

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CÂMPUS DE BOTUCATU**

**PROPRIEDADES FÍSICAS DE UM LATOSSOLO VERMELHO  
MANEJADO COM MATERIAL ORGÂNICO E SUBMETIDO À  
COMPACTAÇÃO**

**ANGELA BILLAR DE ALMEIDA**

Dissertação apresentada à Faculdade de  
Ciências Agronômicas da UNESP - Câmpus  
de Botucatu, para obtenção do título de  
Mestre em Agronomia (Agricultura)

**BOTUCATU - SP**

setembro- 2009

UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA “JÚLIO DE MESQUITA FILHO”  
FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS  
CÂMPUS DE BOTUCATU

**PROPRIEDADES FÍSICAS DE UM LATOSSOLO VERMELHO  
MANEJADO COM MATERIAL ORGÂNICO E SUBMETIDO À  
COMPACTAÇÃO**

**ANGELA BILLAR DE ALMEIDA**

Orientadora: Prof<sup>a</sup> Dr<sup>a</sup> Maria Helena Moraes

Dissertação apresentada à Faculdade de  
Ciências Agronômicas da UNESP - Câmpus  
de Botucatu, para obtenção do título de  
Mestre em Agronomia (Agricultura)

BOTUCATU-SP

setembro- 2009

FICHA CATALOGRÁFICA ELABORADA PELA SEÇÃO TÉCNICA DE AQUISIÇÃO E TRATAMENTO DA INFORMAÇÃO - SERVIÇO TÉCNICO DE BIBLIOTECA E DOCUMENTAÇÃO - UNESP - FCA - LAGEADO - BOTUCATU (SP)

A447p Almeida, Angela Billar, 1983-  
Propriedades físicas de um latossolo vermelho manejado com material orgânico e submetido à compactação / Angela Billar de Almeida. - Botucatu : [s.n.], 2009.  
xiv, 111 f. : il., fots. color. grafs.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Estadual Paulista, Faculdade de Ciências Agronômicas, Botucatu, 2009  
Orientador: Maria Helena Moraes  
Inclui bibliografia.

1. Densidade do solo. 2. Porosidade. 3. Resistência à penetração. 4. Condutividade hidráulica. 5. Análise por imagens. I. Moraes, Maria Helena. II. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Campus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agronômicas. III. Título.

**UNIVERSIDADE ESTADUAL PAULISTA "JÚLIO DE MESQUITA FILHO"**  
**FACULDADE DE CIÊNCIAS AGRONÔMICAS**  
**CAMPUS DE BOTUCATU**

**CERTIFICADO DE APROVAÇÃO**

**TÍTULO: "PROPRIEDADES FÍSICAS DE UM LATOSSOLO VERMELHO MANEJADO  
COM MATERIAL ORGÂNICO E SUBMETIDO À COMPACTAÇÃO"**

ALUNA: ANGELA BILLAR DE ALMEIDA

ORIENTADORA: PROFª DRª MARIA HELENA MORAES

Aprovado pela Comissão Examinadora

*M. Helena Moraes*

PROFª DRª MARIA HELENA MORAES

*Celia R. P. Bueno*

PROFª DRª CELIA REGINA PAES BUENO

*Ana Maria Conte e Castro*

PROFª DRª ANA MARIA CONTE E CASTRO

Data da Realização: 04 de setembro de 2009.

Aos meus pais Paulo Roque (em memória) e Maria Ida, aos meus irmãos Camila e Rafael e as minhas sobrinhas Fernanda e Gabriela.

DEDICO E OFEREÇO

## AGRADECIMENTOS

Aos meus pais Paulo Roque (em memória) e Maria Ida pela dedicação e amor e por me proporcionarem uma educação de qualidade a qual colaborou para chegar até aqui.

Aos meus irmãos Camila e Rafael, minhas sobrinhas Fernanda e Gabriela, meu namorado Murilo e meu cunhado Fernando que estiveram presentes no decorrer de toda essa caminhada, com apoio, incentivo e amor.

À Profa Dra Luciana Seyki por acreditar em mim.

Às minhas amigas Thaís Helena e Mariana pelo incentivo, amizade e companheirismo.

À Universidade Estadual Paulista “Júlio de Mesquita Filho”, especialmente ao Departamento de Agricultura, pela oportunidade de realização do curso e o Departamento de Recursos Naturais - Ciência do Solo.

À professora Maria Helena Moraes, pelas valiosas transmissões de conhecimento, incentivo, apoio, motivação, oportunidades, sugestões, por acreditar no meu trabalho e, sobretudo, pela amizade.

Ao Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq) pela concessão da bolsa de estudos.

Aos funcionários do Departamento de Recursos Naturais - Ciência do Solo, sobretudo, ao Hélio, Sônia, Sylvia, Roberto e Selma pela colaboração nos momentos necessários e nas atividades desenvolvidas e, sobretudo, pela amizade.

Ao professor Miguel Cooper da Escola Superior de Agricultura “Luis de Queiroz” (ESALQ), pela disponibilidade do laboratório de micromorfologia, e colaboração na realização de alguns resultados.

Aos colegas e amigos Fernanda Gonçalves e Suenon Furtado, pelas sugestões, conselhos, companheirismo e auxílio nas atividades realizadas.

Às estagiárias Camila e Najai pelo auxílio na condução do experimento.

Aos amigos Tainara, Tassiana, Marísia, Luiz Victor, Bruna por estarem comigo tanto nas horas de alegria, quanto nas horas de dificuldades.

Aos amigos da pós-graduação pelos conselhos, dicas e pela amizade.

E por fim a todos que, de uma forma ou de outra, me apoiaram e incentivaram no decorrer desses anos e contribuíram para a realização deste trabalho, meus mais sinceros agradecimentos.

## SUMÁRIO

	Página
LISTA DE FIGURAS .....	VIII
LISTA DE TABELAS .....	XII
RESUMO .....	2
SUMMARY .....	4
1 INTRODUÇÃO .....	6
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	9
2.1 O solo e sua importância .....	9
2.2 Estrutura e porosidade do solo .....	10
2.3 Densidade do solo e resistência à penetração .....	13
2.4 Condutividade hidráulica .....	14
2.5 Compactação e seus efeitos .....	15
2.5.1 Efeito na densidade do solo .....	18
2.5.2 Efeitos na porosidade .....	19
2.5.3 Efeitos na resistência do solo à penetração.... ..	21
2.5.4 Efeitos na condutividade hidráulica .....	23
2.5.5 Outros efeitos da compactação .....	24
2.6 O uso de matéria orgânica para minimizar a compactação do solo .....	26
2.7 O uso da análise de imagem para avaliação da compactação do solo .....	30
3 MATERIAL E MÉTODOS .....	35
3.1 Material .....	35
3.1.1 Solos .....	35
3.1.2 Material orgânico .....	36

3.1.3	Aparelho de Proctor .....	36
3.1.4	Prensa hidráulica e anéis de PVC .....	37
3.1.5	Impregnação da resina e análise de imagens .....	38
3.2	Permeâmetro de carga variável .....	39
3.2.1	Penetrômetro eletrônico .....	40
3.3	Métodos .....	40
3.3.1	Experimento e delineamento experimental .....	40
3.3.2	Coleta e preparo das amostras de solo .....	41
3.3.3	Curva de densidade do solo versus o teor de água .....	41
3.3.4	Compactação das amostras de solo .....	42
3.3.5	Impregnação das amostras com resina .....	42
3.3.6	Determinação das propriedades físicas do solo .....	43
3.3.6.1	Determinação da densidade do solo .....	43
3.3.6.2	Determinação da porosidade do solo .....	43
3.3.6.3	Determinação da condutividade hidráulica .....	46
3.3.6.4	Determinação da resistência à penetração .....	46
3.3.7	Análises estatísticas .....	47
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO .....	48
4.1	Densidade do solo .....	48
4.2	Porosidade total .....	52
4.3	Macroporosidade .....	56
4.4	Microporosidade .....	61
4.5	Condutividade hidráulica .....	64
4.6	Resistência à penetração .....	68

4.7 Análise de imagens .....	74
5 CONCLUSÃO .....	95
6 REFERÊNCIAS .....	96

## LISTA DE FIGURAS

		Página
Figura 1	Componentes do aparelho de Proctor .....	37
Figura 2	Prensa hidráulica utilizada para a realização das compactações e suporte de aço para a acomodação dos tubos de PVC .....	38
Figura 3	Bomba de vácuo (A) e dissecador (B) utilizados na impregnação das amostras .....	39
Figura 4	Permeâmetro de carga variável .....	39
Figura 5	Penetrômetro eletrônico .....	40
Figura 6	Curva de densidade do solo versus o teor de água .....	41
Figura 7	Mesa de Tensão (A) e amostras compactadas de solo da mesa de tensão (B)	44
Figura 8	Variação da densidade do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ ), em função da intensidade de compactação, para as diferentes doses de serragem (A) e Biomix <sup>®</sup> (B) .....	50
Figura 9	Variação da densidade do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ ), em função das doses de serragem (A) e Biomix <sup>®</sup> (B) nas diferentes intensidades de compactação .....	51
Figura 10	Variação da porosidade total (%), em função da intensidade de compactação, nas diferentes doses de serragem (A) e Biomix <sup>®</sup> (B) .....	54
Figura 11	Variação da porosidade total (%), em função das doses de serragem (A) e Biomix <sup>®</sup> (B) nas diferentes intensidades de compactação .....	55
Figura 12	Variação da macroporosidade (%), em função da intensidade de compactação, nas diferentes doses de serragem (A) e Biomix <sup>®</sup> (B) .....	58
Figura 13	Variação da macroporosidade (%), em função das doses de serragem (A) e Biomix <sup>®</sup> (B) nas diferentes intensidades de compactação .....	59
Figura 14	Variação da microporosidade (%), em função da intensidade de compactação, nas diferentes doses de serragem (A) e Biomix <sup>®</sup> (B) .....	62
Figura 15	Variação da microporosidade (%), em função das doses de serragem (A) e Biomix <sup>®</sup> (B) nas diferentes intensidades de compactação .....	64
Figura 16	Variação da condutividade hidráulica ( $\text{cm s}^{-1}$ ), em função da intensidade de	

	compactação, nas diferentes doses de serragem (A) e Biomix <sup>®</sup> (B) .....	67
Figura 17	Variação da condutividade hidráulica ( $\text{cm s}^{-1}$ ), em função das doses de serragem (A) e Biomix <sup>®</sup> (B) nas diferentes intensidades de compactação ....	67
Figura 18	Variação da resistência à penetração (MPa) nas diferentes intensidades de compactação dentro de uma mesma dose de serragem .....	70
Figura 19	Variação da resistência à penetração (MPa) nas diferentes doses de serragem dentro de uma mesma intensidade de compactação .....	71
Figura 20	Variação da resistência à penetração (MPa) nas diferentes intensidades de compactação nos tratamentos com adição de Biomix <sup>®</sup> .....	73
Figura 21	Variação da resistência à penetração (MPa) nas diferentes doses para os tratamentos com adição de Biomix <sup>®</sup> .....	73
Figura 22	Imagens binarizadas (porosidade em branco e fase sólida em preto) das intensidades de compactação 1 (A) e 2 (B) no tratamento sem composto orgânico. Detalhamento da porosidade quanto ao tamanho ( $A_1$ e $B_1$ ) e quanto a forma ( $A_2$ e $B_2$ ) .....	76
Figura 23	Imagens binarizadas (porosidade em branco e fase sólida em preto) das intensidades de compactação 3 (A) e 4 (B) no tratamento sem composto orgânico. Detalhamento da porosidade quanto ao tamanho ( $A_1$ e $B_1$ ) e quanto a forma ( $A_2$ e $B_2$ ) .....	77
Figura 24	Imagens binarizadas (porosidade em branco e fase sólida em preto) das intensidades de compactação 1 (A) e 2 (B) no tratamento com $30 \text{ t ha}^{-1}$ de serragem. Detalhamento da porosidade quanto ao tamanho ( $A_1$ e $B_1$ ) e quanto a forma ( $A_2$ e $B_2$ ) .....	79
Figura 25	Imagens binarizadas (porosidade em branco e fase sólida em preto) das intensidades de compactação 3 (A) e 4 (B) no tratamento com $30 \text{ t ha}^{-1}$ de serragem. Detalhamento da porosidade quanto ao tamanho ( $A_1$ e $B_1$ ) e quanto a forma ( $A_2$ e $B_2$ ) .....	80
Figura 26	Imagens binarizadas (porosidade em branco e fase sólida em preto) das intensidades de compactação 1 (A) e 2 (B) no tratamento com $50 \text{ t ha}^{-1}$ de	

	serragem. Detalhamento da porosidade quanto ao tamanho ( $A_1$ e $B_1$ ) e quanto a forma ( $A_2$ e $B_2$ ) .....	82
Figura 27	Imagens binarizadas (porosidade em branco e fase sólida em preto) das intensidades de compactação 3 (A) e 4 (B) no tratamento com $50 \text{ t ha}^{-1}$ de serragem. Detalhamento da porosidade quanto ao tamanho ( $A_1$ e $B_1$ ) e quanto a forma ( $A_2$ e $B_2$ ) .....	83
Figura 28	Imagens binarizadas (porosidade em branco e fase sólida em preto) das intensidades de compactação 1 (A) e 2 (B) no tratamento com $80 \text{ t ha}^{-1}$ de serragem. Detalhamento da porosidade quanto ao tamanho ( $A_1$ e $B_1$ ) e quanto a forma ( $A_2$ e $B_2$ ) .....	84
Figura 29	Imagens binarizadas (porosidade em branco e fase sólida em preto) das intensidades de compactação 3 (A) e 4 (B) no tratamento com $80 \text{ t ha}^{-1}$ de serragem. Detalhamento da porosidade quanto ao tamanho ( $A_1$ e $B_1$ ) e quanto à forma ( $A_2$ e $B_2$ ) .....	85
Figura 30	Imagens binarizadas (porosidade em branco e fase sólida em preto) das intensidades de compactação 1 (A) e 2 (B) no tratamento com $30 \text{ t ha}^{-1}$ de BIOMIX <sup>®</sup> . Detalhamento da porosidade quanto ao tamanho ( $A_1$ e $B_1$ ) e quanto a forma ( $A_2$ e $B_2$ ) .....	87
Figura 31	Imagens binarizadas (porosidade em branco e fase sólida em preto) das intensidades de compactação 3 (A) e 4 (B) no tratamento com $30 \text{ t ha}^{-1}$ de BIOMIX <sup>®</sup> . Detalhamento da porosidade quanto ao tamanho ( $A_1$ e $B_1$ ) e quanto a forma ( $A_2$ e $B_2$ ) .....	88
Figura 32	Imagens binarizadas (porosidade em branco e fase sólida em preto) das intensidades de compactação 1 (A) e 2 (B) no tratamento com $50 \text{ t ha}^{-1}$ de BIOMIX <sup>®</sup> . Detalhamento da porosidade quanto ao tamanho ( $A_1$ e $B_1$ ) e quanto a forma ( $A_2$ e $B_2$ ) .....	90
Figura 33	Imagens binarizadas (porosidade em branco e fase sólida em preto) das intensidades de compactação 3 (A) e 4 (B) no tratamento com $50 \text{ t ha}^{-1}$ de BIOMIX <sup>®</sup> . Detalhamento da porosidade quanto ao tamanho ( $A_1$ e $B_1$ ) e quanto a forma ( $A_2$ e $B_2$ ) .....	91

- Figura 34 Imagens binarizadas (porosidade em branco e fase sólida em preto) das intensidades de compactação 1 (A) e 2 (B) no tratamento com 80 t ha<sup>-1</sup> de BIOMIX<sup>®</sup>. Detalhamento da porosidade quanto ao tamanho (A<sub>1</sub> e B<sub>1</sub>) e quanto a forma (A<sub>2</sub> e B<sub>2</sub>) ..... 92
- Figura 35 Imagens binarizadas (porosidade em branco e fase sólida em preto) das intensidades de compactação 3 (A) e 4 (B) no tratamento com 80 t ha<sup>-1</sup> de BIOMIX<sup>®</sup>. Detalhamento da porosidade quanto ao tamanho (A<sub>1</sub> e B<sub>1</sub>) e quanto a forma (A<sub>2</sub> e B<sub>2</sub>) ..... 93

## LISTA DE TABELAS

		Página
Tabela 1	Caracterização granulométrica do solo na camada de 0-20 cm.....	35
Tabela 2	Caracterização granulométrica dos materiais orgânicos.....	36
Tabela 3	Análise de variância para os valores de densidade do solo.....	48
Tabela 4	Resultados da análise de densidade do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ ), referente às amostras manejadas com diferentes doses dos materiais orgânicos e submetidas às diferentes intensidades de compactação.....	49
Tabela 5	Modelos ajustados da densidade do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ ) para a variação entre as intensidades de compactação dentro de uma mesma dose.....	51
Tabela 6	Modelos ajustados da densidade do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ ) na variação entre as doses dentro de uma mesma intensidade de compactação.....	52
Tabela 7	Análise de variância para os valores de porosidade total.....	53
Tabela 8	Resultados da análise da porosidade total (%), referente às amostras manejadas com diferentes doses dos materiais orgânicos e submetidas às diferentes intensidades de compactação.....	54
Tabela 9	Modelos ajustados da porosidade total (%) na variação entre as intensidades de compactação dentro de uma mesma dose.....	55
Tabela 10	Modelos ajustados da porosidade total (%) para a variação entre as doses dentro de uma mesma intensidade de compactação.....	56
Tabela 11	Análise de variância para os valores de macroporosidade.....	57
Tabela 12	Resultados da análise da macroporosidade (%), referente às amostras manejadas com diferentes doses dos materiais orgânicos e submetidas às diferentes intensidades de compactação.....	58
Tabela 13	Modelos ajustados da macroporosidade (%) na variação entre as intensidades de compactação dentro de uma mesma dose.....	59

Tabela 14	Modelos ajustados da macroporosidade (%) para a variação entre as doses dentro de uma mesma intensidade de compactação.....	60
Tabela 15	Análise de variância para os valores de microporosidade.....	61
Tabela 16	Resultados da análise da microporosidade (%), referente às amostras manejadas com diferentes doses dos materiais orgânicos e submetidas às diferentes intensidades de compactação.....	62
Tabela 17	Modelos ajustados da microporosidade (%) para a variação entre as intensidades de compactação dentro de uma mesma dose.....	63
Tabela 18	Modelos ajustados da microporosidade (%) para a variação entre as doses dentro de uma mesma intensidade de compactação.....	64
Tabela 19	Análise de variância para os valores de condutividade hidráulica.....	65
Tabela 20	Resultados da análise da condutividade hidráulica ( $\text{cm s}^{-1}$ ), referente às amostras manejadas com diferentes doses dos materiais orgânicos e submetidas às diferentes intensidades de compactação.....	66
Tabela 21	Modelos ajustados da condutividade hidráulica ( $\text{cm s}^{-1}$ ) para a variação entre as intensidades de compactação dentro de uma mesma dose.....	67
Tabela 22	Modelos ajustados da condutividade hidráulica ( $\text{cm s}^{-1}$ ) na variação entre as doses dentro de uma mesma intensidade de compactação.....	68
Tabela 23	Análise de variância para os valores de resistência à penetração.....	69
Tabela 24	Resultados da análise de resistência à penetração (MPa), referentes às amostras submetidas às diferentes intensidades de compactação e manejadas com diferentes doses de serragem.....	69
Tabela 25	Modelos ajustados para resistência à penetração (MPa), na variação entre as intensidades de compactação dentro de uma mesma dose de serragem.....	71
Tabela 26	Modelos ajustados da resistência à penetração (MPa), para a variação entre dose de serragem dentro de uma mesma intensidade de compactação.....	72

Tabela 27	Resultados da análise de resistência à penetração (MPa), referentes às amostras submetidas às diferentes intensidades de compactação ou manejadas com diferentes doses de Biomix <sup>®</sup> .....	73
Tabela 28	Resultados da análise de porosidade do solo (%), referentes às amostras manejadas com diferentes doses dos materiais orgânicos e submetidas às diferentes intensidades de compactação.....	74

## RESUMO

As propriedades físicas dos solos agricultáveis vêm sofrendo grandes modificações, sendo a compactação apontada como a principal causa destas mudanças em virtude do tráfego máquinas e uso inadequado de equipamentos agrícolas. A compactação ocorre principalmente em solos úmidos, pois a água age como agente lubrificante, melhorando o arranjo entre as partículas. Por isso a importância da adição de matéria orgânica ao solo, já que esta possui um alto poder de adsorção de água, minimizando os efeitos ocasionados pela compactação. O trabalho foi desenvolvido com o objetivo de avaliar a eficiência da utilização de materiais orgânicos em algumas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho submetido à compactação, por análises de imagens e de rotina. O experimento foi conduzido em laboratório no Departamento de Recursos Naturais - Ciência do Solo, na Faculdade de Ciências Agrônomicas – UNESP, em Botucatu-SP. O delineamento adotado foi o inteiramente casualizado, constituído por 32 tratamentos, em esquema fatorial duplo 4x4, sendo, para cada material orgânico (serragem e BIOMIX<sup>®</sup>), quatro intensidades de compactação e quatro doses dos materiais (0, 30, 50 e 80 t ha<sup>-1</sup>), com quatro repetições. Amostras deformadas foram coletadas na camada de 0 a 20 cm de um Latossolo Vermelho distroférico textura argilosa sob vegetação de mata. A umidade de máxima compactação do solo foi obtida pelo ensaio de Proctor Normal. As amostras de solo foram peneiradas, misturadas às doses dos materiais orgânicos, mantidas em repouso por 30 dias, novamente peneiradas e o conteúdo de água corrigido para 27%. Subamostras foram colocadas em tubos de PVC e compactadas com o auxílio de uma prensa hidráulica, a fim de atingir as intensidades de compactação desejadas. As propriedades físicas avaliadas foram a densidade do solo, a porosidade total, a

macroporosidade, a microporosidade, a resistência do solo à penetração e a condutividade hidráulica. Para a avaliação dos efeitos da compactação nos macroporos, além do método de rotina, foi utilizado um método complementar que baseia-se na análise de imagens adquiridas de amostras impregnadas com resina e polidas. As imagens obtidas com câmera digital foram processadas no programa Visilog 5.4. A análise estatística foi realizada no programa Sisvar versão 4.6 (2003), obtendo-se a análise de variância e de regressão e o teste de comparação de médias (Tukey), para o efeito das diferentes doses e diferentes intensidades de compactação e a interação entre elas. As comparações de médias foram realizadas utilizando-se o teste F a 5%. O processo compactação altera negativamente a densidade do solo, a resistência do solo à penetração, a porosidade total, a macroporosidade e condutividade hidráulica. A adição de matéria orgânica melhora as propriedades físicas do solo, sendo capaz de minimizar os efeitos ocasionados pela compactação. A dose de 30 t.ha<sup>-1</sup> de material orgânico é suficiente para diminuir os efeitos nocivos da compactação na densidade do solo, porosidade total, a macroporosidade e a resistência do solo à penetração. A análise de imagens permite a identificação de alterações na porosidade do solo ocasionadas pela compactação principalmente quanto ao tipo de poros e quanto ao tamanho dos mesmos. A compactação ocasiona redução de poros grandes e complexos, e aumento de poros pequenos e arredondados. Solos nas doses de 50 t.ha<sup>-1</sup> e 80 t.ha<sup>-1</sup> de BIOMIX<sup>®</sup> apresentam melhoria na conectividade entre poros e aumento de poros complexos.

