG) de um Latossolo Vermelho distroférico sob colheita manual, com queima, para a cultura da cana-de-açúcar nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.

Parâmetro	DMP (mm)			DMG (mm)		
	0,00-0,10 m	0,10-0,20 m	0,20-0,30 m	0,0-0,10 m	0,10-0,20 m	0,20-0,30 m
Modelo	Esférico	Esférico	Esférico	Esférico	Esférico	Esférico
C_0	0,00145	0,00209	0,00001	0,00845	0,00472	0,00488
C_0+C_1	0,00980	0,00978	0,01222	0,0374	0,02324	0,02686
a (m)	13,30	16,50	20,60	18,5	16,40	22,20
GDE (%)	14,79	21,37	0,08	22,59	20,31	18,17
R^2 (%)	5,70	54,40	91,20	90,20	53,32	86,50
SQR	$9,854E^{-6}$	$2,248E^{-6}$	$3,116E^{-6}$	$4,085E^{-6}$	$1,066E^{-5}$	$8,467E^{-6}$

C_0 = efeito pepita; C_0+C_1 = patamar; a = alcance; GDE = grau de dependência espacial; R^2 = coeficiente de determinação do modelo; SQR = soma de quadrados do resíduo.

A razão do efeito pepita sobre o patamar em percentagem para o DMP e DMG indica grau de dependência espacial forte para todas as profundidades estudadas, evidenciando a não aleatoriedade dos dados para ambos os atributos, sendo que os semivariogramas explicam a maior parte da variância dos dados experimentais (Tabela 23). Resultados semelhantes foram observados por Camargo *et al.* (2008) estudando a dependência espacial de atributos físicos do solo em Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar. Souza *et al.* (2004b) também observaram a variabilidade espacial da estabilidade de agregados de um Latossolo Vermelho e atribuíram-na às diferentes formas do relevo. O predomínio de dependência espacial forte indica que ação do fogo nesta área não afetou a caracterização da variabilidade dos atributos do solo estudados.

Como o DMP e DMG apresentaram estrutura espacial, os parâmetros dos semivariogramas ajustados foram utilizados para estimar valores em locais não amostrados por meio da krigagem, para confecção de mapas temáticos da distribuição espacial do DMP e DMG, respectivamente, nas três profundidades estudadas (Figura 20). Observa-se que os menores valores de qualidade estrutural do solo foram obtidos na profundidade mais subsuperficial do solo 1,04 para DMP e 0,65 para o DMG. Este comportamento pode estar relacionado com fato de que logo após a carbonização dos resíduos orgânicos da cultura da cana-de-açúcar, ocorreu um incremento superficial dos teores de matéria orgânica do solo em superfície, favorecendo o processo de agregação do solo.

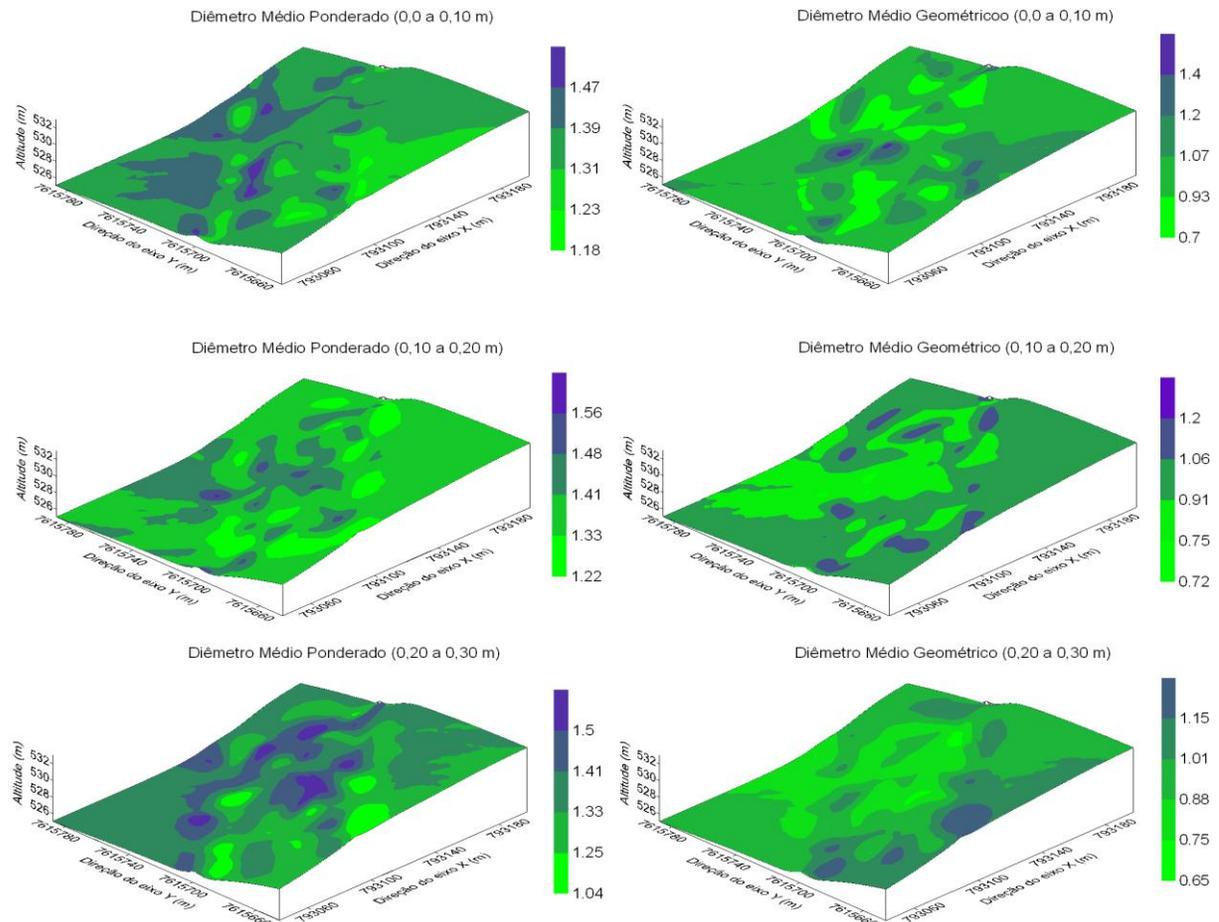


Figura 20. Distribuição espacial do diâmetro médio ponderado (DMP, mm) e do diâmetro médio geométrico (DMG, mm) de um Latossolo Vermelho distroférrico sob colheita manual, com queima, para a cultura da cana-de-açúcar nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.

4.4.2. Teor de matéria orgânica

Os resultados referentes à análise descritiva para o teor de matéria orgânica do solo (MO) indicaram ajuste à distribuição não normal (Tabela 24). Os resultados referentes ao teste Kolmogorov-Smirnov indicaram a não normalidade dos dados de MO em todas as profundidades estudadas. Resultados semelhantes foram obtidos por Salviano *et al.* (1998) e Souza *et al.* (2004c). No entanto, os valores da média e mediana, para todas as profundidades, estão próximos, bem como, os coeficientes de assimetria encontram-se próximo de zero, denotando a ausência de caudas muito alongadas na distribuição dos dados, favorecendo assim o uso da geoestatística.

O teor de MO apresentou valores de CV altos (> 24%) nas três profundidades estudadas (Tabela 24). A medida estatística CV permite comparar a variabilidade entre amostras de variáveis com unidades diferentes, porém, não permite analisar a variabilidade

espacial destas nem seu padrão espacial. Nesse sentido, a variação dos teores de percentuais de matéria orgânica do solo observada neste estudo justifica a análise da dependência espacial para melhor entendimento do padrão de ocorrência desse atributo.

Tabela 24. Estatística descritiva do teor de matéria orgânica do solo (MO) de um Latossolo Vermelho distroférico sob colheita manual, com queima, da cultura para a cana-de-açúcar, nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.

Parâmetro	Matéria Orgânica (dag kg ⁻¹)		
	0,00-0,10m	0,10-0,20m	0,20-0,30m
Média	2,03	2,0	1,88
Mediana	2,20	2,10	1,9
Mínimo	0,30	0,30	0,30
Máximo	3,1	2,9	3,10
DP	0,49	0,4793	0,4756
CV (%)	24,38	24,01	25,28
C _s	-1,3797	-1,0315	-0,8896
C _k	2,7605	2,1069	1,8783
p	0,2256*	0,1687*	0,1436*

DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação; C_s = assimetria; C_k = curtose; p = estatística do teste Kolmogorov-Smirnov. * = significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste Kolmogorov-Smirnov.

Quanto à variabilidade espacial, foi observada dependência espacial para o teor de matéria orgânica em todas as profundidades estudadas, sendo que o modelo que melhor se ajustou aos semivariogramas experimentais foi o esférico (Tabela 25). Estudando a dependência espacial de atributos de solo em áreas sob cultivo de cana-de-açúcar, Souza *et al.* (2004c) também encontraram ajuste ao modelo esférico para a matéria orgânica do solo.

Tabela 25. Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais do teor de matéria orgânica de um Latossolo Vermelho distroférico sob colheita manual, com queima, para a cultura da cana-de-açúcar nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.

Parâmetro	Teor de matéria orgânica (dag kg ⁻¹)		
	0,00-0,10 m	0,10-0,20 m	0,20-0,30 m
Modelo	Esférico	Esférico	Esférico
C ₀	0,0757	0,0427	0,0304
C ₀ +C ₁	0,19944	0,1354	0,1428
a (m)	61,70	61,60	26,60
GDE (%)	37,96	31,54	21,29
R ² (%)	96,30	98,4	91,5
SQR	4,493E ⁻⁴	1,085E ⁻⁴	2,875E ⁻⁴

C₀ = efeito pepita; C₀+C₁ = patamar; a = alcance; GDE = grau de dependência espacial; R² = coeficiente de determinação do modelo; SQR = soma de quadrados do resíduo.

Observou-se similaridade na distribuição espacial do teor de matéria orgânica nas três camadas do solo estudadas (Figura 21), evidenciada pela proximidade dos valores de C₀ e

GDE (Tabela 25). Verifica-se pela análise visual dos mapas de contorno predomínio de manchas nítidas com os maiores valores de matéria orgânica na profundidade superficial do solo com redução em profundidade. Comportamento semelhante foi observado por Souza *et al.* (2009) estudando Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar.

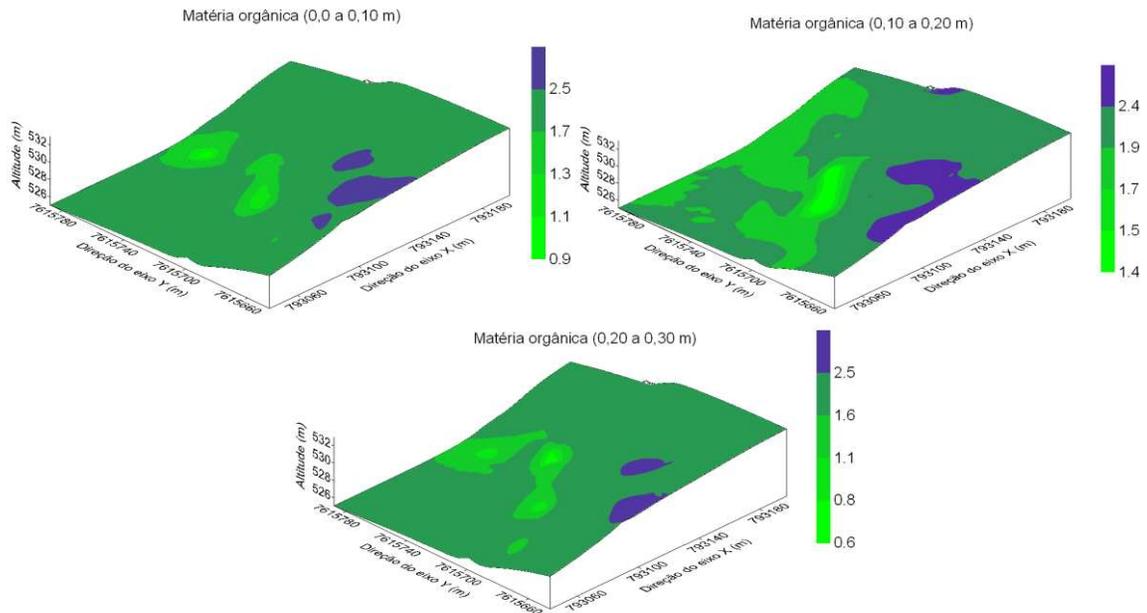


Figura 21. Distribuição espacial do teor de matéria orgânica (dag kg^{-1}) de um Latossolo Vermelho distroférrico sob colheita manual, com queima, para a cultura da cana-de-açúcar nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.