---

Palavras-chave: densidade do solo, porosidade, resistência à penetração, condutividade hidráulica, análise de imagens.

## **PHYSICAL PROPERTIES OF A RED LATOSOL MANAGED WITH ORGANIC MATERIAL AND SUBMITTED TO COMPACTION**

Dissertação (Mestrado em Agronomia/Agricultura) – Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista.

Author: ANGELA BILLAR DE ALMEIDA

Adviser: MARIA HELENA MORAES

### **SUMMARY**

Compaction is a process that changes negatively the soil physical properties and occurs mainly due to intensive use of machinery and implements for agricultural activities. The addition of organic matter in soil is of great importance to minimize this process by increasing the water demand for the soil reaches the optimum moisture content for compaction. To evaluate the change in physical properties of a soil submitted to compaction, when managed with organic material, an experiment was conducted in the laboratory of the Natural Resources Department - Soil Science, FCA/UNESP, Botucatu-SP, assessed by routine and image analysis. The experimental design was completely randomized design, consisting of 32 treatments in a factorial 4x4 double, and, for each organic material (sawdust and BIOMIX®) four compaction levels and four doses of the materials (0, 30, 50 and 80 t. ha<sup>-1</sup>), with four replications. Deformed samples were collected from a clayey Oxisol under forest in the layer from 0 to 20 cm. The moisture for maximum soil compaction was obtained using the Standard Proctor test. Soil samples were sieved, mixed with doses of organic materials, incubated for 30 days, sieved again and the water content adjusted to 27%. Sub samples were put in PVC tubes and compressed with the aid of a hydraulic press in order to obtain the desired compaction levels. The physical properties evaluated were soil bulk density, porosity, macroporosity, microporosity, soil penetration resistance and hydraulic

conductivity. In addition to the routine method, the evaluation of the compaction effects on macroporosity was done by image analysis acquired from samples after the resin impregnation in the soil samples. The images taken with digital camera were processed in the Visilog 5.4. Statistical analysis was performed using Sisvar version 4.6 (2003), resulting in the analysis of variance and regression test and mean comparison (Tukey) for the effect of different doses and different compaction levels and the interaction between them. Comparisons of means were performed using the F test at 5%. The compaction process negatively alters soil density, soil resistance to penetration, the total porosity, macroporosity and hydraulic conductivity. The addition of organic matter improves soil physical properties and minimizes the effects caused by compaction. The dose of  $30 \text{ t ha}^{-1}$  of organic material is sufficient to reduce the negative effects of compaction on soil physical properties. The image analysis allows the identification of changes in soil porosity resulting from compaction, especially on the type and size of pores. The compaction causes reduction of large pores and complex, and increase of small pores and rounded. Soils at doses of  $50 \text{ t ha}^{-1}$  and  $80 \text{ t ha}^{-1}$  of BIOMIX<sup>®</sup> have improved connectivity between pores and increase pore complex.

---

Keywords: soil density, porosity, penetration resistance, hydraulic conductivity, image analysis.

## 1 INTRODUÇÃO

O solo é um dos principais suportes da produção agrícola, constituído pelas fases sólida, líquida e gasosa, que interagem entre si e tendem ao equilíbrio dinâmico. A fase sólida é formada por material mineral e orgânico, a fase líquida e a gasosa, respectivamente, pela solução e pelo ar do solo, que ocupam os poros existentes entre as partículas sólidas. Em estado natural as fases do solo são encontradas em proporção adequada para o desenvolvimento vegetal, entretanto, à medida que o solo é submetido ao uso agrícola, essa proporção se modifica, alterando, portanto, as características físicas do solo.

A estrutura é a principal propriedade física do solo modificada pelo cultivo, pois o uso do solo influencia a agregação de suas partículas e o conteúdo de matéria orgânica, constituinte que, juntamente com os minerais de argila e os óxidos de ferro e alumínio, age como agente cimentante das partículas do solo. Modificações na agregação do solo ocasionam alterações em outras das suas características, como a densidade do solo, a porosidade, a resistência do solo à penetração das raízes e, portanto, na aeração do solo, na infiltração, na drenagem, na condutividade hidráulica, entre outras.

Um processo bastante relatado, responsável pela desestruturação do solo e por isso desfavorável a qualidade do mesmo, é a compactação. Esse processo ocorre quando a pressão exercida sobre o solo excede sua capacidade de suportar carga, ocasionando quebra de agregados e reorganização das partículas de forma mais densa.

A compactação pode ter origens diversas, porém suas principais causas são o trânsito de máquinas e veículos durante o cultivo e o uso inadequado de equipamentos

agrícolas. Com a modernização nas atividades agrícolas, que intensificou a mecanização na agricultura, a compactação do solo passou a constituir um tema de grande importância.

De forma geral, a compactação é uma reorganização das partículas do solo, que ocasiona diminuição do volume e, portanto, da porosidade, principalmente, da macroporosidade, aumentando a densidade e a resistência mecânica ao crescimento das raízes. Devido a essas alterações o solo sofrerá modificações na aeração, na infiltração, na drenagem, na disponibilidade de água, no teor de oxigênio e de nutrientes, podendo prejudicar o crescimento e o desenvolvimento de raízes e da parte aérea das plantas, além de ocasionar redução na produção das culturas. Outro dano decorrente da compactação é a erosão do solo, que resulta na perda de constituintes do mesmo.

A matéria orgânica é capaz de minimizar os efeitos ocasionados pela compactação do solo e melhorar suas propriedades físicas, principalmente, por afetar a estruturação do solo. Como é um agente cimentante, a matéria orgânica ocasiona melhor agregação das partículas do solo que, por consequência, pode diminuir a densidade e a resistência à penetração, além de melhorar a porosidade, proporcionando melhor continuidade e aumento no tamanho dos poros. Outra característica importante da matéria orgânica é a capacidade de adsorção de água, uma vez que maiores quantidades de água existentes no solo possibilitam uma maior compactação, pois esta serve como um lubrificante para um melhor arranjo das partículas do solo. Portanto, a adição de compostos orgânicos ao solo pode ser considerada como uma alternativa para melhorar sua qualidade, além de ser um destino adequado para resíduos provenientes da agroindústria.

A compactação é um processo nocivo ao solo que se reflete no desenvolvimento das culturas, por isso a necessidade de um acompanhamento rotineiro e prático das mudanças ocorridas no solo, possibilitando a prevenção de danos futuros. Métodos complementares para avaliação das propriedades físicas do solo estão se tornando cada vez mais necessários e mais facilmente disponíveis, principalmente, pelo maior número de equipamentos disponíveis.

Como a macroporosidade é uma das propriedades mais afetadas pela compactação do solo, seu estudo é de fundamental importância. Um dos métodos complementares utilizados para o estudo deste parâmetro é a análise de imagens, obtidas a partir de blocos resinados e polidos. As técnicas de processamento e análise digital de imagens

são capazes de fornecer resultados do espaço poroso do solo com precisão, além de possibilitar a visualização das alterações estruturais causadas pela compactação e pelo adensamento.

Considerando a importância do assunto abordado desenvolveu-se o presente trabalho com o objetivo de avaliar a eficiência da utilização de materiais orgânicos em algumas propriedades físicas de um Latossolo Vermelho submetido à compactação, por análises de imagens e de rotina.

## **2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA**

### **2.1 O solo e sua importância**

A preocupação com a utilização racional da terra tem proporcionado ao homem estabelecer um conceito sobre o que seja realmente solo e de como ele poderá ser melhor utilizado (VIEIRA; SANTOS, 1987). Segundo Reichardt e Timm (2004), o termo solo refere-se à camada externa e agricultável da superfície terrestre, o qual é originado da rocha que, por ação de processos físicos, químicos e biológicos de desintegração, decomposição e recombinação, se transformou no decorrer das eras geológicas, em material poroso de características peculiares. Para Vieira; Santos (1987) e Bertoni; Lombardi Neto (1990) o solo é uma coleção de corpos naturais da superfície da terra que ocorre em locais alterados ou não pelo homem, contendo material vivo e capaz de suportar as plantas. Outro conceito é dado por Duruoha (2000), que afirma que o solo é um dos principais suportes da produção agrícola, sendo constituído por um complexo conjunto de fatores físicos, químicos e biológicos, submetidos à ação do clima, que interagem e tendem ao equilíbrio dinâmico.

Do ponto de vista pedológico o solo é considerado um sistema disperso, constituído de três fases: sólida, líquida e gasosa (COSTA, 1979; KIEHL, 1979; JORGE, 1985). Para os propósitos da física do solo, este pode ser assumido como um sistema multicomponente, integrado pelas suas fases (PREVEDELLO, 1996). A parte sólida do solo contém o material mineral (LEPSCH, 2002) e orgânico, já a fase líquida é constituída pela solução do solo e a fase gasosa pelo o ar do solo (MACHADO; FAVARETTO, 2006).

A fase sólida mineral do solo é composta de partículas de areia, silte e argila que, normalmente, se encontram reunidas pela ação de agentes cimentantes, formando

as unidades estruturais do solo. Os principais agentes cimentantes das partículas são os minerais de argila, a matéria orgânica e os óxidos de ferro e alumínio (CAMARGO; ALLEONI, 1997). A fração orgânica tem sua origem no acúmulo dos resíduos vegetais e animais, ocorrendo no solo em diferentes estágios de decomposição, contando, ainda, com organismos vivos e em atividade (KIEHL, 1979; REICHARDT, 1990).

As fases líquida e gasosa do solo são complementares e em conjunto formam o espaço poroso do sistema (PREVEDELLO, 1996). Como são interdependentes, as fases líquidas e gasosas variam sempre em função inversa uma da outra (VERDADE, 1972). Suas proporções, ao contrário dos sólidos minerais e orgânicos, podem ter grandes variações em espaço de tempo relativamente pequeno (LEPSCH, 2002). A parte líquida constitui-se de uma solução de sais minerais e componentes orgânicos coloidais, cuja concentração varia de solo para solo e com o teor de água. A parte gasosa é semelhante ao ar atmosférico, porém apresenta menor quantidade de O<sub>2</sub> e maior quantidade de CO<sub>2</sub>, como conseqüência das atividades biológicas que ocorrem no solo (REICHARDT; TIMM, 2004).

Em solos minerais, aproximadamente 45% do seu volume é composto pela fase sólida inorgânica (minerais), 5% pela matéria orgânica e 50% pelo ar e água (KIEHL, 1979; BRADY, 1989). Essas porcentagens podem ser afetadas com as variações de temperatura, pressão, luz, atividade dos microrganismos, adições de água, ação do homem, além de outros fatores (KIEHL, 1979).

O uso intensivo do solo, aliado a condições inadequadas de manejo, concorre para a deterioração de suas propriedades físicas e isso se deve, principalmente, às modificações em sua estrutura (OLSZEWSKI et al., 2004). Após alguns anos sob utilização intensa do solo, ocorre degradação das propriedades físicas, podendo refletir, negativamente, na produtividade agrícola e na conservação desse recurso natural (BORGES et al., 1999).

## **2.2 Estrutura e porosidade do solo**

A estrutura do solo refere-se à agregação de suas partículas individuais em partículas compostas ou agregados (VIEIRA, 1988). No solo existem diferentes tamanhos ou classes de agregados e as partículas sólidas do solo variam de qualidade e de tamanho (KIEHL, 1979). Quanto ao tamanho, algumas são grandes o suficiente para serem vistas a olho nu, ao passo que outras são tão diminutas que apresentam propriedades coloidais

(PREVEDELLO, 1996; REICHARDT; TIMM, 2004). As partículas primárias, pelo menos as de pequeno tamanho, se aglutinam pela ação de numerosas substâncias como matéria orgânica, óxidos de ferro, argila, entre outras, formando partículas secundárias, chamadas de agregados, de vários tamanhos e composições e com vários graus de estabilidade (OLIVEIRA, 2005). Além das substâncias acima citadas a agregação depende de fatores como o cultivo, as raízes, os microrganismos, umedecimento e secamento alternados (JORGE, 1983).

Os agregados do solo podem variar quanto ao tamanho, a forma e o grau de desenvolvimento (JORGE, 1983). A formação e a estabilidade de cada classe de agregados são influenciadas por fatores biológicos, físicos e químicos (BENITES et al., 2005).

O volume de espaços vazios existentes entre as partículas individuais e agregados constitui a porosidade do solo, e esta determina a capacidade de armazenar e transmitir líquidos e gases. A quantidade e o diâmetro dos poros, as formas, a rugosidade e a tortuosidade são de extrema importância, pois influem diretamente no fluxo interno dos gases e da água e no armazenamento desta e, por conseguinte, no comportamento agrícola dos solos (OLIVEIRA, 2005).

A porosidade total do solo representa o volume ocupado pelo ar e pela água e é afetada pela forma de arranjo das partículas do solo, ou seja, pela capacidade de formação de agregados. A porosidade total de um solo é adimensional ( $m^3 \cdot m^{-3}$ ) e em geral expressa em porcentagem (REICHARDT; TIMM, 2004).

Os limites entre os quais varia a porosidade total de um solo são muito amplos, pois, o volume de poros depende da composição granulométrica e da estruturação. Solos com partículas de tamanho uniforme são mais porosos do que os constituídos por partículas de diferentes tamanhos; nesse caso, as partículas finas podem preencher muitos dos espaços livres existentes entre o material mais grosseiro. Quando as partículas do solo ocorrem, predominantemente, na forma esférica, com diâmetro semelhante, se agrupam na forma cúbica, resultando num valor de porosidade maior do que quando comparado com uma disposição das partículas na forma piramidal, formando tetraedros. A matéria orgânica, além de dificultar o arranjo piramidal das partículas é, por si mesma, um material poroso, contribuindo, conseqüentemente, para maiores valores de porosidade (KIEHL, 1979).

Na superfície dos solos cultivados, normalmente, são encontrados valores de porosidade entre 35 a 50% em solos arenosos, 40 a 65% em solos argilosos, 60 a 80% em solos húmíferos e 80 a 85% em solos turfosos (PREVEDELLO, 1996).

Para Machado; Favaretto (2006), mais importante que a porosidade é o tamanho dos poros. O conhecimento da porosidade total de um solo não constitui uma informação adequada para caracterizar a propriedade, para isso é necessário saber qual a distribuição do tamanho dos poros (KIEHL, 1979). Oliveira (2005) apresenta poros de tamanhos variados, desde macroporos visíveis a olho nu, como canais formados por animais e raízes apodrecidas e fendas, até os extremamente pequenos, representados por espaços entre partículas coloidais. Segundo EMBRAPA (1997), os poros do solo são divididos em duas classes, os microporos, menores que 0,05 mm de diâmetro e os macroporos com diâmetro maior que 0,05mm. Com base no diâmetro, em micras ( $\mu\text{m}$ ), Prevedello (1996) classifica os poros em: macroporos ( $>300 \mu\text{m}$ ), mesoporos ( $50\text{-}300 \mu\text{m}$ ) e microporos ( $<50 \mu\text{m}$ ). Por esse motivo, é de se esperar que um solo argiloso, que possui muitas partículas menores que 0,002mm, apresente grande microporosidade e um solo arenoso, que possui muitas partículas maiores que 0,05mm, apresente grande macroporosidade (RESENDE et al., 2002).

Os macroporos se formam entre os agregados e são importantes por favorecer a infiltração de água, permitindo a drenagem, e por influenciar na aeração do solo, permitindo as trocas gasosas (PREVEDELLO, 1996), além de acomodarem as raízes das plantas. Os microporos, geralmente, ficam dentro dos agregados, retêm água disponível para as plantas, como uma esponja, e fornecem abrigo para as bactérias (BENITES et al., 2005). Nos microporos não há movimento da água por gravidade, sendo esta retida a tensões cada vez maiores, à medida que diminui o diâmetro dos poros, chegando a ser, a partir de determinados valores, indisponível para a maioria das plantas (RESENDE et al., 2002; OLIVEIRA, 2005).

Em contraste com o volume da parte sólida, que é constante, o volume dos espaços vazios é altamente variável. A distribuição dos espaços muda continuamente, em especial os grandes poros, na camada arável devido ao manejo do solo (GROHMANN, 1975).

Para Kiehl (1979); Camargo; Alleoni (1997) um solo "ideal" deve apresentar 50% do volume de poros totais que, na capacidade de campo, teria 33,5% para a

água e 16,5% para o ar. Já Brady (1989) representa o solo ideal como tendo a porosidade total igual a 50%, dividida igualmente entre ar e água, com 25% cada.

Na agricultura, a porosidade regula as relações entre as fases sólida, líquida e gasosa dos solos. Qualquer alteração na porosidade do solo, quer natural, quer provocada pelo homem, serve para modificar o armazenamento da água, o movimento da água e do ar do solo e o desenvolvimento do sistema radicular das plantas (GROHMANN, 1975; KIEHL, 1979). Portanto, a caracterização do sistema poroso é importante no estudo da estrutura do solo, na investigação do armazenamento e movimento da água e de gases e nos estudos sobre a resistência apresentada pelo solo por ocasião do seu manejo (GROHMANN, 1975).

### **2.3 Densidade do solo e resistência à penetração**

A densidade do solo pode ser definida como sendo a relação existente entre a massa de uma amostra de solo seca a 110°C e a soma dos volumes ocupados pelas partículas e pelos poros (KIEHL, 1979).

A densidade do solo é dependente do espaço poroso, portanto, solos com maior porosidade têm menor densidade de solo. Dessa maneira, todos os fatores que interferem no espaço poroso irão interferir na densidade do solo (MACHADO; FAVARETTO, 2006), como a natureza, a dimensão das partículas e a forma como se acham dispostas (CAMARGO; ALLEONI, 1997).

Em solos minerais são comuns as densidades entre 1,1 e 1,5 g cm<sup>-3</sup>. Solos sob floresta apresentam densidade menor que solos agrícolas, principalmente pela maior quantidade de matéria orgânica. Solos arenosos possuem densidade maior que solos argilosos, principalmente pelo fato de possuírem menor porosidade total (MACHADO; FAVARETTO, 2006). Os valores médios de densidade de solos arenosos estão entre 1,2 e 1,4 kg dm<sup>-3</sup> e são maiores do que os de solos argilosos cuja densidade varia entre 1,0 e 1,2 kg dm<sup>-3</sup> (CAMARGO; ALLEONI, 1997) e do que solos orgânicos com densidade entre 0,6 a 0,8 kg cm<sup>-3</sup> (KIEHL, 1979).

Solos com elevada densidade podem impedir a difusão do O<sub>2</sub> e criar um ambiente anaeróbico e redutor, prejudicial ao desenvolvimento das plantas, além de

proporcionar impedimento mecânico ao sistema radicular, por causar aumento da resistência à penetração do solo (MACHADO; FAVARETTO, 2006).