4.4.3. Granulometria, densidade e porosidade do solo do solo

Os valores da média e mediana, para porosidade do solo na profundidade de 0,00-0,10 m, não estão próximos, mostrando distribuições assimétricas, o que pode ser confirmado pelos valores de assimetria distanciando-se de zero, comportamento semelhante foi observado para teor de argila na profundidade de 0,00-0,10 m e teor de areia para profundidade de 0,10-0,20 m e para a densidade do solo na profundidade de 0,20-0,30 m (Tabela 26). Estas observações podem ser comprovadas pelo resultado do teste Kolmogorovi-Smirnov, o qual indicou não normalidade para os referidos atributos nas profundidades mencionadas. Os resultados do teste de normalidade Kolmogorov-Smirnov indicaram normalidade para os demais atributos e suas respectivas profundidades. Tais afirmações corroboram com relatado por Camargo *et al.* (2008) ao avaliar a variabilidade espacial de atributos físicos e mineralógicos de um Latossolo sob cultivo de cana-de-açúcar.

Adotando-se a classificação para o coeficiente de variação (CV) proposta por Warrick e Nielsen (1980), com exceção da macroporosidade que apresentou valores altos (> 24%) para todas as profundidades estudadas, os atributos de solo apresentaram valores de CV baixos (< 12%) em todas as profundidades estudadas (Tabela 26). Estes resultados corroboram com os obtidos por Souza *et al.* (2009), que avaliando dependência espacial de atributos físicos do solo em áreas sob cultivo de cana-de-açúcar encontraram valores elevados de CV para macroporosidade.

Tabela 26. Estatística descritiva da granulometria e da porosidade do solo de um Latossolo Vermelho distroférrico sob colheita manual, com queima, para a cultura da cana-de-açúcar nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.

Parâmetro	Porosidade (m ³ m ⁻³)			Densidade do Solo (Mg m ⁻³)	Granulometria (g kg ⁻¹)		
	Total	Macro	Micro		Areia	Argila	Silte
0,00-0,10 m							
Média	0,583	0,121	0,462	1,33	170	566	264
Mediana	0,580	0,115	0,466	1,34	170	565	263
Mínimo	0,377	0,030	0,239	1,09	134	477	203
Máximo	0,727	0,256	0,663	1,55	213	643	316
DP	0,039	0,053	0,046	0,099	15,67	21,96	22,87
CV (%)	6,85	44,27	10,03	7,43	9,20	3,88	8,67
Cs	-0,254	0,658	-0,550	-0,112	0,239	0,094	-0,157
Ck	6,975	-1,190	6,133	-0,373	0,206	3,185	-0,223
p ⁽¹⁾	0,092*	0,089*	0,094*	0,063 ^{ns}	0,049 ^{ns}	0,076*	0,064 ^{ns}
0,10-0,20 m							
Média	0,556	0,098	0,458	1,41	168	570	262
Mediana	0,556	0,093	0,465	1,41	168	570	261
Mínimo	0,455	0,020	0,255	1,07	135	520	199
Máximo	0,685	0,356	0,541	1,73	231	653	313
DP	0,030	0,048	0,041	0,957	16,915	21,303	22,475
CV (%)	5,38	48,59	9,07	6,79	10,04	3,74	8,58
Cs	0,071	1,919	-2,483	-0,143	0,729	0,439	-0,188
Ck	4,203	7,547	9,015	1,210	1,056	1,187	-0,061
p ⁽¹⁾	0,087**	0,100*	0,138*	0,079 ^{ns}	0,107*	0,049 ^{ns}	0,070 ^{ns}
0,20-0,30 m							
Média	0,562	0,095	0,467	1,38	164	579	257
Mediana	0,558	0,091	0,466	1,39	163	580	259
Mínimo	0,456	0,019	0,371	1,11	124	523	183
Máximo	0,759	0,214	0,678	1,60	238	664	313
DP	0,036	0,038	0,085	0,085	17,482	24,886	24,86
CV (%)	6,49	40,09	7,92	6,17	10,66	4,30	9,66
Cs	1,694	0,804	2,477	0,085	0,750	0,238	-0,167
Ck	8,164	1,065	13,459	0,534	2,092	0,714	0,228
p ⁽¹⁾	0,138*	0,084**	0,138*	0,080**	0,058 ^{ns}	0,069 ^{ns}	0,053 ^{ns}

DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação; C_s = assimetria; C_k = curtose; p = estatística do teste Kolmogorov-Smirnov. ^{ns} = não significativo a 5% de probabilidade pelo teste Kolmogorov-Smirnov; * = significativo ao nível de 1% de probabilidade pelo teste Kolmogorov-Smirnov; ** = significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Kolmogorov-Smirnov.

4.4.4. Capacidade suporte de carga do solo

As equações ajustadas ao modelo de compressibilidade (Figura 22), obtidas para as diferentes profundidades de solo estudadas, apresentaram diferença estatística quando comparadas entre si, utilizando-se o procedimento descrito em Snedecor e Cochran (1989). Os coeficientes de determinação para todas as equações foram significativos e variaram de 95,12 a 96,20%, sendo que o coeficiente angular (b) e o intercepto (a), parâmetros do modelo, apresentaram 99% de significância para todas as profundidades estudadas. Sob condições semelhantes, estudando a modelagem da compactação em áreas sob cultivo de cana-de-açúcar, Silva *et al.* (2009) relatam que a modelagem da pressão de preconsolidação (σ_p) deve ser feita com equações distintas, visto que a σ_p nas profundidades estudadas são diferentes.

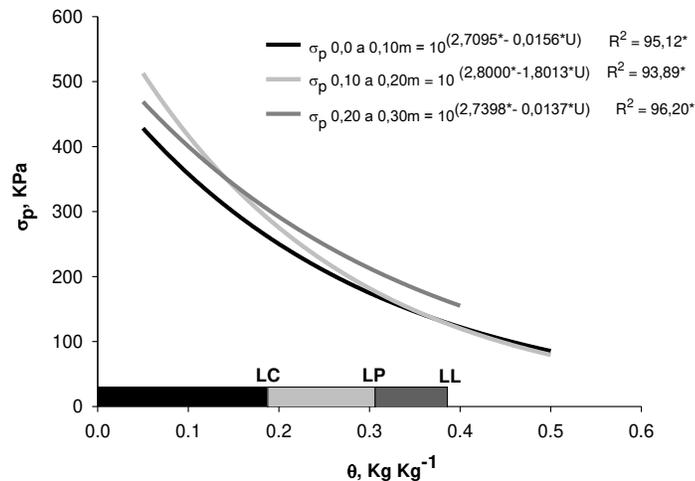


Figura 22. Modelo de capacidade suporte de carga ($\sigma_p = 10^{(a + bU)}$) e σ_p estimados para os limites de consistência de um Latossolo Vermelho distroférico sob colheita manual, com queima, para a cultura da cana-de-açúcar. Em que: LC = Limite de contração; RF = Região de friabilidade; LP = Limite de plasticidade; RP = Região de plasticidade e LL = Limite de liquidez.

Foi observada dependência espacial para o teor de água no solo e σ_p em todas as profundidades estudadas, sendo que, o modelo que melhor se ajustou aos semivariogramas experimentais foi o esférico (Tabela 27). Resultados semelhantes foram observados por Gontijo *et al.* (2007) estudando o planejamento amostral da pressão de preconsolidação num Latossolo Vermelho distroférico.

A razão do efeito pepita sobre o patamar em percentagem do teor de água no solo e da σ_p em todas as profundidades estudadas ficou abaixo de 25%, indicando grau de

dependência espacial forte conforme o critério estabelecido por Cambardella *et al.* (1994). Portanto, a distribuição espacial do teor de água no solo e da σ_p nas três profundidades estudadas, não é puramente aleatória, sendo que os semivariogramas explicam a maior parte da variância dos dados experimentais.

Tabela 27. Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais da pressão de preconsolidação (σ_p) estimadas ($\sigma_p = 10^{(a + bU)}$) e do teor de água no solo de um Latossolo Vermelho distroférrico sob colheita manual, com queima, para a cultura da cana-de-açúcar nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.

Parâmetro	σ_p (KPa)			Teor de água no solo (kg kg^{-1})		
	0,00-0,10 m	0,10-0,20 m	0,20-0,30 m	0,00-0,10 m	0,10-0,20 m	0,20-0,30 m
Modelo	Esférico	Esférico	Esférico	Esférico	Esférico	Esférico
C_0	0,100	24,500	0,10	0,477	0,372	0,448
C_0+C_1	143,70	108,0	115,20	2,483	1,703	2,014
a (m)	19,3	17,60	19,40	17,70	18,90	17,10
GDE (%)	0,07	22,29	0,09	19,21	21,84	22,24
R^2 (%)	84,90	80,70	88,20	74,30	82,0	90,10
SQR	443	114	336	0,088	0,037	0,024

C_0 = efeito pepita; C_0+C_1 = patamar; a = alcance; GDE = grau de dependência espacial; R^2 = coeficiente de determinação do modelo; SQR = soma de quadrados do resíduo.

Na Figura 23 são apresentados os mapas temáticos da distribuição espacial da σ_p e do teor de água no solo nas três profundidades de solo estudadas, respectivamente, a σ_p foi ajustada em função do conteúdo de água no solo. Os valores estimados por krigagem foram agrupados em uma escala de cores, contendo cinco classes para as três profundidades. Os menores valores de σ_p foram encontrados nas regiões que apresentaram maiores valores de teor de água no solo indicando regiões de manejo específico pela σ_p as quais podem ser monitoradas pelo teor de água no solo, corroborando com a afirmativa de Dias Junior e Pierce (1996), os quais asseguram que a suscetibilidade do solo à compactação torna-se crítica em condições de excessivos conteúdos de água no solo, devido à baixa capacidade de suporte de carga do solo nessas condições. Concordando com os resultados obtidos por Ferrero *et al.* (2005) e Gontijo *et al.* (2007).

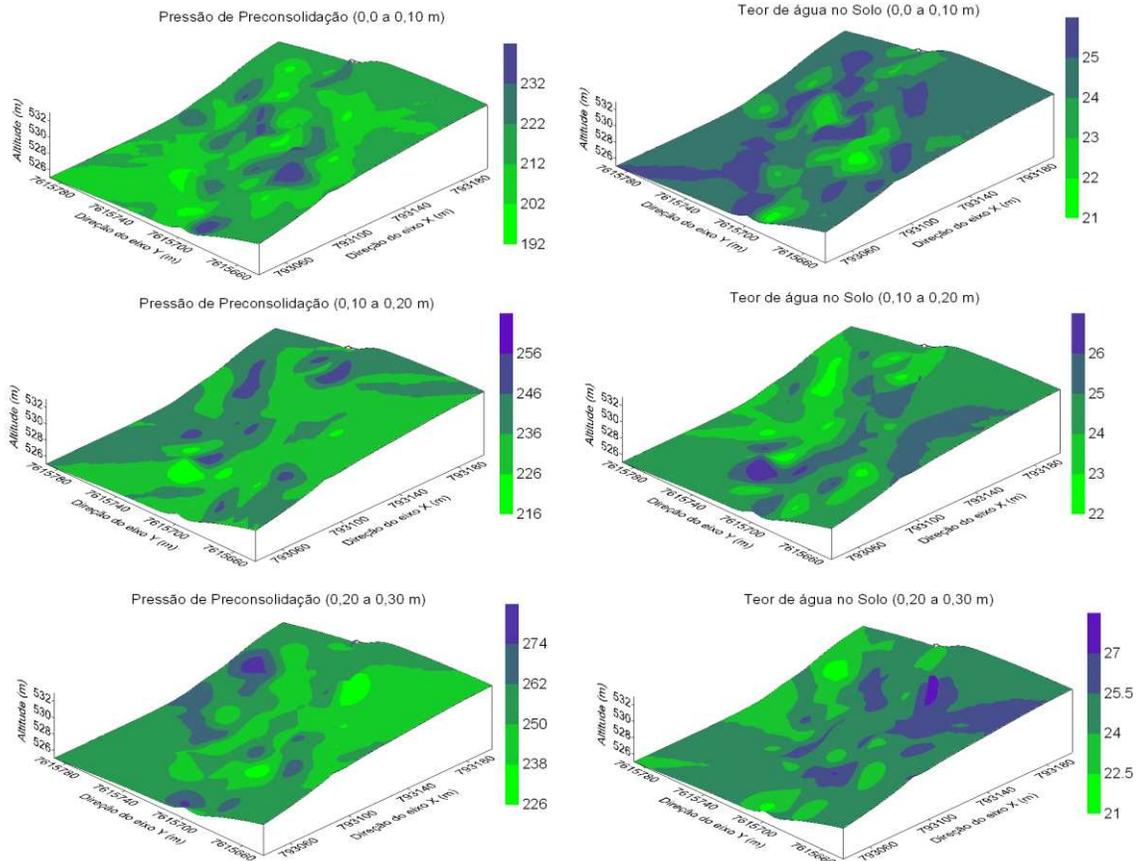


Figura 23. Distribuição espacial das pressões de preconsolidação (σ_p) estimadas ($\sigma_p = 10^{(a + bU)}$) e do teor de água no solo (kg kg^{-1}) de um Latossolo Vermelho distroférrico sob colheita manual, com queima, para a cultura da cana-de-açúcar nas profundidades de 0,00-0,10 m, 0,10-0,20 m e 0,20-0,30 m.