A resistência do solo à penetração é um termo utilizado para descrever a resistência física que o solo oferece a algo que tenta se mover através dele, mais precisamente, um índice que quantifica a resistência mecânica do solo à deformação imposta pelo crescimento de raízes ou introdução de um penetrômetro (SILVA et al., 2000). Esta propriedade depende, ao mesmo tempo, da sua granulometria (tamanho de partículas do solo), espécie mineralógica da fração argila, teor de água e arranjo das partículas (ROSOLEM et al., 1999).

Com o decréscimo do teor de água do solo, a resistência mecânica aumenta exponencialmente. Isto ocorre porque, à medida que o solo seca, as forças de coesão se tornam maiores, havendo concentração dos agentes cimentantes na solução do solo, além da redução do efeito lubrificante da água (SILVA et al., 2000).

#### **2.4 Condutividade hidráulica**

Entremeando-se aos materiais sólidos, encontram-se a água e o ar que ocupam o espaço poroso do solo (LEPSCH, 2002). As proporções de água e ar no solo podem variar consideravelmente em curto período de tempo (COSTA, 1979). Qualquer alteração na porosidade do solo, quer natural, quer provocada pelo homem, serve para modificar a movimentação da água e do ar o que afeta os processos bioquímicos que ocorrem no solo (GROHMANN, 1975).

A condutividade hidráulica é um parâmetro que mede a facilidade com a qual o solo transmite água, sendo influenciada pela distribuição do diâmetro de partículas e pela porosidade do solo (VEIGA, 2005). Ela é medida em volume de água que passa por unidade de área, por unidade de tempo. Portanto, quanto maior a condutividade hidráulica, tanto maior a facilidade com que a água se move no solo (REICHARDT, 1990). Alta condutividade determina rápido deslocamento de água no solo, sendo importante, por exemplo, para a taxa de infiltração de água das chuvas (solo saturado) e para o fluxo de água para as raízes das plantas (solo não saturado) (VEIGA, 2005).

Como a capacidade do solo de armazenar e transmitir líquidos está diretamente relacionada com a geometria do sistema poroso, considera-se que, quanto maior o

diâmetro dos poros, maior a permeabilidade interna (OLIVEIRA, 2005). Além da estrutura, a textura do solo influencia, expressivamente, na movimentação da água no solo (BRANDÃO, 2006). Assim, solos arenosos, pelo fato de conterem, proporcionalmente, grande quantidade de poros médios e grandes, apresentam excelente permeabilidade interna e pequena capacidade de retenção de água. Os solos argilosos, representados por material bastante intemperizado, ricos em óxidos de ferro e de alumínio, apresentam grande quantidade de microporos, conferindo uma menor permeabilidade interna e maior capacidade de retenção de água, comparados aos solos arenosos (OLIVEIRA, 2005).

## **2.5 Compactação e seus efeitos**

De modo geral, o solo mantido em estado natural, sob vegetação nativa, apresenta características físicas adequadas ao desenvolvimento ótimo das plantas (ANDREOLA et al., 2000). Nessas condições, o volume de solo explorado pelas raízes é relativamente grande. À medida que o solo é submetido ao uso agrícola, as propriedades físicas sofrem alterações, geralmente desfavoráveis ao desenvolvimento vegetal (SPERA et al., 2004).

Segundo Jorge (1983), o cultivo adequado influencia a agregação em virtude de melhorar o arrançamento e incrementar a mistura da fração orgânica com a mineral do solo. Entretanto, um manejo inadequado e exagerado pode provocar compactação, processo prejudicial à estruturação do solo. Com o manejo do solo o teor de matéria orgânica é reduzido e os problemas com compactação são agravados (BERTONI; LOMBADI NETO, 1990).

O aumento da densidade do solo nas suas primeiras camadas, pelo efeito de uma compressão exercida sobre a superfície, tem sido definido como compactação do solo. Esse fenômeno ocorre quando a pressão exercida sobre o solo excede sua capacidade de suportar a carga e sua resistência ao cisalhamento. Quando o solo recebe uma carga suficiente para causar compactação, a pressão recebida é rapidamente dissipada pelo fluxo de massa da zona que recebe a compressão do seu espaço poroso, aumentando tanto a compactação quanto a coesão do solo, ocasionando mudanças nas relações massa-volume do mesmo e, assim, interferindo nos fluxos de ar, calor e água (BOWEN, 1981).

No processo da compactação ocorre no solo dispersão ou rearrançamento dos agregados pela aproximação das partículas do solo (TORRES et al., 1998).

A origem da compactação do solo é bastante discutível. Em muitas condições, o perfil do solo apresenta um horizonte, sensivelmente, mais compactado, e que se originou da consolidação natural do solo durante os processos de formação, na contração natural durante os períodos de secagem e na desestruturação dos agregados pela ação de impacto das gotas de chuva (MACHADO; FAVARETTO, 2006), além dos ciclos, como congelamento e degelo, umedecimento e secamento, e expansão e contração da massa do solo (CAMARGO; ALLEONI, 1997). Em outras condições, aparece uma zona compactada na região da soleira de equipamentos, devido à preparação do solo sempre na mesma profundidade. O tráfego de equipamentos e máquinas agrícolas sobre o solo também provoca compactação superficial, além do pisoteio de animais (RICHARDT, 1990; TORRES et al., 1998).

Embora várias possam ser as causas da compactação do solo, a passagem de máquinas e equipamentos agrícolas está entre as principais causadoras desse dano (SILVA et al., 2003; MINATEL et al., 2006; FREDDI et al., 2007), especialmente nas últimas décadas, devido à exploração intensa, com o uso da motomecanização em todas as fases do processo produtivo. Além disso, houve aumento no peso e na potência das máquinas e dos implementos, além de alterações nas características dos mesmos, tais como massa, carga por eixo e tipo de pneus (MACHADO; FAVARETTO, 2006).

Equipamentos que trabalham sob a superfície do solo, frequentemente geram elevadas pressões. No caso de uma aiveca, por exemplo, em que se tem um gume cego, o solo é forçado para frente e para baixo. Não podendo escapar para cima, na parte inferior de apoio da ferramenta no solo, essa região é compactada durante o movimento. Essa situação é, sensivelmente, agravada se forem usadas ferramentas com corte não afiado ou se o coeficiente de fricção ou adesão na interface solo-metal for alto ou, ainda, se a inclinação das ferramentas não estiver, apropriadamente, ajustada (CAMARGO; ALLEONI, 1997).

Dias Jr.; Pierce (1996) relatam que os mecanismos de compressibilidade que um solo apresenta dependem de uma série de fatores externos e internos, sendo os fatores externos caracterizados pelo tipo, intensidade e frequência da carga aplicada, enquanto os fatores internos são influenciados pela umidade do solo, textura, mineralogia, estrutura e densidade inicial do solo.

Os solos com pequena variação no tamanho das partículas constituintes são menos susceptíveis ao processo de compactação, quando comparados àqueles

onde há uma grande variação no tamanho das partículas, devido ao fato das partículas de tamanhos diferentes se arranjam e preencherem os poros do solo, quando submetidas a uma pressão (MANTOVANI, 1987; SILVA, 1999).

Nos solos argilosos, quando uma pressão é aplicada, as partículas finas de argila rolam para os espaços deixados pelas partículas grossas, que são os macroporos, causando uma diminuição do volume; por esse motivo, o efeito da pressão de um peso em repouso sobre esse tipo de solo é mais severo, dando origem a maiores problemas de compactação, do que nos solos arenosos (JORGE, 1985).

Esse processo de translocação de argila pode ocorrer, também, quando a chuva e/ou a água de irrigação caem sobre um solo seco, dispersando parte do material fino que, permanecendo em suspensão, é arrastado conforme a água caminha perfil abaixo, através dos espaços vazios do solo. Se o subsolo estiver seco, a água que desce será absorvida pela massa do solo, e a argila em suspensão, filtrada e depositada preenchendo os espaços porosos (CAMARGO; ALLEONI, 1997).

Os problemas de compactação do solo são mais pronunciados onde se adota mecanização intensiva, em solos sujeitos a altos índices de chuva e irrigação (CASTRO NETO, 2001), ou seja, quando a pressão é exercida em solos úmidos (JORGE, 1985), pois a água age como agente lubrificante, melhorando o arranjo entre as partículas, aumentando a densidade do solo, porém, quando chega a determinado conteúdo, a água começa a ocupar os espaços vazios e, sendo um fluído, por isso incompressível, com uma mesma solicitação mecânica externa a água é expulsa e o solo chega a densidades menores (WEIRICH NETO et al., 2002).

Dependendo da intensidade de compactação ocorre uma deformação parcial ou mesmo total da estrutura do solo (CAMARGO; ALLEONI, 1997). Esse processo, independentemente do tipo de solo, uso e manejo, tem consideravelmente alterado as condições físicas do solo como a densidade do solo, porosidade total, tamanho e continuidade dos poros, resistência à penetração, bem como aquelas propriedades delas dependentes, como, aeração, infiltração, retenção e capacidade de armazenamento de água (MACHADO; FAVARETTO, 2006). Por isso, um monitoramento da compactação do solo é uma ferramenta imprescindível ao planejamento das práticas de cultivo a serem adotadas, visando maximizar a rentabilidade agrícola (TORRES; SARAIVA, 1999).

### 2.5.1 Efeitos na densidade do solo

A compactação mecânica causa efeitos negativos na estruturação do solo, ocasionando destruição da estrutura, ou melhor, quebra dos agregados (SOARES et al., 2005a). A compactação causada por compressão diminui o volume do solo, pois ocasiona um rearranjo mais denso das partículas (CURI, 1993), conferindo aumento na densidade do solo (JORGE, 1985).

Solos com a mesma classe textural podem apresentar diferentes densidades do solo, dependendo do uso e da profundidade (BORGES et al., 1999). Na superfície, normalmente, a densidade é menor devido à maior concentração de material orgânico, o qual atua como agente agregador aumentando o espaço poroso (MACHADO; FAVARETTO, 2006). Ao longo do perfil, devido às pressões exercidas pelas camadas superiores sobre as adjacentes, a densidade aumenta, pois ocorre a compactação, aumentando a densidade do solo (KIEHL, 1979; FREDDI et al., 2007). Em um mesmo perfil de solo foram encontradas densidades de  $1,19 \text{ g cm}^{-3}$  e de  $1,45 \text{ g cm}^{-3}$  em profundidade, representando áreas não compactadas e áreas compactadas que impediram crescimento radicular (VASCONCELOS et al., 2004).

Streck et al. (2004), avaliando o efeito do tráfego de máquinas na alteração das propriedades físicas do solo sobre plantio direto, constataram que a compactação adicional imposta pelo tráfego das máquinas promoveu um aumento da densidade do solo até o dobro da profundidade em que foi detectada compactação para o tratamento sem compactação adicional para um mesmo tipo de solo. Resultado semelhante foi obtido por Alves; Suzuki (2004), que encontraram valores de densidade de  $1,16 \text{ g cm}^{-3}$  na profundidade de 0 a 10cm e  $1,31 \text{ g dm}^{-3}$  na camada de 10 a 20cm, porém abaixo dessa profundidade foram encontrados valores de densidade menores.

Alguns autores como Vieira; Muzilli (1984) afirmam que o solo no sistema de plantio direto, em curta duração de tempo, geralmente apresenta maiores valores de densidade do solo nas camadas superficiais do perfil, em comparação com o preparo convencional. Essa afirmação é confirmada por Tormena et al. (2002), Camara; Klein (2005), que atribuem esse resultado ao não-revolvimento do solo e à movimentação de máquinas e implementos agrícolas, sobretudo quando realizada em solos com teores elevados de argila.

Para Castro Neto (2001) após o tráfego de máquinas ocorre compactação do solo, conferindo a ele maiores valores de densidade do solo. Oliveira et al. (1995) compararam a densidade do solo de área de floresta com área de cultivo contínuo com cana-de-açúcar e observaram aumento da densidade no solo cultivado. Resultados semelhantes observados por Oliveira et al. (2003), Araújo et al. (2004) e Silva et al. (2005a) foram atribuídos ao tráfego de máquinas agrícolas durante as atividades de cultivo.

Alguns autores como Silva et al. (2003), Streck et al. (2004), Freddi et al. (2007) e Secco et al. (2009), utilizando a compactação adicional imposta por tráfego de máquinas como objetivo de demonstrar a real alteração na densidade do solo, concluíram que com o aumento da intensidade de compactação do solo ocorre um aumento na sua densidade.

Outros autores utilizaram equipamentos compactadores, em laboratório, para demonstrar a real modificação na densidade do solo com o incremento da compactação, como Moraes et al. (1995), que estudaram diferentes intensidades de compactação aplicadas a um Latossolo Vermelho e um Nitossolo Vermelho, por meio de um aparelho compactador, deixando cair, de uma altura de 0,30 m, uma carga de 2 kg, variando a intensidade de compactação das amostras pelo número de golpes, observaram, para ambos os solos estudados, um aumento na densidade do solo com o incremento da compactação, porém, para o Latossolo Vermelho as intensidades 0, 1, 2, 3 e 4 não diferiram entre si, mas diferiram das demais.

Com o auxílio de uma prensa hidráulica Borges et al. (1999) aplicaram cargas crescentes e obtiveram valores crescentes de densidade do solo. Fato também observado por Foloni (1999), Stone et al. (2002) e Foloni et al. (2003), que utilizaram o mesmo tipo de prensa para realizar os estudos.

### **2.5.2 Efeitos na porosidade**

A compactação do solo está indiretamente ligada à estrutura, influenciando, principalmente, na formação e estabilidade dos agregados. Como o solo é um material poroso, por compressão, a mesma massa de material sólido pode ocupar um volume menor. Isto afeta sua estrutura definindo a quantidade, o tamanho, o formato e a orientação de espaços vazios no solo e, conseqüentemente, a relação entre macro e microporos e a continuidade da macroporosidade (BERTONI; LOMBARDI NETO, 1990; RICHARDT,

1990). Essa modificação pode ser atribuída à diminuição da porosidade total e da macroporosidade (KLEIN; LIBARDI, 2002; RICHART et al., 2005) e ao aumento da microporosidade (MACHADO; FAVARETTO, 2006). Segundo Bertol et al. (2004), o manejo do solo influencia os volumes de macroporos, microporos e total de poros, em decorrência da alteração ocorrida na densidade. Segundo Boone; Veen (1994) no processo de compactação, os poros maiores, responsáveis pela aeração do solo, tendem a diminuir, sendo substituídos por poros menores.

A diminuição na porosidade total de um Latossolo Vermelho e de um Nitossolo Vermelho foi observada por Moraes et al. (1995) com o aumento na intensidade de compactação, resultante do aumento no número de golpes de um cilindro de 2 kg caindo de uma altura de 30 cm. Borges et al. (1999), com o auxílio de uma prensa hidráulica, aplicaram cargas de 0,00; 5,94; 9,05 e 13,58 MPa em um Latossolo Vermelho Escuro textura média e obtiveram valores de porosidade total igual a 50,50%; 44,90%; 38,40% e 34,80%, respectivamente para as cargas aplicadas.

Após a colheita de cana-de-açúcar, realizada com máquinas e implementos que compactam o solo, ocorreu uma redução na macroporosidade e aumento da microporosidade do solo (CAMILOTTI et al., 2005). Soares et al. (2005b), também encontraram redução significativa da porosidade total e da macroporosidade, em camadas compactadas, de solos cultivados com citros e cana-de-açúcar sob sistema tradicional de manejo.

Silva et al. (2005a) obtiveram menores valores de porosidade total e de macroporos e maiores valores de microporos, comparando três sistemas de cultivo de cana-de-açúcar com o solo sob mata nativa. Essas alterações também são citadas por Freddi et al. (2007), que observaram redução de 71,43% na macroporosidade e aumento de 10,0% na microporosidade. Já Costa et al. (2003) não encontraram diferença significativa entre os valores de porosidade total e macroporosidade entre sistemas de plantio direto, convencional e em solo sob mata.

Em solos compactados ocorre a redução do volume de poros totais e de macroporos, enquanto o volume de microporosidade permanece praticamente inalterado (HILLEL, 1982; DIAS JÚNIOR, 1996). Silva; Kay (1996) salientaram que a microporosidade do solo é fortemente influenciada pela textura, teor de carbono orgânico e muito pouco

influenciada pela compactação do solo. Para Pelá (2005) a microporosidade é um dos atributos mais difíceis de serem alterados pelo manejo do solo.

Tormena et al. (1998) avaliaram a compactação de um Latossolo Vermelho Escuro argiloso em função de tráfego de máquinas e constaram que ocorreu redução média de 6% na porosidade total, que a porosidade de aeração (macroporosidade) foi reduzida para valores abaixo do limite crítico de  $0,1 \text{ m}^3 \text{ m}^{-3}$  e que não houve efeito dos tratamentos sobre a microporosidade.

Araujo et al. (2004), compararam um Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa e obtiveram valores significativamente menores de porosidade total e macroporosidade na área cultivada, mas não observaram diferença significativa entre os valores da microporosidade. Resultados semelhantes foram obtidos por Streck et al. (2004) para um Argissolo Vermelho-Amarelo distrófico arênico, submetido a diferentes intensidades de tráfego.

### **2.5.3 Efeitos na resistência do solo à penetração**

A compactação do solo resulta, ao mesmo tempo, na redução da macroporosidade e no aumento da microporosidade, da densidade do solo e da resistência do solo a penetração (MANTOVANI, 1987; TORRES et al., 1998).

Em solos sob mata natural a resistência à penetração tende a ser pequena, se comparada àquela do mesmo tipo de solo cultivado (CAMARGO; ALLEONI, 1997). Após cultivo intensivo os valores de resistência à penetração podem causar limitações ao crescimento de plantas, que podem ser mais ou menos severas dependendo da cultura (SILVA et al., 2000).

A análise da resistência do solo à penetração, realizada por Moraes et al. (1995), resultou em o aumento nos valores de resistência à penetração com o aumento da intensidade de compactação, tanto em um Latossolo Vermelho quanto em um Nitossolo Vermelho, sendo a variação encontrada de 0,08 a 0,36 MPa. Beutler et al. (2004) também estudaram intensidades de compactação e observaram aumento da resistência à penetração devido ao incremento da densidade do solo. Com o aumento do estado de compactação Silva et al. (2004) verificaram relação direta da densidade do solo com a microporosidade e resistência à penetração, além da relação inversa com a macroporosidade.

Streck et al. (2004) verificaram que a resistência à penetração, para o tratamento com compactação adicional, com quatro passadas de uma máquina, foi superior ao tratamento com duas passadas da mesma máquina e ao tratamento sem compactação adicional, até a profundidade de 40 cm. Freddi et al. (2007), avaliando a influência do tráfego de tratores sobre um Latossolo Vermelho, constataram nas três camadas avaliadas, um aumento de 65,7% na resistência mecânica à penetração.

Minatel et al. (2006) verificaram que a resistência mecânica do solo à penetração vertical foi superior na zona de passagem de tráfego dos rodados de máquinas e implementos agrícolas comparada com a da região sob a copa de citrus, onde não houve tráfego de máquinas e implementos agrícolas.

O aumento da resistência à penetração é um dos fatores limitantes ao desenvolvimento e estabelecimento das culturas (SILVA et al., 2000; RICHART et al., 2005). Taylor et al. (1966), Tormena et al. (1998) e Silva et al. (2002) relatam que um valor de 2,0 MPa de resistência à penetração do solo tem sido associado a condições impeditivas para o crescimento das raízes e da parte aérea das plantas. Camargo et al. (2000) empregaram a classificação de compactação moderada para valores de resistência mecânica do solo à penetração compreendidos entre 1 MPa e 2 MPa, em que podem ocorrer limitações ao desenvolvimento de raízes de algumas espécies em solos de textura argilosa, e de compactação severa para valores de resistência do solo superiores a 2 MPa, considerados altamente restritivos à penetração, ramificação e crescimento de raízes.

Os limites de resistência à penetração, para um bom desenvolvimento radicular, são variáveis, principalmente quanto a cultura utilizada (SILVA et al., 2000). Para Beulter; Centurion (2004b), o limite para a produtividade de soja é aquele em que o solo atinge uma resistência à penetração de 0,85 MPa e, para Beulter et al. (2007), essa limitação ocorre quando a resistência à penetração é maior ou igual a 2,33 MPa. Para a cultura do milho houve decréscimo de produtividade a partir de 1,65 MPa em um Latossolo Vermelho textura média (FREDDI et al., 2007). Já Secco et al. (2009) verificaram que para um Latossolo Vermelho distroférico típico argiloso, os valores médios de densidade do solo de  $1,54 \text{ g cm}^{-3}$  e de resistência a penetração de 3,26 MPa foram suficientemente elevados para reduzir o rendimento de grãos da cultura do milho.

#### 2.5.4 Efeitos na Condutividade Hidráulica

Como os macroporos são mais facilmente afetados pela compactação e, por ocorrer por esses poros a movimentação rápida e não limitada da água, conseqüentemente, a infiltração, a permeabilidade e a drenagem do solo são prejudicadas (CAMARGO; ALLEONI, 1997).

O tráfego intenso de máquinas sobre a superfície do solo produz uma camada compactada que reduz movimentação de água no solo (BRANDÃO, 2006). Em solos compactados a temperatura é diminuída, como conseqüência, a viscosidade da água aumenta, ocasionando uma diminuição da condutividade hidráulica do solo (BRANDÃO, 2006), essa redução também pode ser ocasionada pelo aumento na densidade do solo e resistência à penetração, além da diminuição dos valores de macroporos e de total de poros, com influência maior na quantidade de microporos (KEMPER et al., 1971; CAMARGO, 1983; HORTON et al., 1994; BERTOL et al., 2004; RICHART et al., 2005).

Klein; Libardi (2002) avaliaram a condutividade hidráulica de um Latossolo Vermelho, não saturado, sob diferentes sistemas de uso e manejo e verificaram que as alterações ocasionadas na estrutura do solo, devido ao manejo, levaram a uma diminuição na condutividade hidráulica no solo. Costa et al. (2003) estudaram solos sob mata, plantio direto e preparo convencional e constataram grande variabilidade nos valores de condutividade hidráulica e, por esse motivo, não encontraram diferença estatística entre os tratamentos. Os implementos utilizados no preparo do solo, geralmente, alteram a sua condutividade hidráulica como constatado por Silva et al. (2003). Esses autores verificaram que as soleiras dos implementos arado de aiveca, grade aradora e arado de discos reduziram, significativamente, a condutividade hidráulica saturada na profundidade de trabalho sob a soleira do implemento.

Minatel et al. (2006), avaliando três regiões dentro de uma área plantada com citros, constataram que na região da copa, onde não ocorreu passagem de rodados, ocorriam os maiores valores de condutividade hidráulica do solo, e correlacionaram esse aumento com os maiores valores de macroporosidade e menores valores de densidade e resistência mecânica do solo à penetração.

### 2.5.5 Outros efeitos da compactação

A compactação do solo determina, de certa maneira, as relações entre ar, água e temperatura, e estas influenciam a germinação, a brotação e a emergência das plantas, o crescimento radicular (BEULTER; CENTURION, 2004a), o crescimento da parte aérea (ORTOLANI et al., 1982, FREDDI et al., 2007) e, praticamente, todas as fases de desenvolvimento das plantas (CAMARGO; ALLEONI, 1997).

Um solo com estrutura satisfatória não apresenta impedimento mecânico para as raízes, permitindo um bom desenvolvimento das plantas. A boa estrutura do solo é importante para o crescimento satisfatório da planta, fornecendo ventilação necessária ao crescimento normal das raízes, manutenção adequada de água nos poros do solo, criados pela agregação das partículas, e prevenção contra a formação de camadas compactadas, impedindo a penetração radicular (SCHULTZ, 1978).

O excesso de água no solo reduz as trocas gasosas entre o solo e a atmosfera, ou seja, a aeração tornar-se deficiente (TORRES et al., 1998). Em locais onde a drenagem de água não é adequada ocorre deficiência de O<sub>2</sub>, causando uma redução da respiração e do volume total das raízes, um aumento da resistência no transporte de água e nutrientes na planta e formação de compostos tóxicos no solo e na planta. Isso pode ocasionar a morte de células e das raízes. A temperatura exerce grande influência em todos os processos biológicos. Solo com excesso de água tem grande capacidade calorífica e, assim, grande quantidade de calor é necessária para elevar a temperatura. Em condições de solo compactado, onde a drenagem de água é deficiente, o solo é frio e o crescimento da cultura é retardado (CRUCIANI, 1989).

Quando uma raiz encontra um poro no solo, cujo diâmetro é menor que o seu, só prosseguirá se expandindo se for capaz de exercer pressão suficiente para dilatar o poro ou então, terá que diminuir seu diâmetro o suficiente para passar através dele. Parece que, na realidade, o diâmetro da raiz, quando ela encontra tais obstáculos, aumenta ao invés de diminuir (CAMARGO; ALLEONI, 1997; BEULTER; CENTURION, 2004)

Como a compactação provoca diminuição no tamanho dos poros, a ponto de impedir a passagem da raiz principal, a planta lança mão de mecanismo de defesa via expansão de raízes laterais, com diâmetros adequados para passar pelos poros. Essas raízes laterais parecem responder à imposição de obstáculos mecânicos, de maneira muito

semelhante à principal. Assim, se o obstáculo é imposto a ambas, todo o sistema se tornará definido e, nessas condições, ficará inteiramente coberto por pêlos radiculares. Se houver obstáculo apenas à raiz principal, proliferam-se as laterais, formando uma configuração de sistema radicular muito denso e raso que, em condições de campo, dificilmente sobrevive a um período de seca (CAMARGO; ALLEONI, 1997). Portanto, em solos compactados em subsuperfície, as raízes tendem a concentrar-se na camada superficial do solo (BOWEN, 1981; BORDIN et al., 2005).

Todas as partes de um sistema radicular são igualmente expostas à compactação, devido ao crescimento nas regiões não impedidas. Neste sentido, a redução no comprimento das raízes na camada compactada pode ser compensada pelo crescimento nas zonas de menor resistência dos solos, não afetando assim, o comprimento total das raízes e o crescimento da parte aérea (KOOISTRA et al., 1992), resultado confirmado por Bordin et al. (2006). Porém, as respostas da parte aérea das plantas à compactação do solo são controversas. Relaciona-se a diminuição do seu desenvolvimento ao aumento dos níveis de compactação do solo devido, provavelmente, à deficiência de água e nutrientes, fato comprovado por Guimarães et al. (2002), Beutler; Centurion (2004), Silva et al. (2006), porém, em alguns casos, numa condição de vasos, onde o fornecimento de água e nutrientes não são limitantes, seus efeitos podem não ser os esperados (SILVA; ROSOLEM, 2001).

O impedimento mecânico ao crescimento radicular não reduz, por si só, o rendimento das culturas. Se a camada de solo compactada não conferir estresse pela falta de água e de minerais, o impedimento mecânico às raízes não irá afetar a produtividade das culturas (BOWEN, 1981). Entretanto, somente a produtividade pode realmente indicar se uma dada compactação é ou não o fator mais limitante de uma planta ou do sistema (TORRES et al., 1998). A influência da compactação do solo sobre a absorção de nutrientes, o desenvolvimento do sistema radicular e da parte aérea das plantas depende da espécie, da classe de solo e do teor de água no solo (MEDEIROS et al., 2005). Por isso, dependendo do grau de compactação, do tipo do solo e da espécie da planta cultivada, poderá ou não ocorrer queda na produção.

Alguns autores como Ortolani et al. (1982), Beutler et al. (2004) Medeiros et al. (2005), Freddi et al. (2007), Secco et al. (2009) observaram redução da produtividade de algumas culturas com o aumento na compactação do solo. Stone; Silveira

(1999), Secco et al. (2004) e Lima et al. (2006), entretanto, não encontraram redução na produtividade das culturas estudadas.

Além dos danos ocasionados nas plantas e os efeitos nas características do solo, discutidas anteriormente, outra preocupação, como a erosão, pode ser levada em consideração em relação à ocorrência de compactação no solo. Por afetar a densidade, porosidade do solo, infiltração e drenagem de água, a compactação do solo favorece o escoamento superficial da água, portanto, facilita a ocorrência de erosão hídrica (MACHADO; FAVARETTO, 2006).

## **2.6 O uso de matéria orgânica para minimizar a compactação do solo**

A matéria orgânica do solo é a parte da fração sólida constituída de compostos orgânicos de origem vegetal e animal (CERRI; MORAES, 1992; REICHARDT; TIMM, 2004; BENITES et al., 2005) em diferentes estágios de decomposição e habitada por grande número de microrganismos em atividade (COSTA, 1979; KIEHL, 1979).

Sob vegetação natural, o conteúdo de matéria orgânica do solo encontra-se estável (BAYER; MIELNICZUK, 2008), podendo chegar ao solo de modo natural, como a queda de folhas, frutas e galhos, a morte de seres que habitam o solo, excremento de animais, a liberação de exudados radiculares e, ainda, a decomposição de vegetais e animais mortos (BENITES et al., 2005).

O conteúdo de matéria orgânica do solo é alterado pelo uso, sendo observada uma redução acentuada quando utilizados métodos de preparo com intenso revolvimento do solo e sistemas de cultura com baixa adição de resíduos vegetais. A manutenção ou recuperação dos teores da matéria orgânica e da qualidade do solo pode ser alcançada pela ação do homem com adição de esterco, composto, resíduo orgânico, pela incorporação de cobertura verde e pela formação de palhada com a utilização do sistema de semeadura direta (BENITES et al., 2005; CAMARA; KLEIN, 2005; BAYER; MIELNICZUK, 2008).

A formação e manutenção de macro agregados no solo, pela adição de matéria orgânica, são os objetivos mais importantes do manejo de solo visando combater o depauperamento de suas propriedades físicas (BENITES et al., 2005). A utilização de resíduos para a adição de matéria orgânica ao solo, além de gerar benefícios ao solo, pode minimizar o

problema de deposição final desses resíduos, problema que adquire cada vez mais aspectos preocupantes (GLÓRIA, 1992). Em função da grande oferta e do descarte dos resíduos, quase sempre, de modo inadequado na natureza, o quadro de degradação ambiental, cada vez mais, se materializa nas diferentes paisagens brasileiras. Com o maior uso de resíduos orgânicos nas lavouras é possível diminuir, ao longo dos anos, a aplicação de adubos minerais e melhorar a qualidade do solo, já que os resíduos orgânicos atuam também como condicionadores de solo (SILVA, 2008).

A matéria orgânica é um componente fundamental da capacidade produtiva dos solos, por causa dos seus efeitos sobre a disponibilidade de nutrientes, a capacidade de troca de cátions do solo, a complexação de elementos tóxicos e micronutrientes, a agregação, a infiltração e a retenção de água, a aeração e a atividade da biomassa microbiana (BAYER; MIELNICZUK, 2008). Constitui-se numa fonte de elementos nutritivos para as plantas que são liberados, gradativamente, à medida que se dá sua lenta mineralização (COSTA, 1979), além de estar ligada a processos fundamentais como a ciclagem e retenção de nutrientes (KIEHL, 1985). Sua presença no solo aumenta a CTC, por causa do grande número de radicais livres presentes em sua estrutura, aumenta a disponibilidade de nutrientes, aumenta o poder tampão, tende a aumentar o pH de solos ácidos, controla a toxidez causada por certos elementos encontrados em quantidades acima do normal, como o alumínio, ferro e manganês, uma vez que o húmus tem a propriedade de fixar, complexar ou quelatar esses elementos (KIEHL, 1985 e RICHARDT; TIMM, 2004).

A principal característica do solo afetada pela matéria orgânica é a agregação. A matéria orgânica age como agente cimentante na agregação do solo, concorrendo para o estabelecimento de uma estrutura adequada, permitindo maior circulação de ar e água. O papel da matéria orgânica em termos de estabilização de macroagregados está associado com a ação de mucilagens e exsudados de origem microbiana e vegetal, em associação com o efeito aditivo das interações organominerais de superfície. O tempo médio de resistência dessas mucilagens e exsudados é de alguns dias a semanas. Para manter estes microagregados é necessário o aporte contínuo de material orgânico ao solo, para a manutenção da atividade biológica e liberação de mucilagens; e a presença contínua de plantas, para liberação de exsudados radiculares. Considerando os macroagregados, os fragmentos orgânicos servem como “núcleos” ao redor dos quais os microagregados estão aderidos, garantindo assim a sua

estabilidade. Nesta etapa, também ocorre ação das raízes das plantas vivas e hifas de fungos que associadas formam uma rede extensa no solo, unindo mecanicamente os microagregados, além de cobri-los com seus exsudados (VEZZANI et al., 2008).

A partir de seu efeito sobre a agregação do solo, indiretamente, são afetadas as demais características físicas do solo, como a porosidade, a densidade do solo, a aeração, a capacidade de retenção de água, infiltração, drenagem, entre outras, que são fundamentais à capacidade produtiva do solo (LEPSCH, 2002; BAYER; MIELNICZUK, 2008). A aplicação de matéria orgânica no solo melhora a agregação e a estruturação, diminui a densidade, corrige, conseqüentemente, a restrição ou excesso de aeração e drenagem e melhora a condutividade hidráulica (KIEHL, 1985; BRANDÃO, 2006).

Barbosa et al. (2004), estudando a influência do lodo de esgoto na condutividade hidráulica de um Latossolo Vermelho eutroférico, verificaram que a dose de 12 Mg ha<sup>-1</sup> de lodo de esgoto aumentou a condutividade hidráulica nos potenciais 0 e -1 kPa, respectivamente, enquanto doses maiores (18, 24 e 36 Mg ha<sup>-1</sup>) provocaram repelência da água na superfície, diminuindo a condutividade hidráulica nesses tratamentos. Pelá (2005) estudou a influência de diferentes tipos de adubos orgânicos, adicionados ao solo, em algumas propriedades físicas do solo, como a condutividade hidráulica, comparando com a incorporação de adubo mineral e um solo sem adubo e, constatou que o efluente de biodigestor apresentou a maior permeabilidade à água, com condutividade hidráulica saturada 238 mm h<sup>-1</sup>, superior à adubação mineral, à testemunha e ao composto orgânico, cujos valores foram 24, 42 e 52 mm h<sup>-1</sup>, respectivamente.

Silva et al. (2005b) associaram o aumento da densidade do solo, em profundidade, com a diminuição do teor de matéria orgânica. Calonego (2007), avaliou as alterações na estrutura do solo e nas qualidades físicas e físico-hídricas, com a utilização de espécies de cobertura, em esquemas de rotação de culturas em sistema semeadura direta, e constatou que na avaliação realizada antes do cultivo da soja, no terceiro ano de condução do experimento, na camada superficial do solo (0 a 5cm), houve maior proporção de macroporos e menor densidade do solo, não ocorrendo diferenças estatísticas quanto à porosidade total. O autor afirma que esse resultado, provavelmente, está relacionado com o incremento no teor de matéria orgânica entre o primeiro e o terceiro ano de condução do experimento, que foi maior nos tratamentos envolvendo cultivo de plantas de cobertura.

Alguns autores comentam que a influência da matéria orgânica no solo leva algum tempo para se manifestar, por isso alguns estudos não encontram diferenças em algumas das propriedades físicas do solo, quando adiciona-se material orgânico no solo por poucos anos. Coneglian (2002), observou para um Nitossolo Vermelho distroférico, em função da presença da cobertura vegetal de milho (*Pennisetum americanum*), com implantação do sistema de semeadura direta, que os resíduos desta cultura não exerceram influências significativas na densidade do solo e macroporosidade. Melo et al. (2004) constataram que, apesar do aumento no teor de matéria orgânica, adicionando biossólidos aos solos, não houve diferença na porosidade total, microporosidade e na densidade do solo para as diferentes doses do material em dois solos.

Barilli (2005) observou para um Latossolo Vermelho distroférico com aplicação de resíduo líquido de suíno que houve aumento do teor de matéria orgânica e da porcentagem de agregados, com diâmetro entre 2 e 0,105 mm, mas não houve influência na macroporosidade, microporosidade, porosidade total e na resistência do solo à penetração em relação ao solo de mata. Silva et al. (2005a) observaram uma redução na macroporosidade de solos cultivados com cana-de-açúcar, em comparação ao solo de mata, e maiores valores de poros de maior diâmetro no solo com aplicação de vinhaça, em comparação com outros tratamentos sem adição de material orgânico, porém, quando avaliaram a condutividade hidráulica não encontraram diferença significativa entre o tratamento com vinhaça e outros tratamentos sem adição de matéria orgânica.

Toma (2008) estudou o efeito de quatro doses de resíduos orgânicos gerados na agropecuária, na forma de composto orgânico, para a recuperação de áreas degradadas pela erosão hídrica, constatando que apesar da alta variabilidade nos valores, não houve diferença estatística entre as doses nos valores de condutividade hidráulica, e atribuiu esse resultado ao fato de que o composto foi aplicado e incorporado ao solo um mês antes da análise e, portanto, o solo se apresentava com sua estrutura ainda pouco modificada pelo composto, devido ao pouco tempo de incorporação. Porém, ao longo do tempo estudado, ocorreu aumento na porosidade do solo, para todas as doses de composto aplicado, e diminuição da densidade do solo, onde o composto estava presente, se tornando mais constante para altas doses do composto.

A matéria orgânica tem um alto poder de adsorção de água, por isso, quando adicionada ao solo, aumenta o volume de água que este poderá adsorver, aumenta a demanda de água para que o solo alcance o conteúdo de água para a máxima compactação (BRADY, 1989). Por este motivo, elevados os teores de matéria orgânica no solo podem evitar ou reduzir a compactação do solo (MORAES et al., 1995).

Camargo; Aleoni (1997) afirmaram que um atributo importante que se deve levar em conta, ao avaliar o efeito da compactação no aumento da densidade, é o teor de matéria orgânica do solo, pois altos teores podem promover aumento no limite de plasticidade do solo, dificultando o aumento da densidade. A matéria orgânica exerce influência direta na densidade do solo por possuir menor densidade de partículas, e indireta na medida que favorece a estruturação de solos compactados, pois, devido ao seu efeito cimentante, une as partículas individualizadas do solo em macroagregados, reduzindo a obstrução do espaço poroso (KIEHL, 1979). Braida et al. (2006) estudaram o efeito da matéria orgânica do solo no comportamento da curva de compactação e avaliaram a capacidade dos resíduos vegetais em dissipar a energia compactante concluindo que o acúmulo de matéria orgânica nos solos, proporcionado por diferentes sistemas de manejo, reduziu a densidade máxima e aumentou a umidade crítica para compactação do solo, o que significa que o solo torna-se mais resistente à compactação.

## **2.7 O uso da análise de imagem para avaliação da compactação do solo**

Uma vez que a macroporosidade revela-se como um índice bastante útil na avaliação das modificações estruturais do solo, além de ser uma das propriedades mais afetadas pela compactação do solo, o seu estudo é de fundamental importância. Um dos métodos complementares utilizados para o estudo deste parâmetro é a análise de imagens, obtidas a partir de blocos resinados e polidos, método que quantifica o tamanho, a forma e a conectividade dos poros afetados pelo manejo do solo (RINGROSE-VOASE; 1984, BULLOCK et al., 1985).

O processamento e a análise de imagens é objeto de crescente interesse devido à grande aplicabilidade, principalmente no aprimoramento de informações para interpretação humana e análise automática por computador de informações extraídas de uma cena (DIAS, 2008).

A área que se especializa nos estudos quantitativos da estrutura e da porosidade do solo é chamada de pedologia quantitativa. Um método quantitativo amplamente difundido na pedologia quantitativa é a utilização de imagens para medir a estrutura em seções 2-D de amostras indeformadas. Imagens do espaço poroso podem ser preparadas em várias escalas: desde imagens obtidas utilizando microscópios eletrônicos no modo de elétrons retroespehados, fotografias de lâminas delgadas, imagens fluorescentes de faces polidas de blocos impregnados, até imagens de monólitos retirados de perfis do solo impregnados in situ. A partir desses materiais, o espaço poroso pode ser medido, de modo rápido e efetivo, utilizando programas de análise de imagens em computador (CASTRO et al., 2003).

O uso de técnicas de análise de imagens nos estudos quantitativos e qualitativos de estrutura do solo tem se tornado mais comum, com maior acesso a equipamentos e programas, e maior número de pesquisadores na área (VIANA et al., 2004). Segundo Olszewski et al. (2004), a análise de imagens mostra-se sensível à detecção de mudanças na morfologia dos agregados do solo, sendo bastante promissora como uma ferramenta nos estudos da estrutura do solo.

Olszewski et al. (2004) estudaram a morfologia de agregados do solo, empregando análise de imagens de cinco sistemas de preparo do solo: plantio direto, escarificador, grade aradora, arado de discos e arado de aiveca. Os autores verificaram que, de maneira geral, os sistemas de manejo utilizados, por três anos consecutivos, não promoveram diferenças morfológicas dos agregados de um Latossolo Vermelho textura argilosa para as variáveis analisadas.

Essa técnica, associada à micromorfologia, permite o estudo quantitativo de modificações estruturais em amostras indeformadas (VIANA et al., 2004). As observações feitas com auxílio de lupa e com auxílio de microscópio de blocos polidos e de lâminas delgadas revelam certas diferenciações da geometria causadas pelo manejo, afetando a estrutura e o espaço poroso (LIMA et al., 2005; SOARES et al., 2005a).

A micromorfologia do solo é uma ferramenta que permite observar os componentes estruturais do solo na sua forma natural, possibilitando melhor visualização do comportamento da estrutura e do espaço poroso do solo, em áreas sob processo de degradação (LIMA et al., 2005). Nas lâminas delgadas e nos blocos polidos, dada a resolução do microscópio ótico ou de uma lupa, a porosidade visível é chamada de macroporosidade,

classicamente superior a 20 micra de diâmetro (CASTRO, 1999). Já Toma (2008) afirma que a análise de imagens quantifica os macro e mesoporos, considerando a proposta de Bullock et al. (1985), que divide os poros em mesoporos, com diâmetros entre 50 a 500  $\mu\text{m}$ , e macroporos, de 500 a 5000  $\mu\text{m}$ .

Segundo Cooper; Vidal-Torrado (2005) a análise de imagens classifica os poros em três grupos de acordo com sua forma: poros arredondados, que compreendem os canais e as cavidades isoladas, poros alongados, que representam as fissuras e poros complexos, que são os poros de empacotamento.