A profundidade de 0,10-0,20 m, apresentou a menor capacidade de suporte de carga, provavelmente associada aos maiores valores médios de densidade do solo ($1,41 \text{ Mg m}^{-3}$), teor de argila (570 g kg^{-1}) e menores valores de porosidade total ($0,556 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$), bem como uma menor amplitude de valores de matéria orgânica ($2,0$ a $2,9 \text{ dag kg}^{-1}$), quando comparados aos valores encontrados nas demais profundidades estudadas (Figura 23). Estes resultados estão de acordo com os encontrados por Silva *et al.* (2003), estudando a relação de atributos físicos do solo com a σ_p em Latossolo Vermelho distrófico.

4.4.5. Intervalo hídrico ótimo

Os valores dos potenciais na capacidade de campo (θ_{CC}) e do ponto de murcha permanente (θ_{PMP}) nos limites críticos de potenciais de água no solo e a resistência do solo à penetração (θ_{RP}) aumentaram de acordo com a densidade do solo (Figura 24). Resultados semelhantes foram observados por Tormena *et al.* (1998) e Leão *et al.* (2004). Ressalta-se,

ainda que, a θ_{RP} foi superior ao θ_{PMP} em quase toda a extensão de valores de densidade do solo, semelhante aos resultados encontrados por Benjaminim *et al.* (2003). A θ_{PMP} e a θ_{RP} foram os limites inferiores do IHO, que teve como limite superior a θ_{CC} e θ_{PA} . A θ_{PMP} é limitante com valores de densidade inferiores a $1,11 \text{ Mg m}^{-3}$, resultados semelhantes foram relatados por Kaiser *et al.* (2009) na determinação do IHO.

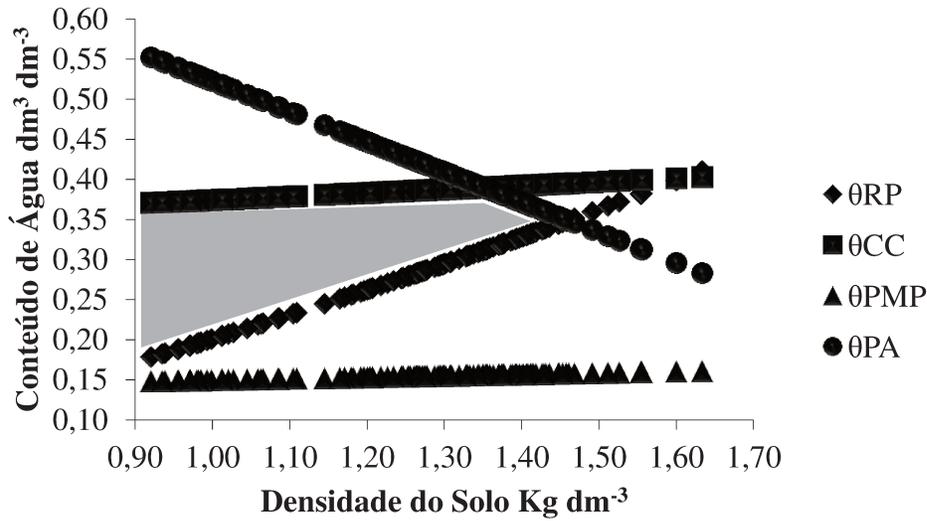


Figura 24. Variação do conteúdo volumétrico de água (θ , $\text{dm}^3 \text{ dm}^{-3}$) com a densidade do solo (D_s), para os limites críticos de capacidade de campo (θ_{CC} ; 0,01 MPa), ponto de murcha permanente (θ_{PMP} ; 1,5 MPa), porosidade de aeração (θ_{PA} ; 10%) e resistência do solo à penetração (θ_{RP} ; 2,5 MPa) em um Latossolo Vermelho distroférrico sob colheita manual, com queima, para a cultura da cana-de-açúcar.

O aumento da densidade do solo resultou em incremento dos valores de θ_{RP} (Figura 25). Resultados semelhantes foram observados por Freddi *et al.* (2008) e Kaiser *et al.* (2009). A densidade do solo crítica, ou seja, a densidade em que o IHO é nulo, foi $1,36 \text{ Mg m}^{-3}$ no entanto pode-se fazer inferência de limitação de distribuição do sistema radicular da cultura da cana-de-açúcar pela resistência do solo à penetração (θ_{RP}) com um conteúdo de água entre $0,32$ a $0,43 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$, visto que em média a densidade do solo encontrada na área de estudo foi de $1,33 \text{ Mg m}^{-3}$ na profundidade de 0,00-0,10 m e de $1,41 \text{ Mg m}^{-3}$ para a profundidade de 0,10-0,20 m, nestas condições a θ_{RP} encontra-se acima do limite crítico reportado pela literatura que é de 2,0 MPa (SILVA *et al.*, 1994).

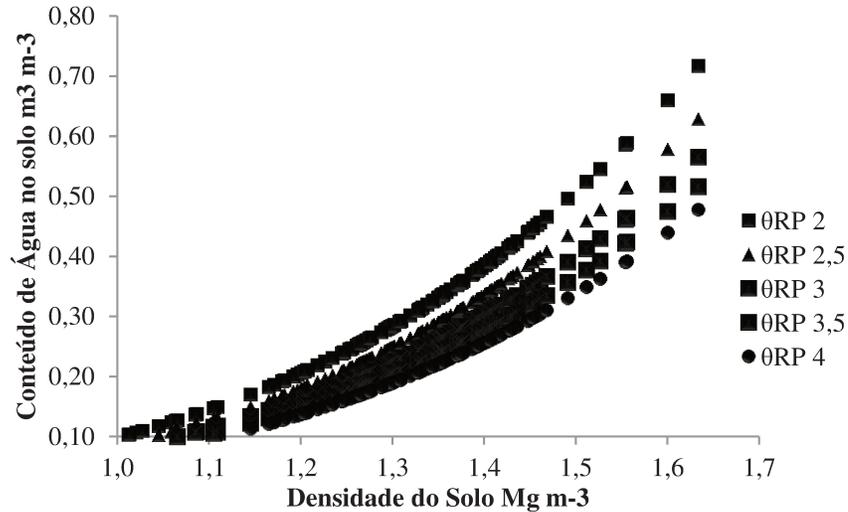


Figura 25. Variação da resistência do solo à penetração (θ_{RP}) para os limites críticos de 2,0; 2,5; 3,0; 3,5 e 4,0 MPa com o conteúdo de água no solo e a densidade do solo em um Latossolo Vermelho distroférico sob colheita manual, com queima, para a cultura da cana-de-açúcar.

4.5. Relações de atributos físicos com a produtividade da cultura

Os resultados referentes à análise descritiva para a produtividade da cultura da cana-de-açúcar nas três áreas estudadas indicaram ajuste à distribuição não normal (Tabela 28). Os resultados referentes ao teste Kolmogorov-Smirnov indicaram a não normalidade dos dados de produtividade para as três áreas estudadas. Resultados semelhantes para produtividade da cultura da cana-de-açúcar foram observados por Souza *et al.* (2010), que analisaram atributos do solo e da produtividade da cultura de cana-de-açúcar com o uso da geoestatística. Deve-se ressaltar, no entanto, que os valores da média e mediana, para as três áreas, estão próximos, bem como, os coeficientes de assimetria encontram-se próximo de zero, denotando a ausência de caudas muito alongadas na distribuição dos dados, favorecendo assim o uso da geoestatística.

Tabela 28. Estatística descritiva para a produtividade da cultura de cana-de-açúcar para área com cana-crua (16 anos), cana-crua (8 anos) e cana queimada (mais de 20 anos).

Parâmetro	Produtividade (Mg ha ⁻¹)		
	14 Mecanizada ¹	6 Mecanizada ²	Manual ³
Média	144,78 a	103,18 c	124,04 b
Mediana	150,0	100,0	121,50
Mínimo	78,0	43,0	60,0
Máximo	227,0	177,0	221,0
DP	31,16	30,48	29,43
CV (%)	21,54	29,54	23,73
C _s	-0,050	0,252	0,481
C _k	-0,263	-0,325	0,261
p	0,091**	0,056**	0,072**

¹ = Área sob colheita mecanizada a 14 anos; ² = Área sob colheita mecanizada a 6 anos; ³ = Área sob colheita manual a mais de 20 anos; DP = desvio padrão; CV = coeficiente de variação; C_s = assimetria; C_k = curtose; p = estatística do teste Kolmogorov-Smirnov. ** = significativo ao nível de 5% de probabilidade pelo teste Kolmogorov-Smirnov.

Observa-se que a área sob 14 anos de colheita mecanizada, apresentou maiores valores médios de produtividade em relação a área sobre colheita manual, o que pode estar relacionado a maior estabilidade estrutural e teores de matéria orgânica apresentados nesta área, reflexo do maior aporte de resíduos orgânicos oriundos do processo de colheita mecanizada sem queima (Tabela 27). Resultados semelhantes foram observados por Souza *et al.* (2005), estudando sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar em um Latossolo Vermelho-Amarelo.

Adotando-se a classificação para o coeficiente de variação (CV) proposta por Warrick e Nielsen (1980), os valores de produtividade para cultura da cana-de-açúcar, apresentaram valores altos (> 24%) nas três áreas estudadas (Tabela 28). Segundo Vanni (1998), coeficiente de variação maior que 35% revela que a série é heterogênea, e a média tem pouco significado. Portanto, observam-se para a produtividade da cultura da cana-de-açúcar, que a série de dados é homogênea para as três áreas. Concordando com os resultados observados por Souza *et al.* (2010) em um Argissolo Vermelho-Amarelo sob cultivo de cana-de-açúcar.

Quanto à variabilidade espacial, foi observada dependência espacial para produtividade em todas as áreas estudadas, sendo que o modelo que melhor se ajustou aos semivariogramas experimentais foi o esférico, excetuando-se a área sob colheita manual, na qual o modelo que melhor se ajustou aos dados foi o exponencial (Tabela 29). Estudando a dependência espacial de atributos de planta em áreas sob cultivo de cana-de-açúcar, Souza *et*

al. (2010) também encontraram ajuste ao modelo esférico para a produtividade da cultura da cana-de-açúcar.

Tabela 29. Modelos e parâmetros estimados dos semivariogramas experimentais para a produtividade da cultura de cana-de-açúcar para área com cana-crua (16 anos), cana-crua (8 anos) e cana queimada (mais de 20 anos).

Parâmetro	Produtividade (Mg ha ⁻¹)		
	14 Mecanizada ¹	6 Mecanizada ²	Manual ³
Modelo	Esférico	Esférico	Exponencial
C ₀	1,000	179,0	298,0
C ₀ +C ₁	797,40	845,70	955,50
a (m)	24,100	19,20	73,20
GDE (%)	99,87	78,83	68,81
R ² (%)	79,0	80,80	87,70
SQR	61992	9357	31202

¹ = Área sob colheita mecanizada a 14 anos; ² = Área sob colheita mecanizada a 6 anos; ³ = Área sob colheita manual a mais de 20 anos; C₀ = efeito pepita; C₀+C₁ = patamar; a = alcance; GDE = grau de dependência espacial; R² = coeficiente de determinação do modelo; SQR = soma de quadrados do resíduo.

Na Figura 26 são apresentados os mapas temáticos da distribuição espacial da produtividade da cultura da cana-de-açúcar paralelos aos limites críticos da capacidade de campo (θ_{CC} ; 0,01 MPa), ponto de murcha permanente (θ_{PMP} ; 1,5 MPa), porosidade de aeração (θ_{PA} ; 10%) e resistência do solo à penetração (θ_{RP} ; 2,0 MPa) nas três áreas estudadas. Verifica-se pela análise visual dos mapas de contorno predomínio de manchas nítidas com os maiores valores de produção observados nas regiões de maior cota da área. Resultados semelhantes foram observados por Montezano *et al.* (2008) e Souza *et al.* (2010), os quais observaram correlação positiva da altitude do terreno com a produtividade, indicando que nas áreas menos elevadas do talhão a produtividade é menor.