Os canais são alongados, com formas mais ou menos cilíndricas, paredes relativamente lisas, diâmetro praticamente constante na maior parte do seu comprimento e bastante interconectados com outros poros. As cavidades são relativamente grandes, com formas esféricas e alongadas, às vezes irregulares, não estando interconectados com outros. As fissuras possuem um dos seus eixos geométricos muito menor que os outros dois, paredes irregulares sendo formados pela contração do solo. Os poros de empacotamento, que resultam da aproximação de grãos de material grosseiro ou agregados, são irregulares, orientados ao acaso e fortemente interconectados (CASTRO et al., 2003).

Cooper; Vidal-Torrado (2005) fizeram a caracterização morfológica, micromorfológica e físico-hídrica de um solo com horizonte B nítico e, encontraram predominância de poros arredondados em todos os horizontes estudados. A proporção de poróides alongados encontrados em todos os horizontes foi a mesma, com maior presença de tamanhos grandes nos horizontes Bt. A porosidade complexa diminuiu em direção do Bt, com exceção do horizonte Bw<sub>1</sub> onde se observou uma presença importante desta porosidade e de tamanho grande. Nos dois perfis estudados ocorreu relação inversa entre os poróides arredondados e complexos, ou seja, onde houve uma proporção de poróides complexos alta a proporção de poróides arredondados foi menor, enquanto onde a porosidade complexa foi baixa a proporção da porosidade arredondada foi alta.

Os resultados obtidos em estudos micromorfológicos por Lima et al. (2005) mostram que o aumento na diversidade de poros está diretamente relacionado com os processos de degradação da estrutura do solo, e que o estudo da ocorrência das classes de poros pela análise de imagens foi mais eficiente na identificação da compactação do solo em estádios iniciais, do que os dados de densidade do solo, além de mostrar maior porosidade

total na área de mata, sendo todos os poros oriundos de atividade biológica, em comparação com pomar de laranja.

Análises de imagens foram utilizadas por Soares et al. (2005a) para avaliar a micromorfologia de solos cultivados sob sistema tradicional de manejo. As análises mostraram a presença de estruturas modificadas pelo uso agrícola, em subsuperfície, com alterações estruturais observadas pela modificação na geometria dos poros, surgindo poros planares, bem como estruturas em blocos. Nos setores mais afetados pela ação antrópica, em subsuperfície, foram observadas alterações na quantidade e na forma dos poros, com a fissuração de agregados, surgimento de blocos subangulares e porosidade com geometria modificada, em comparação com as camadas mais profundas.

Soares et al. (2005b) avaliaram possíveis alterações físicas e morfológicas, pela análise de imagens, em solos cultivados com citros e cana-de-açúcar sob sistema tradicional de manejo e, constataram que nos solos cultivados com citros, em subsuperfície, há modificação da contextura matricial por achatamento de agregados e o preenchimento dos espaços poros, fazendo surgir formas fissuradas e estrutura em blocos. O sistema radicular fasciculado da cana-de-açúcar favorece o surgimento de macroporos irregulares, ao mesmo tempo em que o manejo intensivo faz surgir poros planares. Nas camadas mais profundas do solo, para ambas as culturas, ocorreram macroporos comunicantes e estruturas microagregadas.

A avaliação das alterações na macroporosidade de um Latossolo Vermelho, submetido ao cultivo de café, milho e eucalipto, evidenciou a formação de fissuras paralelas na superfície (0,10 - 0,15m) na área com milho e, nas áreas cultivadas com café e eucalipto, a distribuição de poros mostrou-se homogênea, com a predominância de câmaras e cavidades na área com eucalipto e cavidades e canais na área com café (MORAES, 2006).

Souza et al. (2006), avaliando a relação entre atributos micromorfológicos e físicos de um Latossolo Vermelho eutroférico, sob cultivo de cana-de-açúcar, e verificaram que os altos valores da densidade do solo, microporosidade e resistência do solo à penetração, e os baixos valores da macroporosidade, porosidade total e condutividade hidráulica do solo saturado, principalmente no horizonte AB, concordaram com os resultados obtidos por meio da análise de imagens, em que se observou menor porosidade

total e maior distribuição de poros arredondados nesse horizonte, resultados que confirmaram a ocorrência de compactação do solo pela análise de imagens.

Gomes (2008), ao utilizar a análise de imagens para estudar a porosidade de um Latossolo Vermelho textura argilosa, sob pastagem, mata, cultivo convencional de batata irrigado via pivô central e cultivo convencional de batata irrigado via canhão, observou predominância de poros do tipo arredondados com menores proporções de poros alongados.

### 3 MATERIAL E MÉTODOS

#### 3.1 Material

##### 3.1.1 Solo

Como base para o presente estudo foram utilizadas amostras de um Latossolo Vermelho distroférico textura argilosa, de acordo com os critérios da EMBRAPA (2006), coletadas na camada de 0-20 cm, sob condição de mata, em área localizada na Fazenda Experimental Lageado, pertencente à Faculdade de Ciências Agronômicas, UNESP, Campus de Botucatu-SP, localizada geograficamente nas coordenadas 22°49' Latitude Sul e 48°25' Longitude Oeste, com altitude média de 786 metros. A caracterização granulométrica do solo na camada de 0-20cm consta da tabela 1.

Tabela 1. Caracterização granulométrica do solo na camada de 0-20 cm.

Solo	Areia			Argila	Silte	Classe de Textura
	Grossa	Fina	Total			
	g kg <sup>-1</sup>					
LV	80	155	235	591	174	argilosa

### 3.1.2 Material orgânico

Para adicionar matéria orgânica ao solo dois materiais orgânicos foram selecionados: um designado como condicionador de solo, com fórmula definida, e outro constituído apenas por serragem. O condicionador comercial, conhecido como BIOMIX<sup>®</sup>, possui na sua fórmula cama de frango, farelo de soja e resíduos orgânicos agroindustriais de origem controlada. Consta na tabela 2 a caracterização granulométrica dos materiais orgânicos.

Tabela 2. Caracterização granulométrica dos materiais orgânicos.

Material Orgânico	Tamanho das partículas (mm)						
	4,0 -2,0	2,0 – 1,0	1,0 – 0,5	0,5 – 0,25	0,25 – 0,1	0,1 – 0,05	< 0,05
	%						
Serragem	25,51	17,83	29,83	18,48	5,81	1,09	1,41
BIOMIX <sup>®</sup>	68,19	21,60	7,33	1,98	0,57	0,06	0,28

### 3.1.3 Aparelho de Proctor

Para a realização do ensaio normal de compactação foi utilizado o aparelho de Proctor, da Solotest. O aparelho consiste de um extrator de amostra, um cilindro metálico de volume igual a 1 litro e colar complementar, base de engate do cilindro, parafusos de fixação, soquete de 2,5 kg e talhador de amostra (Figura 1). Para realizar o ensaio foi utilizado o soquete de 2,5 kg caindo de uma altura de 30 cm, compactando a amostra de solo, em 3 camadas, com 25 golpes. O cilindro é provido de um anel sobressalente para prender o excesso de material, o qual é retirado depois de completada à compactação.



Figura 1. Componentes do aparelho de Proctor.

### 3.1.4 Prensa hidráulica e anéis de PVC

Para a compactação das amostras foram utilizados três anéis de PVC rígido com 3,5 cm de altura e 10 cm de diâmetro, colocados em uma prensa hidráulica adaptada. A prensa hidráulica da marca EMIG (Figura 2), modelo PHS 15-L, apresenta uma coluna de barra rosqueada em aço carbono ABNT 1040, estruturas superior e inferior em U com aço ABNT 1020. O sistema de prensagem é composto de um macaco hidráulico, acoplado manualmente através de alavanca com capacidade de até  $3.000 \text{ KN m}^{-2}$ . A adaptação constitui em uma ponteira de aço com 30,0 cm de comprimento e 5,0 cm de diâmetro, com rosca interna para acoplamento ao eixo central do macaco hidráulico, e uma chapa de aço circular com 10 cm de diâmetro e 2 cm de espessura, fixada na extremidade da ponteira. Além de uma régua acoplada para marcar o deslocamento do macaco, em centímetros.

Para suportar os anéis de PVC rígidos, preenchidos com solo, e assim evitar deformações indesejadas, foi utilizado um suporte de aço cilíndrico com 30,0 cm de altura e 10,5 cm de diâmetro interno.



Figura 2. Prensa hidráulica utilizada para compactação das amostras de solo e suporte de aço para a acomodação dos tubos de PVC.

### 3.1.5 Impregnação das amostras com resina e análise de imagens

A mistura para a impregnação das amostras foi obtida utilizando solvente, conhecido como Tinner, catalisador, pigmento sensível a luz ultravioleta UVITEX® e resina de poliéster. Caixas de papel cartão revestidas internamente com papel alumínio serviram de suporte para acomodação das amostras que receberam a mistura. As caixas, devidamente preenchidas, foram colocadas no interior de um dissecador ligado a uma bomba de vácuo (Figura 3).

Para a obtenção das imagens foi utilizada uma câmera fotográfica anexada a uma lupa a qual se interligava a um computador. As imagens foram processadas utilizando o programa Visilog 5.4 (Noesis).

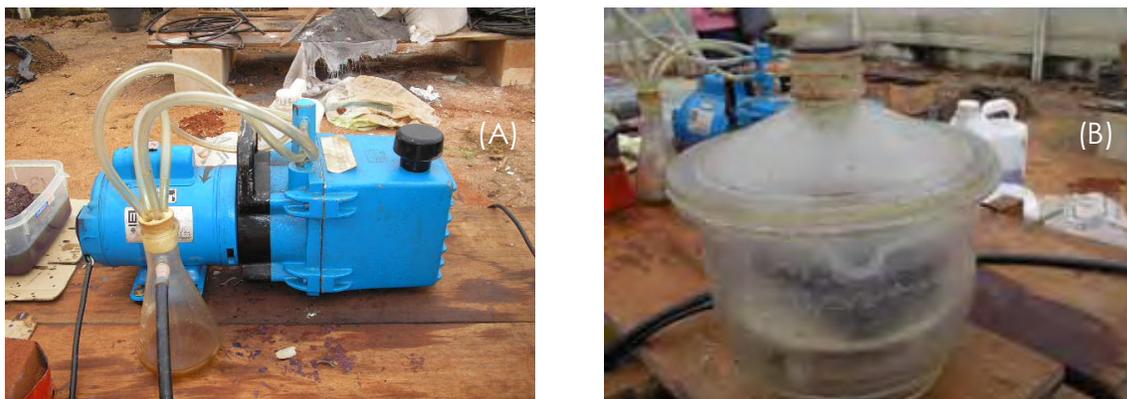


Figura 3. Bomba de vácuo (A) e dissecador (B) utilizados na impregnação das amostras.

### 3.1.6 Permeâmetro de carga variável

Para a análise da condutividade hidráulica foi utilizado um permeâmetro de carga variável, constituído por um suporte munido de nível, destinado a nivelar horizontalmente a mesa de ensaio, com aberturas para encaixe das cubas que alojam os cilindros, as conexões das amostras com os tubos e os tubos por onde a água infiltra (Figura 4). Para marcar o tempo de infiltração da água na amostra foi utilizado um cronômetro analógico.



Figura 4. Permeâmetro de carga variável.

### 3.1.7 Penetrômetro eletrônico

O penetrômetro eletrônico utilizado (Marconi-modelo MA 933) é composto por uma célula de carga com capacidade nominal de 20 kg, acoplada na extremidade de um braço mecânico, movimentado verticalmente por uma rosca-sem-fim. Uma haste metálica, com diâmetro de 6 mm e com ponteira cônica com semi-ângulo de 30° e área da base de 0,1256 cm<sup>2</sup>, foi utilizada para penetrar as amostras. O aparelho é diretamente ligado a um computador, portanto, as leituras são obtidas por meio de um sistema automatizado de aquisição de dados e armazenados em arquivos de extensão “txt” (Figura 5).



Figura 5. Penetrômetro eletrônico.

## 3.2 Métodos

### 3.2.1 Experimento e delineamento experimental

O experimento foi conduzido em laboratório, no Departamento de Recursos Naturais – Área de Ciência do Solo, na Faculdade de Ciências Agronômicas – UNESP, Botucaatu-SP.

O delineamento experimental empregado foi o inteiramente casualizado, constituído por 32 tratamentos, em esquema fatorial duplo 4x4, sendo para cada material orgânico quatro intensidades de compactação e quatro doses dos materiais (0, 30, 50 e 80 t ha<sup>-1</sup>), com quatro repetições.

### 3.2.2 Coleta e preparo das amostras de solo

O solo foi coletado na camada superficial, entre 0 e 20 cm, seco ao ar e passado em peneira de malha de 4 mm. As diferentes doses dos compostos orgânicos foram adicionadas ao solo e o material mantido em repouso por aproximadamente 30 dias.

### 3.2.3 Curva de densidade do solo versus o teor de água

O ensaio de Proctor normal (ABNT, 1986) permitiu caracterizar uma umidade para compactar o solo, sendo essa umidade correspondente a densidade máxima do solo, já que, a partir de uma determinada quantidade de água acrescentada ao solo, aplicando-se a compactação, a água é expulsa dos poros diminuindo, portanto, a densidade.

Durante a realização do ensaio de Proctor normal foram obtidos cinco valores para a massa de solo seco, as quais foram pesadas após a realização da compactação com um soquete, e cinco valores de umidade do solo correspondentes. Após obter esses valores foram calculadas as densidades do solo.

De posse desses parâmetros, umidade/densidade seca (umidade em %), os valores obtidos foram levados a um gráfico cartesiano, onde a abscissa corresponde ao teor de água e a ordenada à densidade do solo (Figura 6). Foi, assim, desenhada uma curva obtendo-se o ponto onde se produz um máximo que corresponde à densidade seca máxima e a umidade ótima (ABNT, 1986). No caso do Latossolo Vermelho textura argilosa, a densidade máxima atingida foi de  $1,44 \text{ g cm}^{-3}$  e a umidade correspondente foi de 30,82 %.

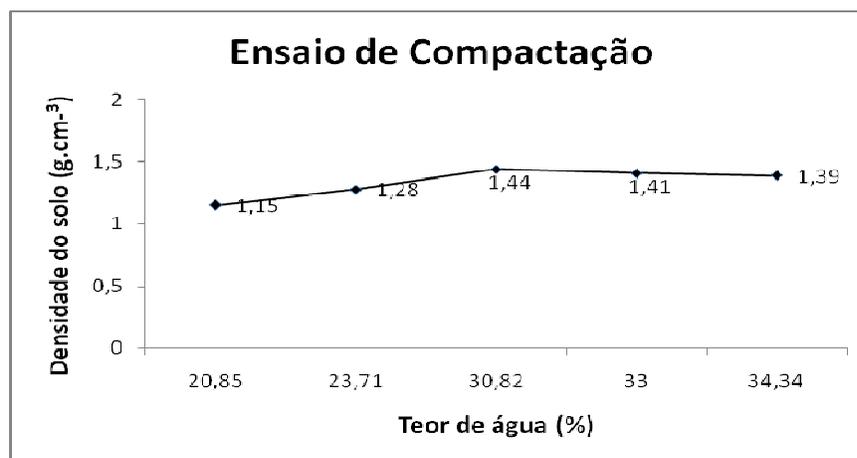


Figura 6. Curva de densidade do solo versus o teor de água.

### **3.2.4 Compactação das amostras de solo**

Após o período de repouso de 30 dias, a mistura de solo e material orgânico foi passada em peneira de malha de 4 mm e seu conteúdo de água determinado e corrigido para 27%. Não se adotou o conteúdo de umidade determinado pelo ensaio de Proctor normal, que era de 30,82%, pois, ao se adotar cargas crescentes, ocorria expulsão da água do solo, fato que foi evitado empregando o teor de água de 27%.

Foram utilizados três tubos de PVC sobrepostos. Os dois primeiros tubos foram apenas utilizados para a acomodação do solo, a fim de simular a pressão exercida pelas camadas superficiais do solo. O terceiro tubo foi escolhido para determinação das propriedades físicas avaliadas.

Para a realização da compactação 1.100g do material foi umedecido para o preenchimento dos três tubos de PVC. O material foi colocado de 150 em 150g e prensado, para promover acomodação do mesmo. Após acomodação do solo, este foi compactado com o auxílio de uma prensa hidráulica. O deslocamento em centímetros da ponteira de aço foi a base para a obtenção das intensidades de compactação. Esse deslocamento foi realizado com o auxílio de uma régua acoplada na ponteira (Figura 2). Para a intensidade de compactação 1 o deslocamento da ponteira foi de 7,5 cm; já para as intensidades 2, 3 e 4 o deslocamento foi de 9,0 cm; 9,5 cm e 10,5 cm, respectivamente.

### **3.2.5 Impregnação das amostras com resina**

Após a realização da compactação as amostras foram mantidas em repouso, por aproximadamente um mês, para secagem das mesmas, garantindo que o espaço poroso do solo só estaria preenchido por ar. A secagem lenta teve a finalidade de evitar contrações drásticas, que podem causar aparecimentos de artefatos, como rachaduras ou quebra das amostras (CASTRO et al., 2003).

A resina utilizada foi a de poliéster, que é mais comumente utilizada para este tipo de trabalho (CASTRO et al., 2003). O material foi preparado a partir da mistura de 500 mL de resina, 250 mL de Tinner, 25 gotas de catalisador e 1,50 g de pigmento sensível a luz ultravioleta "UVITEX<sup>®</sup>". As amostras compactadas foram colocadas dentro de caixas de papel cartão, revestidas internamente com papel alumínio e acondicionadas em dissecador para saturação com resina. No final do processo a amostra foi totalmente coberta com resina.

A caixa contendo a amostra foi colocada em um dissecador e submetida à vácuo. A resina foi adicionada aos poucos, a fim de impregnar totalmente as amostras. A utilização do ambiente a vácuo deve-se ao princípio de que, os poros do solo só estão preenchidos de ar e, à medida que este é expulso, ocorre entrada da resina no espaço poroso, processo que é facilitado com a diminuição da viscosidade da resina.

### **3.2.6 Determinação das propriedades físicas do solo**

Para obtenção da densidade do solo e da porosidade foi utilizado o último dos três tubos de PVC, porém, a condutividade hidráulica e a resistência à penetração foram obtidas numa subamostra, não deformada, retirada do tubo de PVC, com o auxílio de um anel de aço de 2,5 cm de altura e 5 cm de diâmetro.

#### **3.2.6.1 Determinação da densidade do solo**

Para a análise da densidade do solo foi utilizado o último cilindro de PVC, devidamente desbastado, ou seja, retirou-se o excesso de solo das extremidades com auxílio de uma faca. A amostra foi pesada e obtida sua massa úmida, da qual foi subtraída a umidade de 27%, obtendo-se o valor da massa seca. De posse dos valores de massa seca e volume do tubo de PVC a densidade do solo foi calculada de acordo com a equação:

$$D = M_s / V$$

Sendo:

$M_s$  = massa da amostra seca (g)

$V$  = volume da amostra (cm<sup>3</sup>)

#### **3.2.6.2 Determinação da porosidade do solo**

Para análise da porosidade do solo foram utilizados dois métodos. O método da mesa de tensão, descrito por Kiehl (1979) e pela EMBRAPA (1997), e o método da análise de imagens, descrito por Castro (1985).

Para a avaliação da porosidade, pelo método da análise de imagens, uma das repetições das amostras compactadas foi separada e colocada para secar durante um mês. As amostras foram impregnadas com resina. Após a cura, foi efetuado o corte das amostras com serra de disco diamantado. Os blocos foram devidamente lixados até atingir uma espessura de, aproximadamente, 2 cm. Posteriormente, foram polidos para obtenção de uma superfície mais lisa que proporcionasse uma melhor visualização da porosidade.

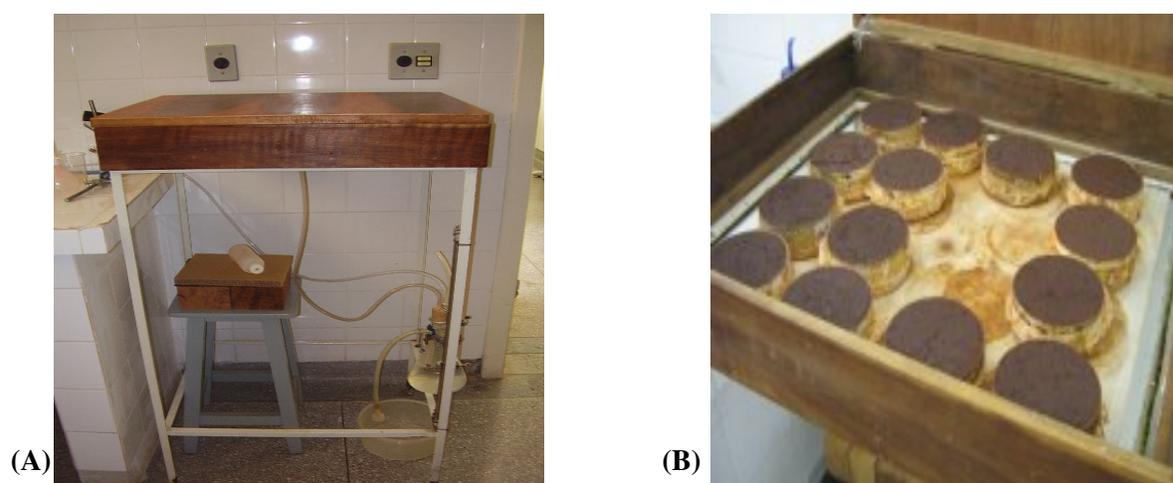


Figura 7. Mesa de tensão(A) e amostras compactadas de solo na mesa de tensão (B).

As imagens digitalizadas foram adquiridas a partir dos blocos polidos utilizando uma câmera digital em cores, em sistema “charged couple device” (CCD), interligada a uma lupa, em ambiente escuro, sob luz ultravioleta, para destacar o espaço poroso da matriz do solo, devido a presença do pigmento fluorescente. As imagens foram digitalizadas em resolução de 1.024 x 768 pixels, com resolução espectral de 56 tons de cinza, em aumento de 10X e igualando um pixel a  $156,25 \mu\text{m}^2$ . As imagens foram processadas pelo programa Visilog 5.4 (Noesis). A porosidade do solo (P) foi calculada com a soma das áreas de todos os poros dividida pela área total da imagem, em porcentagem. Os poros foram divididos quanto ao tamanho e quanto à forma. Quanto ao tamanho foram separados em poros pequenos, com área entre  $156$  e  $15600 \mu\text{m}^2$ ; poros médios, com área entre  $15600$  e  $156000 \mu\text{m}^2$  e poros grandes, com área maior que  $156000 \mu\text{m}^2$  e, quanto à forma, os poros foram divididos em arredondados (Arr.), alongados (Alon.) e complexos (Comp.).

Dois índices foram utilizados para determinar a forma dos poros segundo Cooper (1999). O índice  $I_1$  (Equação 1) separa os poros arredondados de poros alongados e de poros complexos. O índice  $I_2$  (Equação 2) classifica os poróides em alongados e complexos.

$$I_1 = P^2 / (4 \pi A) \quad \text{Equação 1}$$

Sendo:

$P$  = perímetro ( $\mu\text{m}$ );

$A$  = área ocupada pelo poróide ( $\mu\text{m}^2$ ).

$$I_2 = \frac{\frac{1}{m} \sum_i (N_i) i}{\frac{1}{n} \sum_j (D_F) j} \quad \text{Equação 2}$$

Sendo:

$m$  = número de direções  $i$  nas quais é calculado o número de interceptos  $N_i$ , ( $i = 0^\circ, 45^\circ, 90^\circ$  e  $135^\circ$ );

$n$  = número de direções  $j$  nas quais são calculados os diâmetros de Féret ( $D_F$ ), ( $j = 0^\circ$  e  $90^\circ$ ).

Canais, cavidades isoladas e poros tubulares pertencem à categoria de poros com índice de forma  $I_1 \leq 5$  e definem a classe morfológica de poros arredondados. Os poros que resultam da assembléia de agregados ou de partículas elementares e de poros de diversos tipos, interconectados, formando, nos dois casos, uma rede poral de tamanho grande de formas muito contornadas, pertencem à categoria de poros caracterizada por um índice de forma  $I_1 > 25$  e define os poros de forma complexa (Comp). Dentro da gama de índices de forma  $I_1$ , compreendido entre 5 e 25, coexistem poros alongados e poros de forma complexa,

de tamanho menor, em geral, que os precedentes. Neste caso, o índice  $I_2$  foi elaborado para separar os limites do índice  $I_1$ , o qual permitiu melhor discriminar os poros alongados  $I_2 \leq 2,2$  e os poros complexos  $I_2 > 2,2$  (SOUZA et al., 2006). Segundo Cooper; Vidal-Torrado (2005), os poros arredondados abrangem os canais e cavidades isoladas, já os poros alongados correspondem às fissuras e os poros complexos são os poros de empacotamento.

### 3.2.6.3 Determinação da condutividade hidráulica (K)

A condutividade hidráulica ou permeabilidade foi determinada pelo método do permeâmetro de carga variável. Para calcular a velocidade de infiltração da água determinou-se, com o auxílio de um cronômetro, o tempo de infiltração.

Para a obtenção do coeficiente de permeabilidade ou a determinação da condutividade hidráulica saturada, foi empregada a equação de Darcy (Equação 3):

$$K = (a l / A t) \ln (H_1 / H_2) \quad \text{Equação 3}$$

Sendo:

$k$  = coeficiente de permeabilidade ou de condutividade hidráulica saturada ( $\text{cm s}^{-1}$ ),

$a$  = área de seção transversal do tubo do permeâmetro ( $\text{cm}^2$ ),

$l$  = altura da amostra (cm),

$A$  = área de seção transversal da amostra ( $\text{cm}^2$ ),

$t$  = tempo de infiltração (s),

$H_1$  = altura da amostra + referência inicial ( $H_1$ ) do tubo do permeâmetro (cm),

$H_2$  = altura da amostra + referência final ( $H_2$ ) do tubo do permeâmetro (cm).

### 3.2.6.4 Determinação da resistência do solo à penetração

Para a determinação da resistência do solo à penetração, a velocidade de deslocamento vertical da haste do penetrômetro eletrônico empregada foi de  $1,0 \text{ cm min}^{-1}$ , até a profundidade de 3,0 cm. As medidas obtidas a partir da superfície da amostra, para cada segundo de penetração da ponteira, até 0,5 cm de profundidade, foram descartadas (TORMENA et al., 1998). Foram obtidos 100 valores, em  $\text{kgf cm}^{-2}$ , dos quais foi retirado um

valor médio de resistência à penetração por amostra e esse valor multiplicado pelo fator de 0,098 para transformação em MPa. As leituras foram obtidas por meio de um sistema automatizado de aquisição de dados e armazenados em arquivos de extensão “txt”.

### **3.2.7 Análises estatísticas**

Para a análise estatística utilizou-se o programa Sisvar versão 4.6 (2003) e realizou-se análise de variância, de regressão e teste de comparação de médias (Tukey) para o efeito das diferentes doses e intensidades de compactação e a interação entre elas para as análises de rotina. Sendo o teste F da variância da regressão significativo a 5 %.

## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Densidade do solo

Os valores da análise de variância, para a densidade do solo (Tabela 3), mostraram diferença significativa na avaliação da interação entre as doses e as intensidades de compactação, tanto para os tratamentos com adição de serragem quanto com a adição de BIOMIX<sup>®</sup>.

Tabela 3. Análise de variância para os valores de densidade do solo.

FV	G.L.	S.Q.	Q.M.	Fc	Pr>Fc
Serragem					
DOSES (A)	3	0,085240	0,028413	18,282	0,0000
INTENSIDADE (B)	3	0,635756	0,211919	136,35	0,0000
INTERAÇÃO A X B	9	0,043969	0,004885	3,143	0,0079 **
erro	32	0,049733	0,001554		
C.V. = 3,26					
BIOMIX <sup>®</sup>					
DOSES (A)	3	0,110617	0,036872	52,055	0,0000
INTENSIDADE (B)	3	0,767667	0,255889	361,255	0,0000
INTERAÇÃO A X B	9	0,034217	0,003802	5,367	0,0002 **
erro	32	0,022667	0,000708		
C.V. = 2,21					

\*\* significativo a 1 % de probabilidade

Os valores de densidade do solo são maiores nos tratamentos sem adição de material orgânico (0 t.ha<sup>-1</sup>) a partir da intensidade de compactação 2 e em todas as doses de ambos os materiais na intensidade de compactação 4, chegando a atingir densidade

do solo igual a  $1,45 \text{ g cm}^{-3}$ . A densidade normalmente encontrada em solos argilosos varia entre  $1,0$  a  $1,25 \text{ g.cm}^{-3}$ , valores acima de  $1,25 \text{ g.cm}^{-3}$  podem indicar a ocorrência de compactação no solo (KIEHL, 1979). Segundo Vasconcelos et al. (2004), para um Latossolo Vermelho textura argilosa com teor de argila em torno de 60%, a densidade de  $1,45 \text{ g.cm}^{-3}$  é muito alta, podendo ser prejudicial ao desenvolvimento das plantas.

Tabela 4. Resultados da análise de densidade do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ ), referente às amostras manejadas com diferentes doses dos materiais orgânicos e submetidas às diferentes intensidades de compactação.

Dose ( $\text{t ha}^{-1}$ )	Intensidade de Compactação			
	1	2	3	4
Serragem				
0	1,04aD	1,27aC	1,36aB	1,45aA
30	1,05aB	1,22abA	1,23bA	1,28bA
50	0,99aC	1,12cB	1,25bA	1,32bA
80	1,05aC	1,16bcB	1,23bB	1,33bA
BIOMIX <sup>®</sup>				
0	1,04aD	1,27aC	1,36aB	1,45aA
30	1,05abD	1,18bC	1,26bB	1,34bA
50	0,99abC	1,15bB	1,25bA	1,28cA
80	0,99bD	1,08cC	1,22bB	1,35bA

Médias seguidas pela mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

Com o incremento na intensidade de compactação ocorreu aumento na densidade do solo, para todas as doses de material orgânico adicionadas, tanto nos tratamentos manejados com serragem quanto nos manejados com Biomix<sup>®</sup> (Tabela 4 e Figura 8). Quando o solo sofre uma compressão ocorre diminuição no seu volume, devido ao rearranjo mais denso das partículas, e redução do seu espaço poroso, ocasionando maior densidade do solo, conforme comentam Jorge (1985) e Curi (1993). O aumento no valor de densidade do solo como resultado do processo de compactação, que causa a aproximação das partículas sólidas do solo, também foi verificado por alguns autores como Moraes (1988), Foloni (1999), Stone et al. (2002), Foloni et al. (2003), quando estudaram o efeito de diferentes intensidades de compactação com o auxílio de equipamentos laboratoriais e, por Silva et al. (2003), Streck et al. (2004) e Freddi et al. (2007), em condições de campo, com compactação resultante da passagem de máquinas.

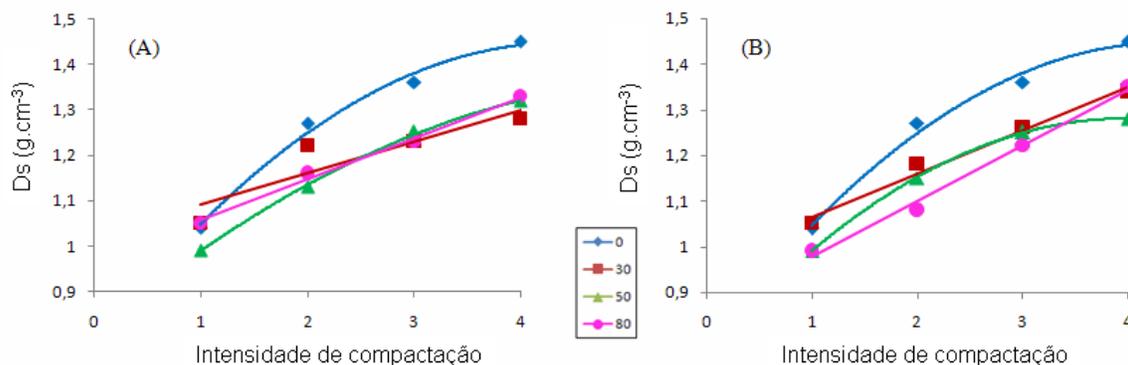


Figura 8. Variação da densidade do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ ), em função da intensidade de compactação, para as diferentes doses de serragem (A) e BIOMIX<sup>®</sup> (B).

Na tabela 5 estão os modelos ajustados das curvas de regressão da densidade do solo ( $D_s$ ), apresentadas na figura 8, para a variação entre as intensidades de compactação dentro de uma mesma dose.

Tabela 5. Modelos ajustados da densidade do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ ) para a variação entre as intensidades de compactação dentro de uma mesma dose.

Dose ( $\text{t ha}^{-1}$ )	Equação <sup>(1)</sup>	$b_1$	$b_2$	$R^2$ (%)
Serragem				
0	$Y = -0,035x^2 + 0,307x + 0,775$	0,0000	0,0062	98,95**
30	$Y = -0,03x^2 + 0,22x + 0,87$	0,0006	0,0128	93,36*
50	$y = 0,111x + 0,895$	0,0036	0,2222	97,98**
80	$y = 0,091x + 0,965$	0,0539	0,6634	99,30**
BIOMIX <sup>®</sup>				
0	$Y = -0,035x^2 + 0,307x + 0,775$	0,0000	0,0001	98,95**
30	$y = 0,095x + 0,97$	0,0002	0,0923	98,37**
50	$y = -0,0325x^2 + 0,2595x + 0,7625$	0,0000	0,0001	99,99**
80	$y = 0,122x + 0,855$	0,0903	0,1682	99,23**

\*\* significativo a 1 % de probabilidade; \* significativo a 5 % de probabilidade.

(1)  $y$ . densidade do solo em  $\text{g cm}^{-3}$ ,  $x$ . intensidade de compactação,  $b^1$ . coeficiente de  $x$  e,  $b^2$ . coeficiente de  $x^2$ .

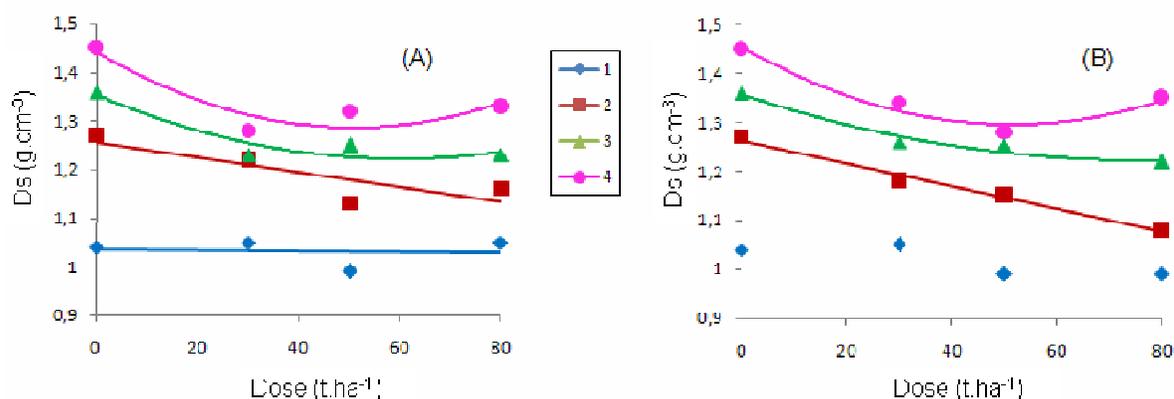


Figura 9. Variação da densidade do solo ( $\text{g cm}^{-3}$ ), em função das doses de serragem (A) e BIOMIX<sup>®</sup> (B), para as diferentes intensidades de compactação.

Na Figura 9, para a intensidade 1, ou seja, solo sem compactação, os valores de densidade do solo, nas diferentes doses de serragem, não diferiram entre si estatisticamente. Nas intensidades de compactação 2, 3 e 4 com o aumento na dose de serragem e de BIOMIX<sup>®</sup> ocorreu uma redução significativa na densidade do solo.

A matéria orgânica possui menor densidade de partículas em relação às partículas minerais (KIEHL, 1979), contribuindo para diminuição na densidade do solo. Com relação à compactação, a presença do material orgânico entre as partículas e agregados do solo ameniza os efeitos desta na densidade do solo, à medida que impede uma perfeita aproximação das partículas minerais. Além disso, como a matéria orgânica tem alto poder de adsorção de água, ocorre diminuição no teor de água ao redor das partículas, contribuindo, portanto, para que o solo não alcance o conteúdo de água ideal para causar compactação (BRADY, 1989 e MORAES et al., 1995).

Essa atuação benéfica do material orgânico, além de ser observada na figura 9, pode ser verificada quando se compara, por exemplo, a densidade do solo do tratamento sem adição dos materiais, na intensidade 4 de compactação, com a média obtida para as doses dos materiais orgânicos adicionados ao solo. A densidade do solo diminuiu de  $1,45 \text{ g cm}^{-3}$  para  $1,31 \text{ g cm}^{-3}$  e, de  $1,45 \text{ g cm}^{-3}$  para  $1,32 \text{ g cm}^{-3}$ , respectivamente, para os tratamentos com adição de serragem e de Biomix<sup>®</sup>.

Tanto nos tratamentos com adição de serragem como de Biomix<sup>®</sup>, para as diferentes intensidades de compactação, a adição de 30 t ha<sup>-1</sup> foi suficiente para amenizar os efeitos da compactação na densidade do solo.

Na tabela 6 estão os modelos ajustados das curvas de regressão da densidade do solo (Ds), apresentadas na figura 9, para a variação entre as doses dentro de uma mesma intensidade de compactação.

Tabela 6. Modelos ajustados da densidade do solo (g cm<sup>-3</sup>) para a variação entre as doses dentro de uma mesma intensidade de compactação.

Intensidade de Compactação	Equação <sup>(1)</sup>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	R <sup>2</sup> (%)
Serragem				
1	ns	-	-	-
2	$y = -0,0016x + 1,2574$	0,0059	0,0765	70,61**
3	$y = 4E-05x^2 - 0,0044x + 1,3538$	0,0011	0,0153	88,89*
4	$y = 7E-05x^2 - 0,0069x + 1,4524$	0,0000	0,0005	88,89**
BIOMIX <sup>®</sup>				
1	$y = -0,0008x + 1,0481$	0,3288	0,9143	64,66**
2	$y = -0,0023x + 1,2629$	0,0018	0,4533	98,69**
3	$y = 2E-05x^2 - 0,0035x + 1,3571$	0,0003	0,0296	97,34*
4	$y = 6E-05x^2 - 0,0062x + 1,4541$	0,0000	0,0000	96,13**

\*\* significativo a 1 % de probabilidade; \* significativo a 5 % de probabilidade

<sup>(1)</sup> y. densidade do solo em g.cm<sup>-3</sup>, x. doses, b<sup>1</sup>. coeficiente de x e, b<sup>2</sup>. coeficiente de x<sup>2</sup>.

## 4.2 Porosidade Total

Os valores da análise de variância para a porosidade total (Tabela 7), mostraram diferença significativa na avaliação da interação entre as doses e as intensidades de compactação, tanto para os tratamentos com adição de serragem, quanto com a adição de BIOMIX<sup>®</sup>.

Tabela 7. Análise de variância para os valores de porosidade total.

FV	G.L.	S.Q.	Q.M.	Fc	Pr>Fc
Serragem					
DOSES (A)	3	268,521650	89,507217	8,317	0,0001
INTENSIDADE (B)	3	1875,874475	625,291492	58,099	0,0000
INTERAÇÃO A X B	9	746,112325	82,901369	7,703	0,0000 **
Erro	48	516,596850	10,762434		
C.V. = 5,65%					
BIOMIX <sup>®</sup>					
DOSES (A)	3	258,159463	86,053154	6,145	0,0013
INTENSIDADE (B)	3	5162,238113	1720,746038	122,883	0,0000
INTERAÇÃO A X B	9	366,863850	40,762650	2,911	0,0078**
Erro	48	672,149950	14,003124		
C.V. = 6,36%					

\*\* significativo a 1 % de probabilidade

Os valores de porosidade total, na intensidade de compactação 1, variaram entre 61 e 75 % (Tabela 8), valores que podem ser considerados elevados, uma vez que, para solos minerais em condições de campo, os valores, normalmente, estão entre 40 a 65 % (PREVEDELLO, 1996), sendo poucas vezes encontrados valores acima desses, que caracterizam solos ricos em matéria orgânica. Os valores observados podem ser atribuídos ao fato de que o solo foi peneirado e preparado em tubos de PVC, para representar valores de densidade do solo próximos de  $1 \text{ g cm}^{-3}$ .

A porosidade total diminuiu com o aumento na intensidade de compactação, para ambos os materiais orgânicos utilizados (Tabela 8 e Figura 10), resultado que está de acordo com os obtidos por Borges et al. (1999), Streck et al. (2004) e Soares et al. (2005). Como a porosidade total é afetada pelo arranjo das partículas do solo, quando este é submetido a uma pressão, como ocorre no processo de compactação, as partículas tendem a se rearranjar de forma mais densa (REICHARDT & TIMM, 2004) afetando a quantidade, o tamanho e a orientação dos poros (BERTONI & LOMBARDI NETO, 1990 e RICHART et al., 2005).

Tabela 8. Resultados da análise da porosidade total (%), referentes às amostras manejadas com diferentes doses dos materiais orgânicos e submetidas às diferentes intensidades de compactação.