Cruzando-se os dados dos limites críticos das áreas com os mapas de produtividade das culturas, observa-se uma maior restrição na área sobre colheita manual, a qual apresentou uma menor densidade crítica (1,36 Mg m⁻³), o que pode ter causado restrições hídricas durante o manejo da cultura diminuindo a produtividade da cultura que foi de 124,04 Mg ha⁻¹ na área com corte manual (Figura 26). Na área sobre colheita mecanizada, a maior densidade crítica do solo (1,39 Mg m⁻³), favoreceu a permanência de condições ideais de manejo ao longo do ciclo da cultura, refletindo-se na obtenção de maiores valores de produtividade para esta área que obteve o valor médio de produtividade de 144,78 Mg ha⁻¹, uma vez que, à medida que a cultura agrícola suporta uma maior densidade do solo, maior será a faixa onde o conteúdo de água do solo não apresenta impedimento físico para o seu desenvolvimento. Leão *et al.* (2004)

observaram densidade crítica de $1,46 \text{ Mg m}^{-3}$, considerando uma RP 3,0 MPa para um Latossolo Vermelho distrófico textura argilosa. Souza et al. (2005), estudando sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar, verificaram maior produtividade para cultura de cana-de-açúcar nas áreas com colheita mecanizada (cana crua).

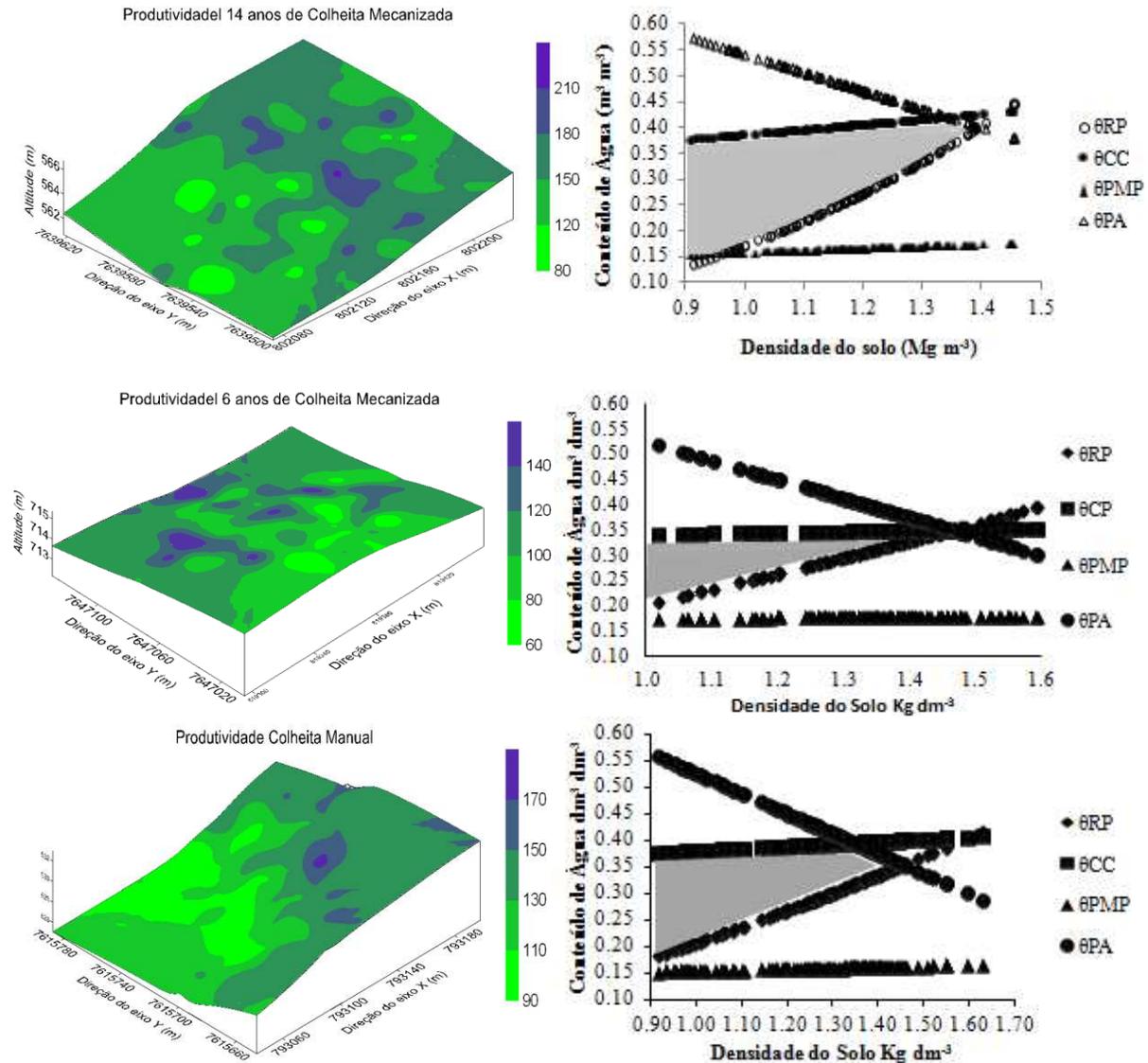


Figura 26. Relação da distribuição espacial da produtividade da cana-de-açúcar (Mg ha^{-1}) nas três áreas estudadas com a variação do conteúdo volumétrico de água (θ , $\text{dm}^3 \text{ dm}^{-3}$) com a densidade do solo (D_s), para os limites críticos de capacidade de campo (θ_{CC} ; 0,01 MPa), ponto de murcha permanente (θ_{PMP} ; 1,5 MPa), porosidade de aeração (θ_{PA} ; 10%) e resistência do solo à penetração (θ_{RP} ; 2,5 MPa) para cada uma das áreas estudadas.

Pode-se ressaltar ainda, com base na modelagem da capacidade suporte de carga do solo a eficiência da σ_p como indicador de qualidade estrutural do solo, visto que, nas regiões de menor capacidade suporte de carga são aquelas onde se concentram os maiores valores de

produtividade (Figuras 11, 17 e 23). Este resultado deve-se provavelmente ao fato de que uma maior capacidade de suporte de carga pode limitar o desenvolvimento do sistema radicular das culturas, devido à alta pressão que as raízes têm de realizar para se desenvolverem, visto que as pressões exercidas por elas têm de ser iguais às de σ_p (RÖMKENS; MILLER, 1971). Concordando com os resultados obtidos por Gontijo *et al.* (2007).

Analisando os sistemas de manejo conjuntamente, percebe-se que para qualquer valor de umidade do solo, o manejo sob colheita mecanizada apresentou maior pressão de preconsolidação do solo (Figura 27). Considerando-se que o tráfego de máquinas deve ser realizado em condições de umidade inferior à do limite de plasticidade do solo (SILVA *et al.*, 2009), no presente estudo foi menor do que $0,34 \text{ kg kg}^{-1}$, na região de friabilidade ou tenacidade, observou-se maior capacidade de suporte de carga do solo no manejo sob colheita mecanizada, nas três camadas de solo (273, 333, e 339 kPa), em comparação ao manejo sob colheita com queima e corte manual (262, 290 e 308 kPa). Solos com valores elevados de pressão de preconsolidação apresentam maior probabilidade de reduzir o crescimento das raízes (LIMA *et al.*, 2006), no entanto apresentam melhores condições de trafegabilidade, com menor possibilidade de sofrer alteração na sua estrutura com o tráfego de máquinas.

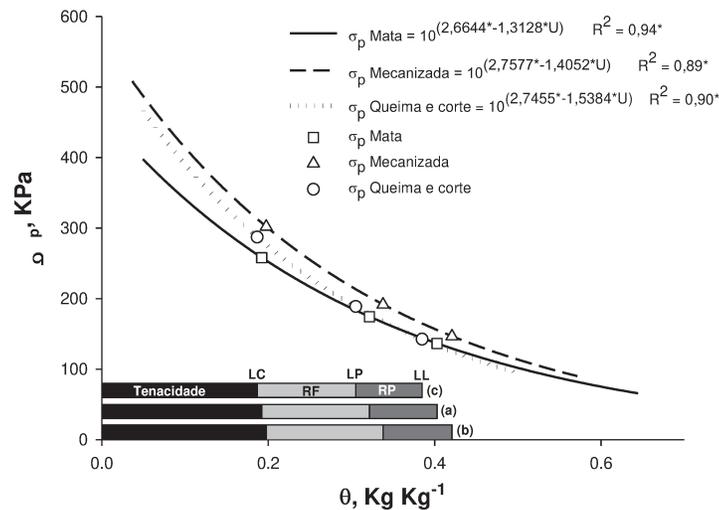


Figura 27. Modelos de capacidade suporte de carga ($\sigma_p = 10^{(a + bU)}$) e limites de consistência de um Latossolo Vermelho distroférico sob cultivo de cana-de-açúcar e vegetação natural (mata) na camada 0,00-0,30 m. Em que: LC = Limite de contração; RF = Região de friabilidade; LP = Limite de plasticidade; RP = Região de plasticidade e LL = Limite de liquidez; (a) = Área sob Mata; (b) = Colheita Mecanizada e (c) Colheita com queima e corte.

5. Conclusões

Os resíduos orgânicos aportados ao solo no sistema de colheita mecanizada são capazes de absorver parte da energia de compactação produzida pelo trânsito de máquinas agrícolas;

Os atributos de solo estudados apresentam estrutura de dependência espacial;

O intervalo hídrico ótimo e σ_p mostraram-se sensíveis as alterações ocorridas no solo em detrimento dos sistemas de manejo estudados;

A área sob colheita manual da cultura da cana-de-açúcar apresentou menor valor de densidade crítica para o intervalo hídrico ótimo;

A maior produtividade da cultura concentrou-se nas regiões de maior amplitude do intervalo hídrico ótimo e maior capacidade suporte de carga do solo para as áreas estudadas;

A distribuição espacial da pressão de preconsolidação e da umidade do solo pode ser usada para desenvolvimento de estratégias de manejo que minimizem os riscos da compactação adicional ao solo relacionando-se positivamente com a produtividade da cana-de-açúcar.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALAKUKKU, L.; ELOMEN, P. Long-term effects of a single compaction by heavy field traffic on yield and nitrogen uptake of annual crops. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.36, n.2, p.141-152, 1994.

ALAMEDA, D.; ANTEN, N.P.R.; VILLAR, R. Soil compaction effects on growth and root traits of tobacco depend on light, water regime and mechanical stress. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.120, n.2, p.121-129, 2012.

AMARO FILHO, J.; NEGREIROS, R.F.D.; ASSIS JÚNIOR, R.N.; MOTA, J.C.A. Amostragem e variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho em Mossoró, RN. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.3, p.415-422, 2007.

ARAÚJO, A.S.F.; MONTEIRO, R.T.R. Indicadores biológicos de qualidade do solo. **Bioscience Journal**, Uberlândia, v.23, n.3, p.66-75, 2007.

ARAUJO, F. S.; SALVIANO, A.A.C.; LEITE, L.F.C.; SOUZA, Z.M. & SOUSA, A.C.M. Physical quality of a Yellow Latosol under integrated crop livestock system. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, n.3, p.717-723, 2010.

ARAUJO, R.; GOEDERT, W. J.; LACERDA, M.P.C. Qualidade de um solo sob diferentes usos e sob Cerrado nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.5, p.1099-1108, 2007.