Dose (t ha <sup>-1</sup> )	Intensidade de Compactação			
	1	2	3	4
Serragem				
0	72,01aA	61,11aB	50,56bC	47,17bC
30	61,87bA	52,84bB	57,34aAB	57,00aAB
50	72,23aA	62,46aB	56,94aBC	54,23aC
80	61,04bA	56,61abAB	54,12abB	52,03abB
BIOMIX <sup>®</sup>				
0	72,01aA	61,11aB	50,56aC	47,17aC
30	72,93aA	61,6aB	51,55aC	45,35aC
50	70,57aA	52,2bB	55,86aB	50,35aB
80	75,18aA	65,61aB	56,84aC	51,38aC

Médias seguidas pela mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

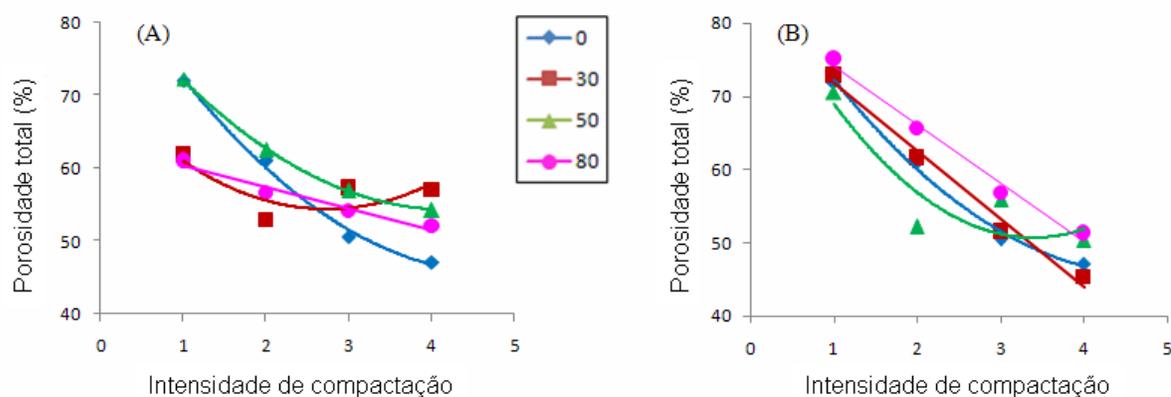


Figura 10. Variação da porosidade total (%), em função da intensidade de compactação, nas diferentes doses de serragem (A) e BIOMIX<sup>®</sup> (B).

Na tabela 9 estão os modelos ajustados das curvas de regressão de porosidade total, apresentadas na figura 10, para a variação entre as intensidades de compactação dentro de uma mesma dose.

Tabela 9. Modelos ajustados da porosidade total (%) para a variação entre as intensidades de compactação dentro de uma mesma dose.

Dose (t ha <sup>-1</sup> )	Equação <sup>(1)</sup>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	R <sup>2</sup> (%)
Serragem				
0	$y = 1,8775x^2 - 17,894x + 88,367$	0,0001	0,0254	99,39*
30	$y = 2,1725x^2 - 11,874x + 70,652$	0,0064	0,0109	58,71*
50	$y = 1,765x^2 - 14,777x + 85,17$	0,0009	0,0367	99,95*
80	$y = -2,952x + 63,33$	0,1647	0,4791	96,70**
BIOMIX <sup>®</sup>				
0	$y = 1,8775x^2 - 17,894x + 88,367$	0,0004	0,0487	99,39*
30	$y = -9,279x + 81,055$	0,0013	0,1359	98,42**
50	$y = 3,215x^2 - 21,775x + 87,57$	0,0000	0,0012	80,72**
80	$y = -8,017x + 82,295$	0,0079	0,2767	98,61*

\*\* significativo a 1 % de probabilidade; \* significativo a 5 % de probabilidade.

(1) y. porosidade em %, x. intensidade de compactação, b<sup>1</sup>. coeficiente de x e, b<sup>2</sup>. coeficiente de x<sup>2</sup>.

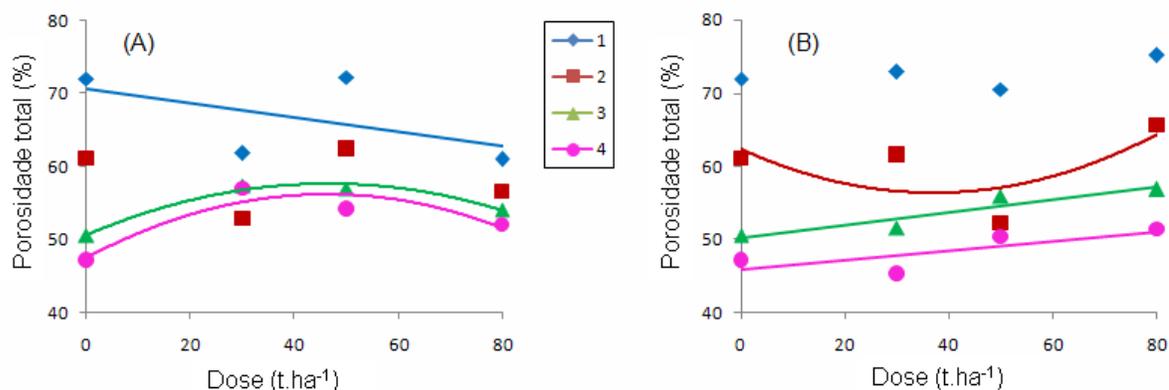


Figura 11. Variação da porosidade total (%), em função das doses de serragem (A) e BIOMIX<sup>®</sup> (B) nas diferentes intensidades de compactação.

A variação na porosidade total, em função da adição dos materiais, evidencia que a partir da 3<sup>a</sup> intensidade de compactação a adição das diferentes doses de serragem e de Biomix<sup>®</sup> contribuiu para a elevação da porosidade total, em relação ao solo sem adição de material orgânico (Figura 11). Essa atuação dos materiais orgânicos está relacionada

à formação e estabilidade dos agregados do solo (BAYER e MIELNICZUK, 2008) e à capacidade de dissipar parte da energia compactante, quando o solo é submetido a diferentes sistemas de manejo (BRAIDA et al., 2006).

Na tabela 10 estão os modelos ajustados das curvas de regressão de porosidade total, apresentadas na figura 11, para a variação entre as doses dentro de uma mesma intensidade de compactação.

Tabela 10. Modelos ajustados da porosidade total (%) para a variação entre as doses dentro de uma mesma intensidade de compactação.

Intensidade de Compactação	Equação <sup>(1)</sup>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	R <sup>2</sup>
Serragem				
1	$y = -0,0986x + 70,731$	0,4323	0,7626	28,96*
2	ns	-	-	
3	$y = -0,0032x^2 + 0,2967x + 50,712$	0,0023	0,0053	97,34**
4	$y = -0,004x^2 + 0,3698x + 47,639$	0,0002	0,0006	85,58**
BIOMIX <sup>®</sup>				
1	ns	-	-	-
2	$y = 0,0043x^2 - 0,3192x + 62,348$	0,0038	0,0012	45,72**
3	$y = 0,0866x + 50,24$	0,4122	0,9984	87,82*
4	$y = 0,0642x + 45,993$	0,9926	0,5400	59,97**

\*\* significativo a 1 % de probabilidade; \* significativo a 5 % de probabilidade

<sup>(1)</sup> y. porosidade (%), x. doses, b<sup>1</sup>. coeficiente de x e, b<sup>2</sup>. coeficiente de x<sup>2</sup>.

### 4.3 Macroporosidade

Os valores da análise de variância, para a macroporosidade (Tabela 11), mostraram diferença significativa para a interação entre as doses e as intensidades de compactação.

Tabela 11. Análise de variância para os valores de macroporosidade.

FV	G.L.	S.Q.	Q.M.	Fc	Pr>Fc
Serragem					
DOSES (A)	3	265,384463	88,461488	22,340	0,0000
INTENSIDADE (B)	3	2294,803212	764,934404	193,175	0,0000
INTERAÇÃO A X B	9	278,818275	30,979808	7,824	0,0000 **
Erro	48	190,070550	3,959803		
C.V. = 10,11%					
BIOMIX®					
DOSES (A)	3	537,635705	179,211902	21,966	0,0000
INTENSIDADE (B)	3	3458,473892	1152,824631	141,301	0,0000
INTERAÇÃO A X B	9	291,511964	32,390218	3,970	0,0008**
Erro	48	391,614075	8,158627		
C.V. = 13,5%					

\*\* significativo a 1 % de probabilidade

O tratamento sem material orgânico foi o mais afetado pela compactação do solo, com valores de macroporosidade de 9,1% e 9,8%, respectivamente, nas intensidades de compactação 3 e 4, valores que estão abaixo de 10%, que é a macroporosidade mínima para garantir uma condição que ainda favoreça a aeração do solo, para o desenvolvimento das raízes (CRUCIANI, 1989). Para os tratamentos com adição de material orgânico os valores de macroporosidade variaram entre 35,4 e 15,6 %, nas intensidades de compactação 1 e 4, respectivamente, valores que estão acima do mínimo necessário para favorecer tanto a aeração do solo (CRUCIANI, 1989) como a drenagem da água do solo (BERTOL et al., 2004).

O aumento na intensidade de compactação também resultou em redução nos valores de macroporosidade do solo (Tabela 12 e Figura 12), assim como ocorreu com a porosidade total, resultado semelhante aos obtidos por Beutler et al. (2004), Camilotti et al. (2005), Soares et al. (2005), Silva et al. (2005a) e Freddi et al. (2007).

Tabela 12. Resultados da análise da macroporosidade (%), referentes às amostras manejadas com diferentes doses dos materiais orgânicos e submetidas às diferentes intensidades de compactação.

Dose (t ha <sup>-1</sup> )	Intensidade de Compactação			
	1	2	3	4
Serragem				
0	31,8aA	13,01bB	9,1bB	9,87bB
30	28,33aA	18,94aB	17,67aB	18,67aB
50	28,55aA	22,4aB	17,38aC	15,68aC
80	30,63aA	19,22aB	16,4aB	16,54aB
BIOMIX®				
0	31,8aA	13,01cB	9,1bB	9,87bB
30	33,96aA	21,48bB	17,72aC	15,62aC
50	35,47aA	20,39bB	19,2aB	16,6aB
80	35,1aA	28,47aA	17,11aB	15,9aB

Médias seguidas pela mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

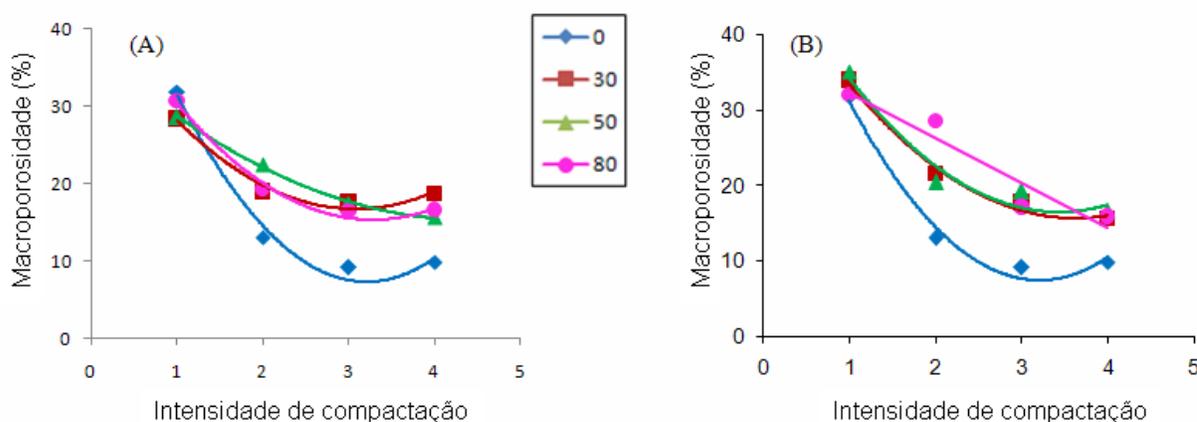


Figura 12. Variação da macroporosidade (%), em função da intensidade de compactação, nas diferentes doses de serragem (A) e BIOMIX® (B).

Na tabela 13 estão os modelos ajustados das curvas de regressão de macroporosidade, apresentadas na figura 12, para a variação entre as intensidades de compactação dentro de uma mesma dose.

Tabela 13. Modelos ajustados da macroporosidade (%) para a variação entre as intensidades de compactação dentro de uma mesma dose.

Dose (t ha <sup>-1</sup> )	Equação <sup>(1)</sup>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	R <sup>2</sup>
Serragem				
0	$y = 4,89x^2 - 31,42x + 57,82$	0,0000	0,0000	98,49**
30	$y = 2,6x^2 - 16,024x + 41,46$	0,0000	0,0000	97,68**
50	$y = 1,1125x^2 - 9,9255x + 37,473$	0,0003	0,0297	99,76*
80	$y = 2,8875x^2 - 18,947x + 46,408$	0,0000	0,0000	98,84**
BIOMIX <sup>®</sup>				
0	$y = 4,89x^2 - 31,42x + 57,82$	0,0000	0,0000	98,49**
30	$y = 2,5925x^2 - 18,838x + 49,843$	0,0000	0,0007	98,77**
50	$y = 3,0275x^2 - 20,807x + 52,132$	0,0000	0,0001	94,65**
80	$y = -5,96x + 38,265$	0,0186	0,4242	91,02**

\*\* significativo a 1 % de probabilidade; \* significativo a 5 % de probabilidade

(1) y. macroporosidade em %, x. intensidade de compactação, b<sup>1</sup>. coeficiente de x e, b<sup>2</sup>. coeficiente de x<sup>2</sup>.

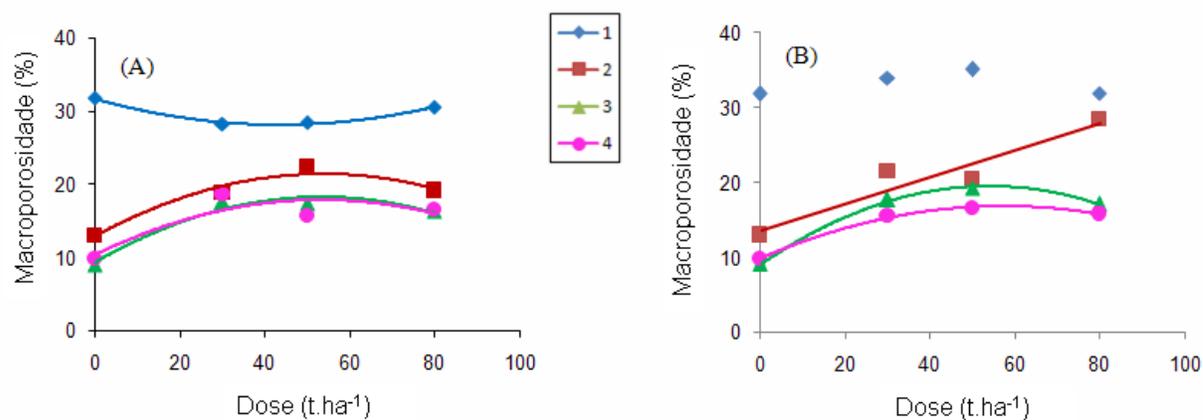


Figura 13. Variação da macroporosidade (%), em função das doses de serragem (A) e BIOMIX<sup>®</sup> (B) nas diferentes intensidades de compactação.

O processo de compactação ocasionou redução na macroporosidade do solo, para todas as doses de serragem e de Biomix<sup>®</sup> (Figura 13). A alteração da estrutura, quando o solo sofre compressão, resulta em diminuição dos poros maiores (BOONE & VEEN,

1994 e SOARES et al., 2005) que ocorrem, normalmente, entre os agregados do solo (PREVEDELLO, 1996). Entretanto, com a adição de doses crescentes, tanto de serragem como de Biomix<sup>®</sup>, a diminuição na macroporosidade foi significativamente menor, em comparação com o solo sem adição de material orgânico, pois a matéria orgânica age como agente cimentante na agregação das partículas melhorando a macroporosidade do solo. (BAYER; MIELNICZUK, 2008).

Na tabela 14 estão os modelos ajustados das curvas de regressão de macroporosidade, apresentadas na figura 13, para a variação entre as doses dentro de uma mesma intensidade de compactação.

Tabela 14. Modelos ajustados da macroporosidade (%) para a variação entre as doses dentro de uma mesma intensidade de compactação.

Intensidade de Compactação	Equação <sup>(1)</sup>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	R <sup>2</sup>
Serragem				
1	$y = 0,0019x^2 - 0,1611x + 31,74$	0,0058	0,0075	98,53**
2	$y = -0,003x^2 + 0,3259x + 12,784$	0,0000	0,0000	96,24**
3	$y = -0,0032x^2 + 0,3397x + 9,3488$	0,0000	0,0001	95,75**
4	$y = -0,0026x^2 + 0,2814x + 10,418$	0,0000	0,0002	75,97**
BIOMIX <sup>®</sup>				
1	ns	-	-	-
2	$y = 0,1787x + 13,69$	0,0223	0,8933	90,35**
3	$y = -0,0036x^2 + 0,3842x + 9,1615$	0,0001	0,0012	99,79**
4	$y = -0,0022x^2 + 0,2458x + 9,9321$	0,0035	0,0285	99,55*

\*\* significativo a 1 % de probabilidade; \* significativo a 5 % de probabilidade

<sup>(1)</sup> y. macroporosidade (%), x. doses, b<sup>1</sup>. coeficiente de x e, b<sup>2</sup>. coeficiente de x<sup>2</sup>.

#### 4.4 Microporosidade

Os valores da análise de variância, para a microporosidade do solo (Tabela 15), mostraram diferença significativa para a interação entre as doses e as intensidades de compactação.

Tabela 15. Análise de variância para os valores de microporosidade.

FV	G.L.	S.Q.	Q.M.	Fc	Pr>Fc
Serragem					
DOSES (A)	3	452,438612	150,812871	16,262	0,0000
INTENSIDADE (B)	3	97,679700	32,559900	3,511	0,0221
INTERAÇÃO A X B	9	468,137763	52,015307	5,609	0,0000 **
Erro	48	445,153500	9,274031		
C.V. = 7,93%					
BIOMIX®					
DOSES (A)	3	490,785337	163,595112	14,252	0,0000
INTENSIDADE (B)	3	287,475163	95,825054	8,348	0,0001
INTERAÇÃO A X B	9	409,066675	45,451853	3,960	0,0008 **
Erro	48	550,980600	11,478762		
C.V. = 9%					

\*\* significativo a 1 % de probabilidade

A modificação na microporosidade do solo (Tabela 16 e Figura 14), decorrente da compactação, é pequena em relação à variação ocorrida no volume dos macroporos, conforme comenta Bertol et al. (2004). Em solos compactados ocorre redução do volume de poros totais e de macroporos, enquanto o volume de microporos permanece, praticamente, inalterado (HILLEL, 1982; DIAS JUNIOR, 1996; TORMENA et al, 1998; ARAUJO et al, 2004) ou tende a aumentar (BOONE & VEEN, 1994; CAMILOTTI et al, 2005), uma vez que a compactação ocasiona redução no tamanho dos poros grandes transformando-os em poros de menor tamanho (BEUTLER et al., 2004).

Para a adição de doses crescentes, tanto de serragem quanto de Biomix®, os valores de microporosidade são menores que os observados para o tratamento sem adição de material orgânico (Tabela 16 e Figura 14), resultado que evidencia o efeito positivo da presença desses materiais no solo quando ocorre o processo de compactação.

Tabela 16. Resultados da análise da microporosidade (%), referentes às amostras manejadas com diferentes doses dos materiais orgânicos e submetidas às diferentes intensidades de compactação.

Dose (t ha <sup>-1</sup> )	Intensidade de Compactação			
	1	2	3	4
Serragem				
6	40,27aB	48,1aA	40,57aB	37,3aB
30	33,55bB	33,91bB	39,67aA	38,33aAB
50	43,68aA	40,07bA	39,57aA	38,54aA
80	30,42bB	37,4abA	37,72aA	35,49aAB
BIOMIX <sup>®</sup>				
0	40,27abB	48,1aA	40,57aB	37,3aB
30	38,97abA	40,12bA	33,83bAB	30,27bB
50	35,47bA	31,81cA	36,66abA	33,74abA
80	43,2aA	37,14bcAB	39,73abAB	35,48abB

Médias seguidas pela mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

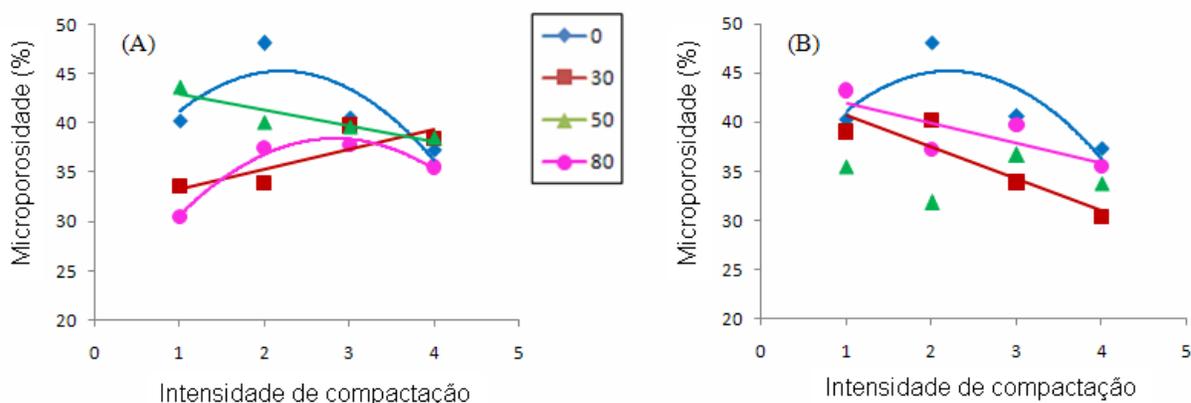


Figura 14. Variação da microporosidade (%), em função da intensidade de compactação, nas diferentes doses de serragem (A) e BIOMIX<sup>®</sup> (B).