- ASSIS, R.L.; LANÇAS, K.P. Avaliação da compressibilidade de um Nitossolo Vermelho distroférico sob sistema de plantio direto, preparo convencional e mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, n.4, p.507-514, 2005.
- BALBINO, L.C.; BRUAND, A.; COUSIN, I.; BROSSARD, M.; QUÉTIN, P.; GRIMALDI, M. Change in the hydraulic properties of a Brazilian clay Ferralsol on clearing for pasture. **Geoderma**, Amsterdam, v.120, n.3-4, p.297-307, 2004.
- BALL, B.C.; CAMPBELL, D.J.; DOUGLAS, J.T.; HENSHALL, J.K.; O'SULLIVAN, M.F. Soil structural quality, compaction and land management. **European Journal of Soil Science**, London, v.48, n.4, p.593-601, 1997.
- BELTRAME, L.F.S.; TAYLOR, J.C. Causas e efeitos da compactação do solo. **Lavoura Arrozeira**, Porto Alegre, v.32, n.1, p.59-62, 1980.
- BENGOUGH, A.G.; MULLINS, C.E. Mechanical impedance to root growth: a review of experimental techniques and root growth responses. **Journal of Soil Science**, Oxford, v.41, n.3, p.341-358, 1990.
- BENJAMIN, J.G.; NIELSEN, D.C.; VIGIL, M.F. Quantifying effects of soil conditions on plant growth and crop production. **Geoderma**, Amsterdam, v.116, n.1, p.137-148, 2003.
- BERNER, P.G.M.; VIEIRA, S.R.; LIMA, E.; ANJOS, L.H.C. Variabilidade espacial de propriedades físicas e químicas de um Cambissolo sob dois sistemas de manejo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.5, p.837-844, 2007.
- BETIOLI JÚNIOR, E.; MOREIRA, W.H.; TORMENA, C.A.; FERREIRA, C.J.B.; SILVA, A.P.; GIAROLA, N.F.B. Intervalo Hídrico Ótimo e Grau de Compactação de um Latossolo Vermelho Após 30 Anos Sob Plantio Direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.36, n.1, p.971-982, 2012.
- BEUTLER, A.N.; CENTURION, J.F.; CENTURION, M.A.P.C.; FREDDI, O.S.; SOUSA NETO, E.L.; LEONEL, C.L.; SILVA, A.P. Traffic soil compaction of an oxisol related to soybean development and yield. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.64, n.6, p.608-615, 2007.
- BLAINSKI, E.; GONÇALVES, A.C.A.; TORMENA, C.A.; FOLEGATTI, M.V.; GUIMARÃES, R.M.L. Intervalo hídrico ótimo num Nitossolo Vermelho distroférico irrigado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, n.2, p.273-281, 2009.
- BLAIR, G. J.; CHAPMAN, L.; WHITBREAD, A. M.; BALL-COELHO, B.; LARSEN, P.; TIESSSEN, H. Soil carbon changes resulting from trash management at two locations in Queensland, Australia and in North-east Brazil. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, v.36, p.873-882, 1998.
- 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.

BOWLES, J.E. **Engineering properties of soils and their measurements**. 3.ed. Auckland: McGraw-Hill, 1986. 218p.

BRADFORD, J.M.; GUPTA, S.C. Compressibility. In: KLUTE, A. **Methods of soil analysis: physical and mineralogical methods**. Madison: American Society of Agronomy, 1986. cap.19, p.463-660.

BRAIDA, J.A. **Matéria Orgânica e Resíduos Vegetais na Superfície do Solo e Suas Relações com o Comportamento Mecânico do Solo sob Plantio Direto**. 2004 126 p. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) - Programa de Pós-Graduação em Ciência do Solo, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

BRAIDA, J.A.; REICHERT, J.M.; VEIGA, M.; REINERT, D.J. Resíduos vegetais na superfície e carbono orgânico do solo e suas relações com a densidade máxima obtida no ensaio Proctor. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, n.4, p.605-614, 2006.

BRAIDA, J.A.; REICHERT, J.M.; REINERT, D.J.; SEQUINATTO, L. Elasticidade do solo em função da umidade e do teor de carbono orgânico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.2, p.477-485, 2008.

BROWN, L.R. **Building a sustainable society**. New York: Norton. 1981. 433 p.

BUSSCHER, W.J. Adjustment of flat-tipped penetrometer resistance data to common water content. **Transactions of the ASAE**, St. Joseph, v.3, n.4, p.519-524, 1990.

CAMARGO, L.A.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, G.T.; HORVAT, R.A. Variabilidade espacial de atributos mineralógicos de um latossolo sob diferentes Formas do relevo. II - Correlação espacial entre mineralogia e agregados. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.2, p.2279-2288. 2008.

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 Agronômico de Campinas**. Campinas: Instituto Agronômico, p.94, 1986.

CAMBARDELLA, C.A.; MOORMAN, T.B.; NOVAK, J.M.; PARKIN, T.B.; KARLEN, D.L.; TURCO, R.F.; KONOPKA, A.E. Field scale variability of soil properties in Central Iowa soils. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n.5, p.1501-1511, 1994.

CAMPOS, M.C.C.; FERRAZ, F.B.; FREITAS, E.W.S.; SOUZA, Z.M. Dependência espacial de atributos físicos e hídricos de um Espodossolo da zona da mata de Pernambuco. **Revista Biociências da Terra**, Campina Grande, v.7, n.1, p.84-91, 2007.

CANILLAS, E.C.; SALOKHE, V.M. A decision support system for compaction assessment in agricultural soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.65, n.2, p.221-230, 2002.

CARVALHO, J.R.P.; SILVEIRA, P.M.; VIEIRA, S.R. Geoestatística na determinação da variabilidade espacial de características químicas do solo sob diferentes preparos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.37, n.8, p.1151-1159, 2002.

CARVALHO, L.A.; MEURER, I.; SILVA JUNIOR, C.A.; CAVALIERI, K.M.V.; SANTOS, C.F.B. Dependência espacial dos atributos físicos de três classes de solos cultivados com cana-de-açúcar sob colheita mecanizada. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**. Campina Grande, vol.15, n.9, p.940-949, 2011.

CAVALCANTE, E.G.S.; ALVES, M.C.; PEREIRA, G.T.; SOUZA, Z.M. Variabilidade espacial de MO, P, K e CTC do solo sob diferentes usos e manejos. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.37, n.2, p.394-400, 2007.

CAVALIERI, K.M.V.; CARVALHO, L.A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P.L.; TORMENA, C.A. Qualidade física de três solos sob colheita mecanizada de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 35, n.5, p. 1541-1549, 2011.

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, 2006.

CEDDIA, M.B.; ANJOS, L.H.C.; LIMA, E.; RAVELLI NETO, A.; SILVA, L.A. Sistemas de colheita da cana-de-açúcar e alterações nas propriedades físicas de um solo podzólico amarelo no estado do espírito santo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.34, n.8, p.1467-1473, 1999.

COLLARES, G.L.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Qualidade física do solo na produtividade da cultura do feijoeiro num Argissolo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, n.11, p.1663-1674, 2006.

COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Acompanhamento da safra brasileira de cana-de-açúcar 2012/2013**: primeiro levantamento. Brasília, 2012.

CORÁ, J.E.; ARAUJO, A.V.; PEREIRA, G.T.; BERALDO, J.M.G. Variabilidade espacial de atributos do solo para adoção do sistema de agricultura de precisão na cultura de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.6, p.1013-1021, 2004.

CRESSIE, N. Statistics for spatial data. New York, John Wiley, 1991. 900p.

DAO, T.H. Tillage system and crop residue effects on surface compaction of a Paleustoll. **Agronomy Journal**, Madison, v.88, n.2, p.141-148, 1996.

DEXTER, A.R.; TANNER, D.W. Time dependence of compressibility for remolded and undisturbed soils. **Journal of Soil Science**, London, v.25, n.2, p.153-164, 1973.

DIAS JÚNIOR, M.S. Compactação do solo. In: NOVAIS, R.F.; ALVAREZ, V.H.V.; SCHAEFER, C.E.G.R. **Tópicos em ciência do solo**. Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do solo, v.1, p.55-95, 2000.

- DIAS JUNIOR, M.S. **Compression of three soils under long-term tillage and wheel traffic**. 1994. Thesis (Ph.D. in Crop and Soil Science) – Michigan State University, East Lansing, EUA.
- DIAS JUNIOR, M.S.; FERREIRA, M.M.; FONSECA, S.; SILVA, A.R.; FERREIRA, D.F. Avaliação quantitativa da sustentabilidade estrutural dos solos em sistemas florestais na região de Aracruz-ES. **Revista Árvore**, Viçosa, v.23, n.4, p.371-380, 1999.
- DIAS JÚNIOR, M.S.; PIERCE, F.J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.20, n.1, p.1-8, 1996.
- DORAN, J.W.; PARKIN, T.B. Defining and assessing soil quality. In: DORAN, J.W.; COLEMAN, D.C.; BEZDICEK, D. F.; STEWART, B. A. (Org.) **Defining soil quality for a sustainable environment**. Madison: SSSA, p.3-21, 1994.
- DORAN, J.W.; ZEISS, M.R. Soil health and sustainability: managing the biotic component of soil quality. **Applied Soil Ecology**, Amsterdam, v.15, n.1, p.3-11, 2000.
- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Manual de métodos de análise de solo**. 2.ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA, CNPS, 1997. 212p.
- FERNANDES, B.; GALLOWAY, H.M.; BRONSON, R.D.; MANNERING, J.V. Efeito de três sistemas de preparo do solo na densidade aparente, na porosidade total e na distribuição dos poros, em dois solos (Typic Argiaquoll e Typic Hapludalf). **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.7, n.1, p.329-333, 1983.
- FERRERO, A.; USOWICZ, B.; LIPIEC, J. Effects of tractor traffic on spatial variability of soil strength and water content in grass covered and cultivated sloping vineyard. **Soil and Tillage Research**. Amsterdam, v.84, n.1, p.127-138, 2005.
- FIDALSKI, J.; TORMENA, C.T.; SCAPIM, C.A. Espacialização vertical e horizontal dos indicadores de qualidade para um latossolo vermelho cultivado com citros. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.1, p.9-19, 2007.
- FIGUEIREDO, L.H.A.; DIAS JUNIOR, M. de S.; FERREIRA, M.M. Umidade crítica de compactação e densidade do solo máxima em resposta a sistemas de manejo num Latossolo Roxo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, n.3, p.487-493, 2000.
- FLOWERS, M.D.; LAL, R. Axle load and tillage effects on soil physical properties and soybean grain yield on a mollic ochraqualf in northwest Ohio. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.48, n.1-2, p.21-35, 1998.
- FREDDI, O.S.; CENTURION, J.F.; ARATANI, R.G.; BEUTLER, A.N. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo no crescimento da parte aérea e produtividade da cultura do milho. **Irriga**, Botucatu, v.13, p.272-287, 2008.

FURLANI NETO, V.L.; RIPOLI, T.C.; VILLANOVA, V.A. Avaliação de desempenho operacional de colhedoura em canaviais com e sem queima prévia. **STAB. Açúcar, Álcool e Subprodutos**, Piracicaba, v.15, n.2, p.18-23, 1996.

GALDOS, M.V.; CERRI, C.C.; CERRI, C.E.P.; PAUSTIAN, K.R. Simulation of soil carbon dynamics under sugarcane with CENTURY Model. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.73, p.802-811, 2009.

GAMMA DESIGN SOFTWARE. **Geostatistics for the environmental sciences** (version 7.0 for windows). Michigan: 2004. 1 CD.

GOLDEN SOFTWARE INC. (Golden, Estados Unidos). **Surfer for windows: realese 7.0, contouring and 3D surface mapping for scientist's engineers user's guide**. New York, 1999. 619p.

GONÇALVES, A.C.A; FOLEGATTI, M.V.; MATA, J.D.V. Análises exploratórias e geoestatística da variabilidade de propriedades físicas de um Argissolo Vermelho. **Acta Scientiarum**, Maringá, v.23, n.4, p.1149-1157, 2001.

GONTIJO, I.; DIAS JUNIOR, M.S.; OLIVEIRA, M.S.; ARAUJO JUNIOR, F.; PIRES, B.S.; OLIVEIRA, C.A. Planejamento amostral da pressão de preconsolidação de um latossolo vermelho distroférico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.6, p.1245-1254, 2007.

GREGO, C.R.; VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial de propriedades físicas do solo em uma parcela experimental. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.29, n.2, p.169-177, 2005.

GUIMARÃES, R.M.L.; TORMENA, C.A.; ALVES, S.J.; FIDALSKI, J.; BLAINSKI, E. Tensile strength, friability and organic carbon in an oxisol under a crop-livestock system. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.66, n.4, p.499-505, 2009.

GUPTA, S.C.; ALLMARAS, R.R. Models to assess the susceptibility of soil to excessive compaction. **Advances in Soil Science**, New York, v.6, n.1, p.65-100, 1987.

GUPTA, S.C.; HADAS, A.; VOORHEES, W.B.; WOLF, D.; LARSON, W.E.; SCHNEIDER, E.C. **Development of quids for estimating the ease of compaction of world soils**. Bet Dagan: Research Report, Binational Agriculture Research Development, University of Minnesota, 1985. 178p.

HAKANSSON, I.; VOORHEES, W.B. Soil compaction. In: LAL, R.; BLUM, W.H.; VALENTIN, C. **Methods for assessment of soil degradation**. Boca Raton: Lewis, p.167-179, 1997.

HAKANSSON, I.; VOORHEES, W.B.; RILEY, H. Vehicle and wheel factors influencing soil compaction and crop response in different traffic regimes. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.11, n.3-4, p.239-282, 1988.

- HAMZA, M.A.; ANDERSON, W.K. Soil compaction in cropping systems A review of the nature, causes and possible solutions. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.82, n.2, p.121-145, 2005.
- HARTEMINK, A.E. Soil chemical and physical properties as indicators of sustainable land management under sugar cane in Papua New Guinea. **Geoderma**, Amsterdam, v.85, p.283-306, 1998.
- HILLEL, D. **Fundamentals of soil physics**. New York: Academic Press, 1980. 413 p.
- HOFFMANN, H.P.; SANTOS, E.G.D.; BASSINELLO, A.I.; VIEIRA, M.A.S. Variedades RB de cana-de-açúcar. Araras: CCA/UFSCar, 2008. 30p.
- HORN, R.; LEBERT, M. Soil compactability and compressibility. In: SOANE, B.D.; VAN OUWERKERK, C. **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p.45-69.
- IBGE – Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. Pesquisa mensal de previsão e acompanhamento das safras agrícolas no ano civil. **Levantamento sistemático da produção agrícola**, Rio de Janeiro, v.24, n.12, p.1-82, 2012.
- IMHOFF, S., SILVA, A.P., TORMENA, C.A. Aplicações da curva de resistência no controle da qualidade física de um solo sob pastagem. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.35, n.7, p.1493-1500, 2000.
- IMHOFF, S.; SILVA, A.P.; DIAS JÚNIOR, M.S.; TORMENA, C.A. Quantificação de pressões críticas para o crescimento das plantas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.25, n.1, p.11-18, 2001.
- ISAAKS, E.H.; SRIVASTAVA, R.M. **An introduction to applied geostatistics**. New York: Oxford University, 1989.
- ISLAM, K.R.; WEIL, R.R. Soil quality indicator properties in mid-atlantic soils as influenced by conservation management. **Journal of Soil and Water Conservation**, Ankeny, v.55, n.1, p.69-78, 2000.
- JOHANN, J.A.; OPAZO, M.A.U.; SOUZA, E.G.; ROCHA, J.V. Variabilidade espacial dos atributos físicos do solo e da produtividade em um Latossolo Bruno distrófico da região de Cascavel, PR. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.8, n.2, p.212-219, 2004.
- KAISER, D.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; COLLARES, M.K. Intervalo hídrico ótimo no perfil explorado pelas raízes de feijoeiro em um latossolo sob diferentes níveis de compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, n.4, p.845-855. 2009.
- KEMPER, W.D.; CHEPIL, W.S. Size distribution of aggregates. In: BLACK, C.A. (Ed.). **Methods of soil analysis**. Madison: American Society Agronomy, 1965. p.499-510.

- KONDO, M.K., DIAS JÚNIOR, M.S. Compressibilidade de três latossolos em função da umidade e uso. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.23, n.2, p.211-218, 1999.
- KOOLEN, A.J. Mechanics of soil compaction. In: SOANE, B.D.; VAN OUWERKERK, C. **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. cap. 2, p.23-44.
- LANÇAS, K.P. **A compactação do solo agrícola**. Botucatu: Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, 1996. 23p.
- LEÃO, T.P.; SILVA, A.P.; MACEDO, M.C.M.; IMHOFF, S.C.; EUCLIDES, V.P.B. Intervalo hídrico ótimo na avaliação de sistemas de pastejo contínuo e rotacionado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.3, p.415-423, 2004.
- LEBERT, M.; HORN, R. A method to predict the mechanical strength of agricultural soils. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.19, n.2, p.275-286, 1991.
- LETEY, J. Relationship between soil physical properties and crop production. **Advances in Soil Science**, New York, v.1, n.1, p.277-294, 1985.
- LIMA, C.L.R.; SILVA, A.P.; IMHOFF, S.C.; LEÃO, T.P. Estimativa da capacidade de suporte de carga do solo a partir da avaliação da resistência à penetração. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.30, n.2, p.217-223, 2006.
- LIMA, V.M.P.; OLIVEIRA, G.C.; SERAFIM, M.E.; CURI, N.; EVANGELISTA, A.R. Intervalo Hídrico Ótimo como Indicador de melhoria da Qualidade Estrutural de Latossolo Degradado. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.36, n.1, p.71-78, 2012.
- LINSTRON, M.J.; VOORHEES, W.B. Responses of temperate crops in North America to soil compaction. In: SOANE, B.D.; van OUWERKERK, C. **Soil compaction in crop production**. London: Elsevier, 1994. p.265-286 (Developments in agricultural engineering, 2).
- MARQUES JÚNIOR, J.; SANCHEZ, R.B.; PEREIRA, G.T.; CORÁ, J.E. **Variabilidade espacial de propriedades químicas e físicas de latossolos em áreas de cerrado sob cultivo de café, em Patrocínio, MG**. In: Balastreire, L.A. (ed) O estado-da-arte da agricultura de precisão no Brasil. Piracicaba: L.A. Balastreire, p.105-112, 2000.
- MARQUES JÚNIOR, J.; SOUZA, Z.M.; PEREIRA, G.T.; BARBIERI, D.M. Variabilidade espacial de matéria orgânica, P, K e CTC de um latossolo cultivado com cana-de-açúcar por longo período. **Revista de Biologia e Ciências da Terra**, Campina Grande, v.8, n.1, p.143-152, 2008.
- MATERECHERA, S.A. Tillage and tractor traffic effects on soil compaction in horticultural fields used for peri-urban agriculture in a semi-arid environment of the North West Province, South Africa. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.103, n.1, p.11-15, 2009.
- McBRATNEY, A.B.; WEBSTER, R. Choosing functions for semi-variograms of soil properties and fitting them to sampling estimates. **Journal Soil Science**, Oxford, v.37, n.3, p.617-639, 1986.

MEGDA, M.M.; CARVALHO, M.P.; VIEIRA, M.X.; ANDREOTTI, M.; PEREIRA, E.C. Correlação linear e espacial entre a produtividade de feijão e a porosidade de um Latossolo Vermelho de Selvíria, MS. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.2, p.781-788, 2008.

MELO, V.P.; BEUTLER, A.N.; SOUZA, Z.M.; CENTURION, J.F.; MELO, W.J. Atributos físicos de latossolos adubados durante cinco anos com bio sólido. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.1, p.67-72, 2004.

MENDONZA, H.N.S.; LIMA E.; ANJOS, L.H.C.; SILVA, L.A.; CEDDIA, M.B.; ANTUNES, M.V.M. Propriedades químicas e biológicas de solo de tabuleiro cultivado com cana-de-açúcar com e sem queima da palhada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.24, n.2, p.201-207, 2000.

MONTANARI, R.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T.; SOUZA, Z.M. Forma da paisagem como critério para otimização amostral de latossolos sob cultivo de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.40, n.1, p.69-77, 2005.

MONTANARI, R.; SOUZA, G.S.A.; PEREIRA, G. T.; MARQUES JR, J.; SIQUEIRA, D.S.; SIQUEIRA, G.M. . The use of scaled semivariograms to plan soil sampling in sugarcane fields. **Precision Agriculture**, Amsterdam, v.13, n.1, p.01-11, 2012.

MONTEZANO, Z.F.; CORRAZA, E.J.; MURAOKA, T. Variabilidade de nutrientes em plantas de milho cultivado em talhão manejado homoganeamente. **Bragantia**, Campinas, v.67, n.4, p.969-976, 2008.

NICOLOSO, R.D.S. **Dinâmica da matéria orgânica do solo em áreas de integração lavoura-pecuária sob sistema plantio direto**. 2005. 150 p. Dissertação (Mestrado em Ciência do Solo) – Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo, Centro de Ciências Rurais, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

NOVAES FILHO, J.P.; COUTO, E.G.; OLIVEIRA, V.A. de; JOHNSON, M.S.; LEHMANN, J.; RIHA, S.S. Variabilidade espacial de atributos físicos de solo usada na identificação de classes pedológicas de micro bacias na Amazônia meridional. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.1, p.91-100, 2007.

OTTO, R.; SILVA, A.P.; FRANCO, H.C.J.; OLIVEIRA, E.C.A.; TRIVELIN, P.C.O. High soil penetration resistance reduces sugarcane root system development. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.117, n.1, p.201-210, 2011.

PACHECO, E.P.; CANTALICE, J.R.B. Compressibilidade, resistência à penetração e intervalo hídrico ótimo de um Argissolo Amarelo cultivado com cana-de-açúcar nos Tabuleiros Costeiros de Alagoas. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, n.2, p.403-415, 2011.

PEREIRA, F.S.; ANDRIOLI I.; BEUTLER A.N.; ALMEIDA, C.X.; PEREIRA, F.S. Physical quality of an Oxisol cultivated with maize submitted to cover crops in the pre-cropping period. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.34, n.1, p.211-217, 2010.

PIRES, L.F.; REICHARDT, K.; COOPER, M.; CÁSSARO, F.A.M.; DIAS, N.M.P.; BACCHI, O.O.S. Pore system changes of damaged Brazilian oxisols and nitosols induced by wet-dry cycles as seen in 2-D micromorphologic image analysis. **Annals of the Brazilian Academy of Sciences**, v.81, n.1, p.151-161, 2009.

RABELLO, L.M.; CRUVINEL, P.E. Intelligent instrument to facilitate decision making in the evaluation of soil resistance to root penetration. **Scientia Agricola**, Piracicaba, v.66, n.5, p.573-582, 2009.

RAGHAVAN, G.S.V.; ALVO, P.; MCKYES, E. Soil compaction in agriculture: A review toward managing the problem. **Advances in Soil Science**, London, v.11, n.1, p.1-36, 1990.

RAGHAVAN, G.S.V.; MICKYES, E. Physical and hydraulic characteristics in compacted clay soils. **Journal of Terramechanics**, Elmsford, v.19, p. n.2, p.235-242, 1983.

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

REICHERT, J.M.; SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J. Compactação do solo em sistemas agropecuários e florestais: identificação, efeitos, limites críticos e mitigação. In: **Tópicos de Ciência do Solo**, Viçosa: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, v.1, p.49-134, 2007.

REINERT, D.J. **Soil structural form and stability induced by tillage in a typic Hapludalf**. 1990. 128p. Tese. (Doutorado) – Michigan State University, Michigan, EUA.

REINERT, D.J.; ALBUQUERQUE, J.A.; REICHERT, J.M.; AITA, C.; ANDRADA, M.M.C. Limites críticos de densidade do solo para o crescimento de raízes de plantas de cobertura em Argissolo Vermelho. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.5, p.1805-1816, 2008.

RICHART, A.; TAVARES FILHO, J.; BRITO, O.R.; LLANILLO, R.F.; FERREIRA, R. Compactação do solo: causas e efeitos. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v.26, n.3, p.321-344, 2005.

RODRIGUES, P.F.; ROLIM, M.M.; BEZERRA NETO, E.; PEDROSA, E.M.R.; OLIVEIRA, V.S. Crescimento e composição mineral do milho em função da compactação do solo e da aplicação de composto orgânico. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.13, n.1, p.94-99, 2009.

RÖMKENS, M.J.M.; MILLER, R.R. Predicting root size and frequency from one-dimensional consolidation data: A mathematical model. **Plant and Soil**, Amsterdam, v.35, n.1, p.237-248, 1971.

ROQUE, A.A.O.; SOUZA, Z.M.; ARAÚJO, F.S.; SILVA, G.R.V. Atributos físicos do solo e intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Vermelho distrófico sob controle de tráfego agrícola. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.41, p.1536-1542, 2011.

- RUSSELLE, M.P.; FRANZLUEBBERS, A.J. Introduction to "Symposium: Integrated crop-livestock systems for profit and sustainability". **Agronomy Journal**, Madison, v.99, n.2, p.323-324, 2007.
- SAFFIHDADI, K.; DÉFOSSEZ, P.; RICHARD, G.; CUI, Y.J.; TANG, A.M.; CHAPLAIN, V. A method for predicting soil susceptibility to the compaction of surface layers as a function of water content and bulk density. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.105, n.1, p.96-103, 2009.
- SALTON, J.C.; MIELNICZUK, J.; BAYER, C.; BOENI, M.; CONCEIÇÃO, P.C.; FABRÍCIO, A.C.; MACEDO, M.C.M.; BROCH, D.L. Agregação e estabilidade de agregados do solo em sistemas agropecuários em Mato Grosso do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.1, p.11-21, 2008.
- SALVIANO, A.A.C.; VIEIRA, S.R.; SPAROVEK, G. Variabilidade espacial de atributos do solo e da *Crotalaria juncea* L em área severamente erodida. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.22, n.1, p.115-122, 1998.
- SANTOS, M.L.; CARVALHO, M.P.; RAPASSI, R.M.A.; MURAISHI, C.T.; MALLER, A.; MATOS, F.A. Correlação linear e espacial entre produtividade de milho e atributos físicos de um Latossolo Vermelho distroférico sob plantio direto do cerrado Brasileiro. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v.28, n.3, p.313-321, 2006.
- SCHLOTZHAVER, S.D.; LITTELL, R.C. **SAS: system for elementary statistical analysis**. 2.ed. Cary: SAS, 1997. 905p.
- SEVERIANO, E. C.; OLIVEIRA, G. C.; DIAS JUNIOR, M. S.; OLIVEIRA, L. F. C.; CASTRO, M. B. Pressão de preconsolidação e intervalo hídrico ótimo como indicadores de alterações estruturais do solo em decorrência das operações de colheita da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.4, p.1419-1427, 2008.
- SHINITZER, M. Soil organic matter: the next 75 years. **Soil Science**, Baltimore, v.151, p.41-58, 1991.
- SILVA, A.P., LIBARDI, P.L., VIEIRA, S.R. Variabilidade espacial da resistência à penetração de um Latossolo Vermelho-Escuro ao longo de uma transeção. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.13, n.1, p.1-5, 1989.
- SILVA, A.P.; KAY, B.D.; PERFECT, E. Characterization of the least limiting water range. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.58, n.6, p.1775-1781, 1994.
- 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, R. B. LANÇAS, K.P.; MIRANDA, E.E.V.; SILVA, F.A.M.; BAILO, F.H.R. Estimation and evaluation of dynamic properties as indicators of changes on soil structure in

sugarcane fields of Sao Paulo State – Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.103, n.2, p.265-270, 2009.

SILVA, R.B.; LANÇAS, K.P.; MIRANDA, E.E.V.; SILVA, F.A.M.; BAIO, F.H.R. Estimation and evaluation of dynamic properties as indicators of changes on soil structure in sugarcane fields of Sao Paulo State – Brazil. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.103, n.2, p.265-270, 2009.

SILVA, V.R.; REICHERT, J.M.; STORCK, L.; FEIJO, S. Variabilidade espacial das características químicas do solo e produtividade de milho em um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.27, n.6, p.1013-1020, 2003.

SILVA, V.R.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M. Susceptibilidade à compactação de um Latossolo Vermelho-Escuro e de um Podzólico Vermelho-Amarelo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.4, n.2, p.239-249, 2000.

SIQUEIRA, G.M.; VIEIRA, S.R.; CEDDIA, M.B. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo determinados por métodos diversos. **Bragantia**, Campinas, v.67, n.1, p.693-699, 2008.

SKJEMSTAD, J.O.; TAYLOR, J.A.; JANIK, L.J.; MARVANEK, S.P. Soil organic carbon dynamics under long-term sugarcane monoculture. **Australian Journal of Soil Research**, Victoria, v.37, p.151-164, 1999.

SMUCKER, A.J.M.; ERICKSON, A.E. Tillage and compactive modifications of gaseous flow and soil aeration. In: LARSON, W.E.; BLAKE, G.R.; ALLMARAS, R.R.; VOORHEES, W.B.; GUPTA, S.C. **Mechanics related process in structured agricultural soils**. The Netherlands: Kluwer Academic Publishers, 1989. p.205-221.

SNEDECOR, G.W.; COCHRAN, W.G. **Statistical methods**. 8. ed. Ames: Iowa State University Press, 1989. 503 p.

SOANE, B.D. The role of organic matter in soil compactability: a review of some practical aspects. **Soil and Tillage Research**, Amsterdam, v.16, n.1-2, p.179-201, 1990.

SOUZA, C.K.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. Influência do relevo na variação anisotrópica dos atributos químicos e granulométricos de um latossolo em Jaboticabal-SP. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.23, n.3, p.486-495, 2003.

SOUZA, G.S.; SOUZA, Z.M.; SILVA, R.B.; ARAUJO, F.S.; BARBOSA, R.S. Compressibilidade do solo e sistema radicular da cana-de-açúcar em manejo com e sem controle de tráfego. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*. v. 47, p. 603-612, 2012.

SOUZA, H.A.; VALENTE MARCELO, A.; CENTURION, J.F. Carbono orgânico e agregação de um Latossolo Vermelho com colheita mecanizada de cana-de-açúcar. **Revista Ciência Agronômica**, Fortaleza, v.43, n.4, p.658-663, 2012.

SOUZA, L.S.; COGO, N.P.; VIEIRA, S.R. Variabilidade de propriedades físicas e químicas do solo em um pomar cítrico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.21, n.3, p.367-372, 1997.

SOUZA, Z. M.; CERRI, D.G.P.; COLET, M.J.; RODRIGUES, L.H.A.; MAGALHÃES, P.S.G.; MANDONI, R.J.A. Análise dos atributos do solo e da produtividade da cultura de cana-de-açúcar com o uso da geoestatística e árvore de decisão. **Ciencia Rural**, Santa Maria, v.40, n.4, p. 840-847, 2010.

SOUZA, Z.M.; BEUTLER, A.N.; PRADO, R.M.; BENTO, M.J.C. Efeitos de sistemas de colheita de cana-de-açúcar nos atributos físicos de um Latossolo Vermelho. **Científica**, Jaboticabal, v.34, p.31-38, 2006c.

SOUZA, Z.M.; MARQUES JR, J.; PEREIRA, G.T.; SÁENZ, C.M.S. Spatial variability of aggregate stability in Latosols under sugarcane. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.33, n.2, p.245-254, 2009.

SOUZA, Z.M.; MARQUES JÚNIOR, J.; COOPER, M.; PEREIRA, G.T. Micromorfologia do solo e sua relação com atributos físicos e hídricos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.41, n.3, p.487-492, 2006a.

SOUZA, Z.M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial de atributos físicos do solo em diferentes formas do relevo sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.28, n.1, p.937-944, 2004b.

SOUZA, Z.M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial da estabilidade de agregados e matéria orgânica em solos de relevos diferentes. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.39, n.5, p.491-499, 2004c.

SOUZA, Z.M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T. Variabilidade espacial da textura de um Latossolo Vermelho eutroférico sob cultivo de cana-de-açúcar. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v.24, n.2, p.309-319, 2004d.

SOUZA, Z.M.; MARQUES JÚNIOR, J.; PEREIRA, G.T.; MONTANARI. Otimização amostral de atributos de latossolos considerando aspectos solo-relevo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.36, n.3, p.829-836, 2006b.

SOUZA, Z.M.; MARQUES JUNIOR, J.; PEREIRA, T.G.; BENTO, M.J.C. Variabilidade espacial de atributos físicos de um Latossolo Vermelho sob cultivo de cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.8, n.1, p.51-58, 2004a.

SOUZA, Z.M.; PRADO, R.M.; PAIXÃO, A.C.S.P.; CESARIN, L.G. Sistemas de colheita e manejo da palhada de cana-de-açúcar. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.40, n.3, p.271-278, 2005.

STOLF, R. Teoria e teste experimental de fórmulas de transformação dos dados de penetrômetro de impacto em resistência do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.15, n.3, p.229-235, 1991.

- STONE, L.F.; GUIMARÃES, C.M.; MOREIRA, A.A.J. Compactação do solo na cultura do feijoeiro. I: efeitos nas propriedades físico-hídricas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v.6, n.2, p.207-212, 2002.
- SUZUKI, L.E.A.S.; REINERT, D.J.; REICHERT, J.M.; LIMA, C.L.R. Estimativa da susceptibilidade à compactação e do suporte de carga do solo com base em propriedades físicas de solos do Rio Grande do Sul. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.32, n.3, p.963-973, 2009.
- TIMM, L.C.; PIRES, L.F.; ROVERATTI, R.; ARTHUR, R.C.J.; REICHARDT, K.; OLIVEIRA, J.C.M.; BACCHI, O.O.S. Field spatial and temporal patterns of soil water content and bulk density changes. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.63, n.1, p.55-64, 2006.
- TORMENA, C. A.; ARAÚJO, M. A.; FIDALSKI, J.; COSTA, J. M. Variação temporal do Intervalo Hídrico Ótimo de um Latossolo Vermelho distroférico sob sistemas de plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.31, n.2, p.211-219, 2007.
- TORMENA, C.A.; BARBOSA, 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. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v.59, n.4, p.795-801, 2002.
- TORMENA, C.A.; ROLOFF, G. Dinâmica da resistência à penetração de um solo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.20, n.2, p.333-339, 1996.
- TORMENA, C.A.; SILVA, A.P.; LIBARDI, P. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v.22, n.4, p.573-581, 1998.
- TRIVELIN, P.C.O.; RODRIGUÊS, J.C.S.; VICTORIA, R.L.; REICHARDT, K. Utilização por soqueira de cana-de-açúcar de início de safra do nitrogênio da aquamônia-15N e uréia-15N aplicado ao solo em complemento a vinhaça. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.31, n.1, p.89-99, 1996.
- UNIÃO DA INDÚSTRIA DE CANA-DE-AÇÚCAR. **Moagem da cana-de-açúcar e produção de açúcar e etanol**: safra 2011/2012. São Paulo, 2012.
- VANNI, S.M. **Modelos de regressão: estatística aplicada**. São Paulo: Legmar Informática & Editora, 1998. 177p.
- VASCONCELOS, R.F.B.; CANTALICE, J.R.B.; MOURA, G.B.A.; ROLIM, M.M.; MONTENEGRO, C.E.V. Compressibilidade de um Latossolo Amarelo distrocoeso não saturado sob diferentes sistemas de manejo da cana-de-açúcar. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.36, n.2, p.525-536, 2012.
- VENDRUSCULO, L.G. **Desenvolvimento de um sistema computacional para análise geoestatística**. Campinas, 2002. 87p. Dissertação (Mestrado) – Faculdade de Engenharia Agrícola, Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 2002.

VEZZANI , F.M. **Qualidade do sistema solo na produção agrícola**. Programa de Pós Graduação em Ciência do Solo - Tese (Doutorado), Faculdade de Agronomia , Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, 184 p. 2001.

VEZZANI, F.M.; MIELNICZUK, J. Agregação e estoque de carbono em Argissolo submetido a diferentes práticas de manejo agrícola. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.35, n.1, p.213-223, 2011.

VICENTE, T.F.S.; PEDROSA, E.M.R.; ROLIM, M.M.; OLIVEIRA, V.S.; OLIVEIRA, A.K.; SOUZA, A.M.P.L. Relações de atributos do solo e estabilidade de agregados em canaviais com e sem vinhaça. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, vol.16, n.11, pp. 1215-1222, 2012.

VIEIRA, M.J.; MUZILLI, O. Características físicas de um Latossolo Vermelho Escuro sob diferentes sistemas de manejo. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.19, n.7, p.873-882, 1984.

VIEIRA, S.R. Geoestatística em estudos de variabilidade espacial do solo. In: NOVAIS, P.F.; ALVAREZ, V.H.; SCHAEFER, C.E.G.R. **Tópicos em ciência do solo**, Viçosa: SBCS, v.1. p.1-54, 2000.

VIEIRA, S.R.; DECHEN, S.C.F.; SIQUEIRA, G.M.; DUFRANC, G. Variabilidade espacial de atributos físicos e químicos relacionados com o estado de agregação de dois latossolos cultivados no sistema de semeadura direta. **Bragantia**, Campinas, v.70, n.1, p.185-195, 2011.

VIEIRA, S.R.; TILLOTSON, P.M.; BIGGAR, J.W.; NIELSEN, D.R. Scaling of semivariograms and the kriging estimation of field-measured properties. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v.21, n.4, p.525-533, 1997.

WARRICK, A.W.; NIELSEN, D.R. Spatial variability of soil physical properties in the field. In: HILLEL, D. (ed.). **Applications of soil physics**. New York: Academic, 1980. Cap. 2, p.319-344.

ZHANG, H.; HARTGE, K.H.; RINGE, H. Effectiveness of organic matter incorporation in reducing soil compactability. **Soil Science Society of America Journal**, Madison, v.61, n.2, p.239-245, 1997.

7. APENDICE



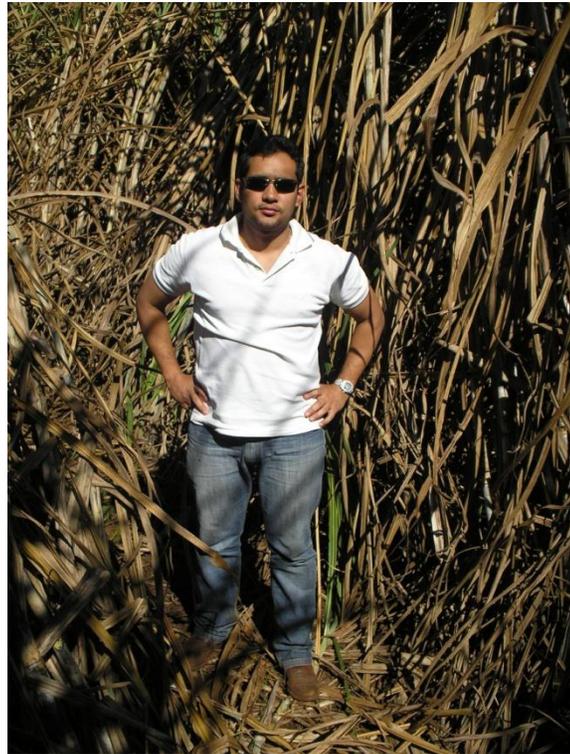
Área antes da colheita



Área com vegetação preservada



Área posterior à colheita mecanizada



Colheita manual para mapa de produtividade



Detalhe colheita mecanizada



Coleta de solo

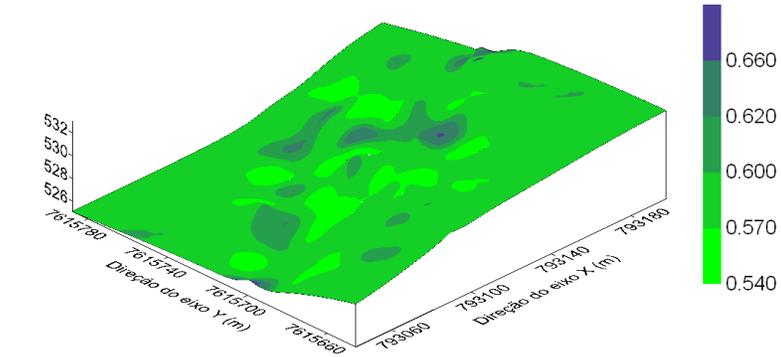


Coleta de solo

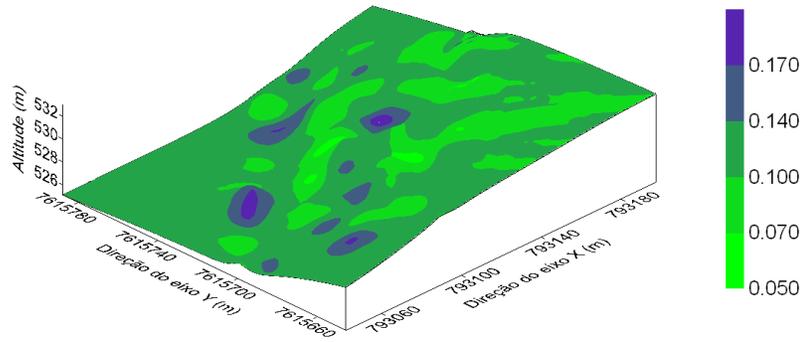


Regionalização dos pontos

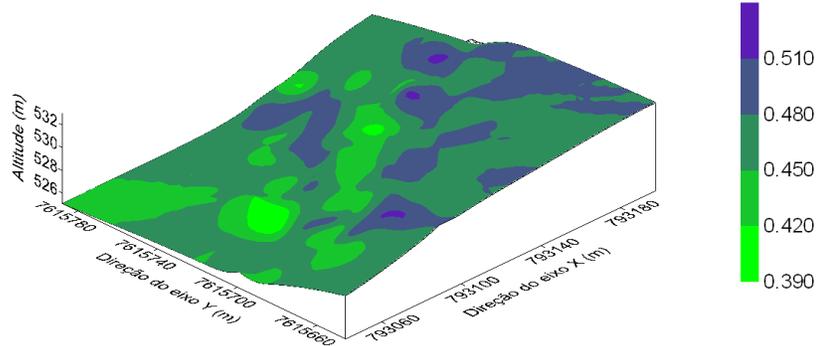
Porosidade Total (0,00 a 0,10 m)



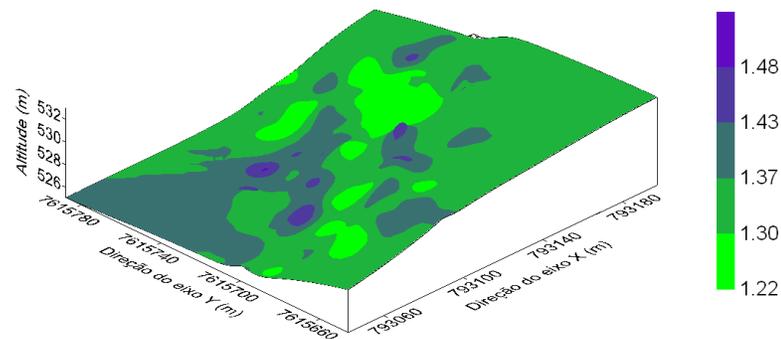
Macroporosidade (0,00 a 0,10 m)



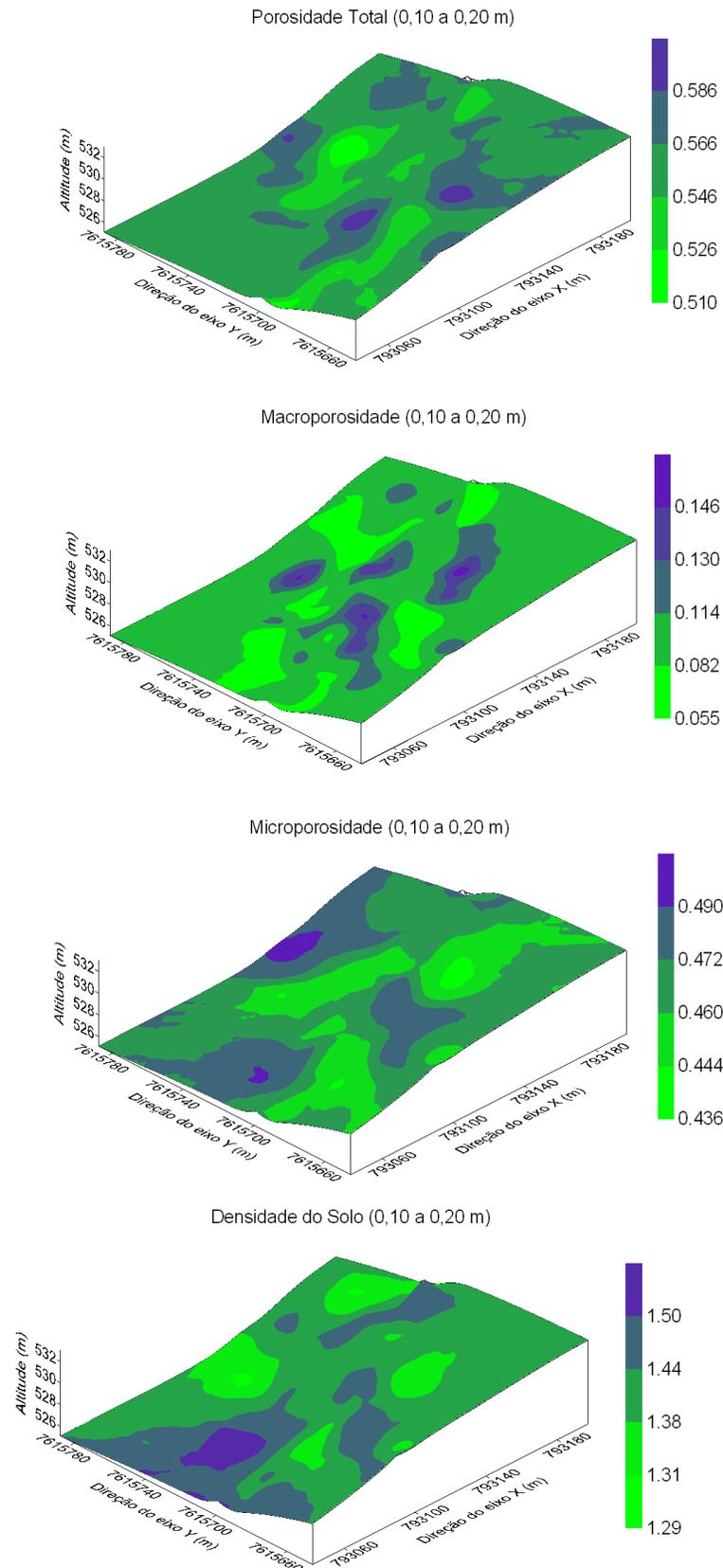
Microporosidade (0,00 a 0,10 m)



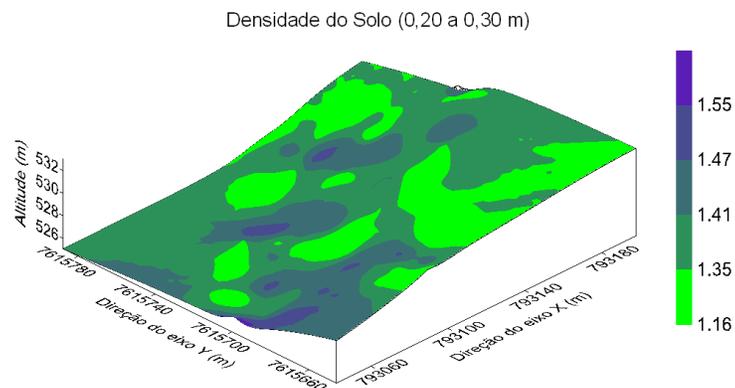
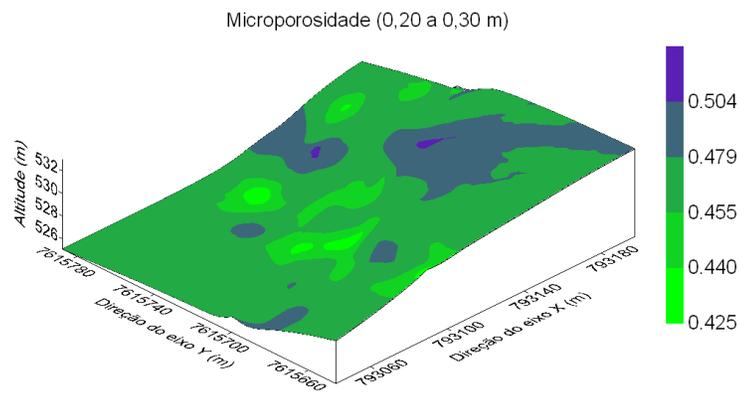
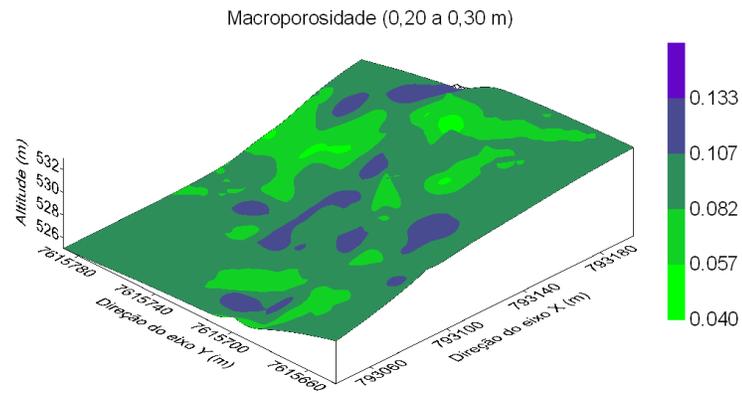
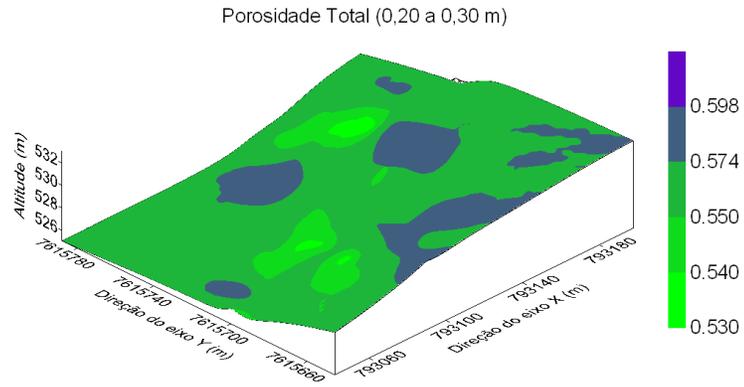
Densidade do Solo (0,0 a 0,10 m)



Mapas Temáticos, de atributos do solo em área sob colheita manual.



Mapas Temáticos, de atributos do solo em área sob colheita manual.



Mapas Temáticos, de atributos do solo em área sob colheita manual.