Na tabela 17 estão os modelos ajustados das curvas de regressão de microporosidade, apresentadas na figura 13, para as intensidades de compactação dentro de uma mesma dose.

Tabela 17. Modelos ajustados da microporosidade (%) para a variação entre as intensidades de compactação dentro de uma mesma dose.

Dose (t ha <sup>-1</sup> )	Equação <sup>(1)</sup>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	R <sup>2</sup>
Serragem				
0	$y = -2,775x^2 + 12,231x + 31,795$	0,0027	0,0007	69,72%**
30	$y = 2,01x + 31,34$	0,2896	0,5782	70,30%**
50	$y = -1,592x + 44,445$	0,2175	0,3988	84,49%*
80	$y = -2,3025x^2 + 13,066x + 19,862$	0,0015	0,0040	97,52%**
BIOMIX <sup>®</sup>				
0	$y = -2,775x^2 + 12,231x + 31,795$	0,0065	0,0020	69,72%**
30	$y = -3,239x + 43,895$	0,5428	0,1716	83,03%*
50	Ns	-	-	ns
80	$y = -2,057x + 44,03$	0,3197	0,5946	62,28%**

\*\* significativo a 1 % de probabilidade; \* significativo a 5 % de probabilidade

(1) y. microporosidade em %, x. intensidade de compactação, b<sup>1</sup>. coeficiente de x e, b<sup>2</sup>. coeficiente de x<sup>2</sup>.

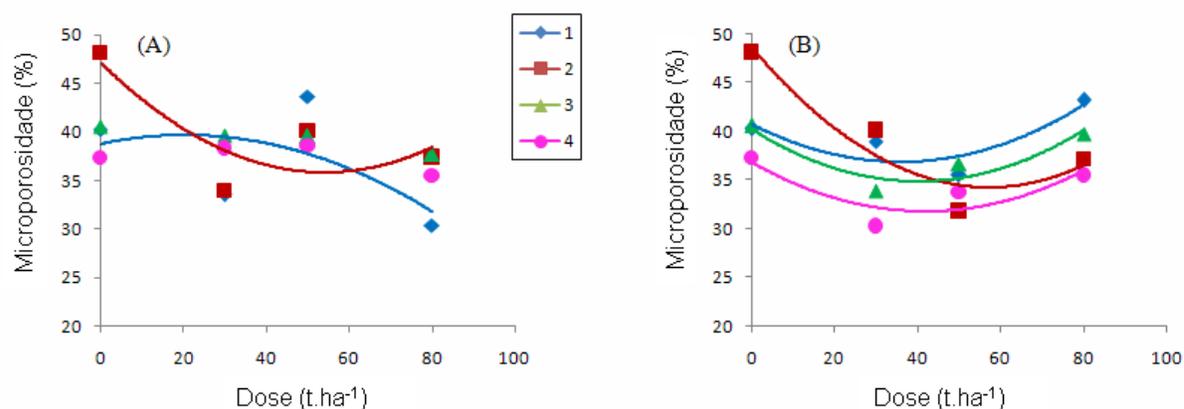


Figura 15. Variação na microporosidade (%), em função das doses de serragem (A) e BIOMIX<sup>®</sup> (B) nas diferentes intensidades de compactação.

A adição de BIOMIX<sup>®</sup> proporcionou aumento na microporosidade do solo a partir da dose de 30 t.ha<sup>-1</sup>, nas intensidades de compactação 1, 3 e 4. Este resultado se deve ao fato de que a adição de BIOMIX<sup>®</sup> provoveu melhor agregação entre as partículas

melhorando a porosidade do solo, elevando, tanto os valores de macroporosidade, quanto os valores de microporosidade.

Na tabela 18 estão os modelos ajustados das curvas de regressão de microporosidade, apresentadas na figura 14, na variação entre as doses dentro de uma mesma intensidade de compactação.

Tabela 18. Modelos ajustados da microporosidade (%) para a variação entre as doses dentro de uma mesma intensidade de compactação.

Intensidade de Compactação	Equação <sup>(1)</sup>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	R <sup>2</sup>
Serragem				
1	$y = -0,0022x^2 + 0,0883x + 38,789$	0,3055	0,0368	32,48%*
2	$y = 0,0038x^2 - 0,415x + 47,061$	0,0000	0,0004	66,42%**
3	ns	-	-	-
4	ns	-	-	-
BIOMIX <sup>®</sup>				
1	$y = 0,003x^2 - 0,2166x + 40,768$	0,0270	0,0105	72,63%*
2	$y = 0,0044x^2 - 0,5083x + 48,755$	0,0000	0,0003	89,49%**
3	$y = 0,0033x^2 - 0,2632x + 40,212$	0,0079	0,0057	84,70%**
4	$y = 0,0029x^2 - 0,2451x + 36,838$	0,0130	0,0127	73,05%*

\*\* significativo a 1 % de probabilidade; \* significativo a 5 % de probabilidade

<sup>(1)</sup> y. microporosidade

#### 4.5 Condutividade Hidráulica

Os valores da análise de variância, para a condutividade hidráulica (Tabela 19), mostraram diferença significativa para a interação entre as doses e as intensidades de compactação.

Tabela 19. Análise de variância para os valores de condutividade hidráulica.

FV	G.L.	S.Q.	Q.M.	Fc	Pr>Fc
Serragem					
DOSES (A)	3	2756,249680	918,749893	3,770	0,0165
INTENSIDADE (B)	3	30670,219955	10223,406652	41,946	0,0000
INTERAÇÃO A X B	9	13594,751614	1510,527957	6,198	0,0000**
Erro	48	11699,052625	243,730263		
C.V. = 46,90%					
BIOMIX <sup>®</sup>					
DOSES (A)	3	5461,586700	1820,528900	5,258	0,0032
INTENSIDADE (B)	3	4653,468712	15511,822904	44,803	0,0000
INTERAÇÃO A X B	9	7737,162163	859,684685	2,483	0,0204*
Erro	48	16618,597600	346,220783		
C.V. =					

\* significativo a 5 % de probabilidade e \*\* significativo a 1 % de probabilidade

Como a capacidade do solo de armazenar e transmitir líquidos está diretamente relacionada com a geometria do sistema poroso, qualquer alteração ocasionada na porosidade do solo modifica sua condutividade hidráulica (OLIVEIRA, 2005), principalmente quando a macroporosidade é afetada, como ocorre no processo de compactação, uma vez que a movimentação de água no solo ocorre através dos macroporos (CAMARGO & ALLEONI, 1997).

Os maiores valores de condutividade hidráulica (K) foram encontrados no solo que não sofreu compactação (Tabela 20) concordando com os resultados obtidos por Silva et al (2005b) que encontraram os maiores valores de condutividade hidráulica em solo sob mata, ou seja, sem alteração na estrutura do solo.

Com o aumento da intensidade de compactação houve diminuição na condutividade hidráulica (Figura 16), resultado que corrobora os obtidos por Klein & Libardi (2002), Silva et al. (2003) e Souza et al. (2006).

Tabela 20. Resultados da análise da condutividade hidráulica ( $\text{cm s}^{-1}$ ), referentes às amostras manejadas com diferentes doses dos materiais orgânicos e submetidas às diferentes intensidades de compactação.

Dose ( $\text{t ha}^{-1}$ )	Intensidade de Compactação			
	1	2	3	4
Serragem				
0	60,38bcA	14,33aB	25,10aB	8,07bB
30	86,32abA	18,33aB	17,51aB	23,72bB
50	95,45aA	38,81aB	19,1aBC	4,24bC
80	56,23cA	39,28aAB	18,67aB	66,21aA
BIOMIX®				
0	60,38bA	14,33bB	25,10aB	8,07aB
30	84,75abA	33,40bB	34,33aB	14,48aB
50	77,61abA	42,39abB	9,4aB	19,71aB
80	110,85aA	69,42aB	17,86aC	12,70aC

Médias seguidas pela mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

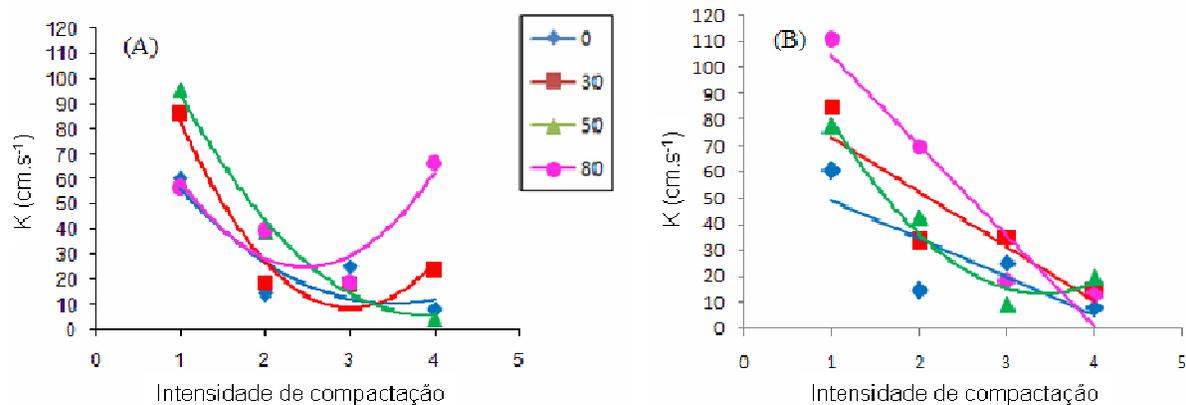


Figura 16. Variação da condutividade hidráulica ( $\text{cm.s}^{-1}$ ), em função da intensidade de compactação, nas diferentes doses de serragem (A) e BIOMIX® (B).

Na tabela 21 estão os modelos ajustados das curvas de regressão de condutividade hidráulica (K), apresentadas na figura 16, para as intensidades de compactação dentro de uma mesma dose.

Tabela 21. Modelos ajustados da condutividade hidráulica ( $\text{cm s}^{-1}$ ) para a variação entre as intensidades de compactação dentro de uma mesma dose.

Dose ( $\text{t ha}^{-1}$ )	Equação <sup>(1)</sup>	$b_1$	$b_2$	$R^2$
Serragem				
0	$y = 7,256x^2 - 50,89x + 99,78$	0,0210	0,0905	78,10%**
30	$y = 18,553x^2 - 111,63x + 176,39$	0,0000	0,0001	94,58%**
50	$y = 10,447x^2 - 81,571x + 164,97$	0,0004	0,0164	98,93%**
80	$y = 16,126x^2 - 79,695x + 123,39$	0,0005	0,0004	80,20%**
BIOMIX®				
0	$y = -14,61x + 63,50$	0,000	0,1581	65,20%**
30	$y = -20,98x + 94,21$	0,0019	0,0181	81,00%**
50	$y = 11,38x^2 - 77,58x + 145,8$	0,0003	0,7167	96,90%*
80	$y = -34,60x + 139,2$	0,4068	0,0000	92,40%**

\*\* significativo a 1 % de probabilidade; \* significativo a 5 % de probabilidade

<sup>(1)</sup> y. microporosidade em %, x. intensidade de compactação,  $b^1$ . coeficiente de x e,  $b^2$ . coeficiente de  $x^2$ .

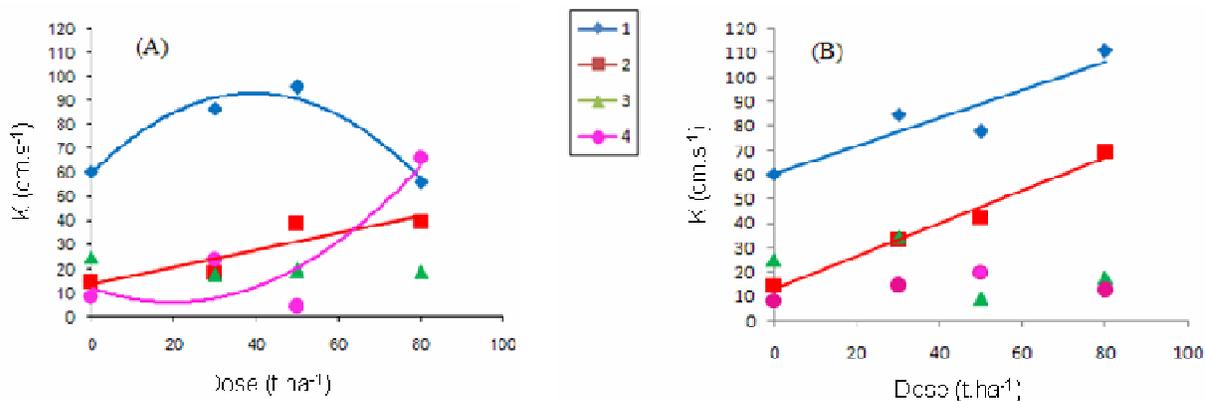


Figura 17. Variação da condutividade hidráulica ( $\text{cm s}^{-1}$ ), em função das doses de serragem (A) e BIOMIX® (B) nas diferentes intensidades de compactação.

A adição de doses crescentes de material orgânico resultou em aumento na condutividade hidráulica, para uma mesma intensidade de compactação, uma vez que o material adicionado além de não favorecer a reorganização das partículas proporcionou melhor agregação, conferindo maior conectividade entre os poros, melhorando a

movimentação de água no solo e, portanto, o aumento da condutividade hidráulica (LEPSCH, 2002 e BRANDÃO, 2006).

Na tabela 22 estão os modelos ajustados das curvas de regressão de condutividade hidráulica (K), apresentadas na figura 17, para as doses dentro de uma mesma intensidade de compactação.

Tabela 22. Modelos ajustados da condutividade hidráulica ( $\text{cm s}^{-1}$ ) para a variação entre as doses dentro de uma mesma intensidade de compactação.

Intensidade de Compactação	Equação <sup>(1)</sup>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	R <sup>2</sup>
Serragem				
1	$y = -0,0217x^2 + 1,7158x + 59,183$	0,0007	0,0003	95,63%**
2	$y = 0,3539x + 13,527$	0,3456	0,8341	81,22%*
3	ns	-	-	-
4	$y = 0,0154x^2 - 0,6084x + 12,068$	0,2022	0,0082	77,46%**
BIOMIX <sup>®</sup>				
1	$y = 0,572x + 60,48$	0,0000	0,0004	84,50%**
2	$y = 0,674x + 12,89$	0,0000	0,0000	98,30%**
3	ns	-	-	-
4	ns	-	-	-

\*\* significativo a 1 % de probabilidade; \* significativo a 5 % de probabilidade

<sup>(1)</sup> y. condutividade hidráulica em  $\text{cm s}^{-1}$ , x. doses, b<sup>1</sup>. coeficiente de x e, b<sup>2</sup>. coeficiente de x<sup>2</sup>.

#### 4.6 Resistência à penetração

Os resultados da análise de variância para a resistência do solo à penetração mostraram diferença significativa para a interação entre as doses e as intensidades de compactação, para o tratamento com serragem. Para o tratamento com Biomix<sup>®</sup> houve diferença significativa entre as doses e, entre as intensidades de compactação, separadamente (Tabela 23).

Tabela 23. Análise de variância para os valores de resistência à penetração.

FV	G.L.	S.Q.	Q.M.	Fc	Pr>Fc
Serragem					
DOSES (A)	3	2,633850	0,877950	6,282	0,0011
INTENSIDADE (B)	3	14,162263	4,720754	33,779	0,0000
INTERAÇÃO A X B	9	4,722788	0,524754	3,755	0,0012 **
Erro	48	6,708100	0,139752		
C.V. = 34,86%					
BIOMIX <sup>®</sup>					
DOSES (A)	3	5,814305	1,938102	9,613	0,0000**
INTENSIDADE (B)	3	11,485967	3,828656	18,991	0,0000**
INTERAÇÃO A X B	9	2,867827	0,318647	1,581	0,1482ns
Erro	48	9,677175	0,201608		
C.V. = 59,36%					

\* significativo a 5 % de probabilidade e \*\* significativo a 1 % de probabilidade

Todos os valores de resistência do solo à penetração observados na tabela 24 são menores que 2,0 MPa resultados que caracterizam os tratamentos com adição de serragem ou Biomix<sup>®</sup> com pouca ou sem limitações ao crescimento radicular (Camargo & Alleoni, 1997; Silva et al., 2002).

Tabela 24. Resultados da análise da resistência do solo à penetração (MPa), referentes às amostras submetidas às diferentes intensidades de compactação e manejadas com diferentes doses de serragem.

Dose (t ha <sup>-1</sup> )	Intensidade de Compactação			
	1	2	3	4
Serragem				
0	0,09aB	1,34aA	1,55aA	1,89abA
30	0,50aB	1,16abAB	1,84aA	1,63abA
50	0,31aB	0,76abAB	0,88bAB	1,23bA
80	0,59aB	0,57bB	0,73bB	1,94aB

Médias seguidas pela mesma letra, minúscula na coluna e maiúscula na linha, não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

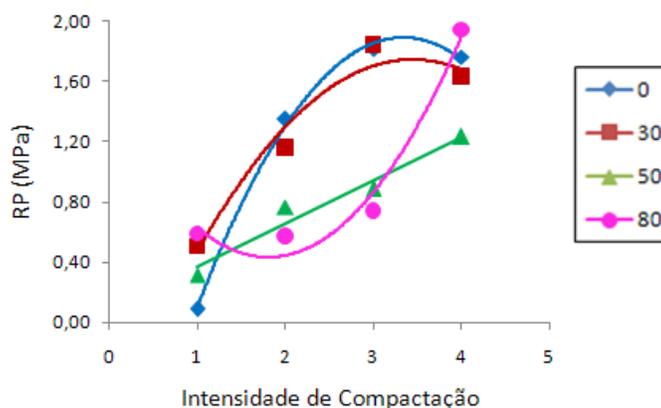


Figura 18. Variação da resistência do solo à penetração (MPa) nas diferentes intensidades de compactação dentro de uma mesma dose de serragem.

Na tabela 25 estão os modelos ajustados das curvas de regressão de resistência à penetração (RP), apresentadas na figura 18, na variação entre as intensidades de compactação dentro de uma mesma dose de serragem.

Tabela 25. Modelos ajustados da resistência do solo à penetração (MPa), para a variação entre as intensidades de compactação dentro de uma mesma dose de serragem.

Dose (t ha <sup>-1</sup> )	Equação <sup>(1)</sup>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	R <sup>2</sup>
Serragem				
0	$y = -0,3262x^2 + 2,1795x - 1,7521$	0,0000	0,0010	99,77%**
30	$y = -0,2157x^2 + 1,4837x - 0,8092$	0,0028	0,0242	95,95%*
50	$y = 0,3358x - 0,0018$	0,3886	0,7902	95,54%**
80	$y = 0,2833x^2 - 1,003x + 1,3639$	0,0245	0,0020	94,91%**

\*\* significativo a 1 % de probabilidade; \* significativo a 5 % de probabilidade

(1) y. resistência à penetração em MPa, x. intensidade de compactação, b<sup>1</sup>. coeficiente de x e, b<sup>2</sup>. coeficiente de x<sup>2</sup>.

(2)

Comparando-se as intensidades de compactação, para cada dose de serragem adicionada ao solo (Figura 18), nota-se que os valores de resistência do solo à penetração aumentam com o aumento da intensidade de compactação do solo. Como a

resistência do solo à penetração é afetada pelos espaços porosos, quanto menor a porosidade, principalmente a macroporosidade, maior será a resistência mecânica apresentada pelo solo. Essa relação direta entre a resistência do solo e a compactação também foi observada por alguns autores, dentre eles Silva et al. (2000), Streck et al. (2004) e Secco et al. (2009).

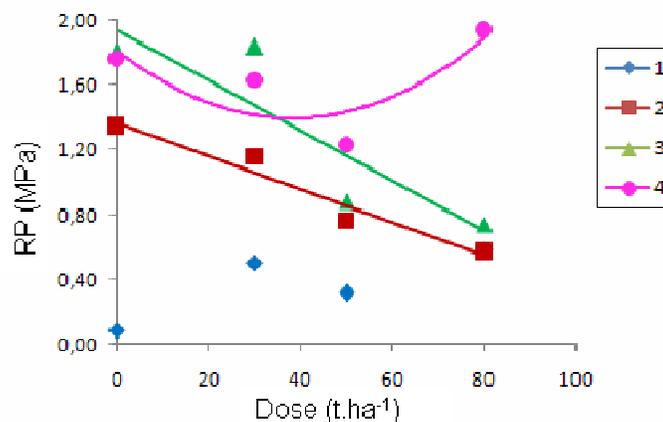


Figura 19. Variação da resistência do solo à penetração (MPa) nas diferentes doses de serragem dentro de uma mesma intensidade de compactação.

A adição de doses crescentes de serragem ocasionou diminuição na resistência do solo à penetração, uma vez que a matéria orgânica atua no processo de compactação do solo, dificultando o rearranjo das partículas e, conseqüentemente, a diminuição da macroporosidade. Portanto, o aporte de matéria orgânica ao solo é de fundamental importância para prevenir o solo das alterações negativas decorrentes da compactação.

Na tabela 26 estão os modelos ajustados das curvas de regressão de resistência à penetração (RP), apresentadas na figura 19, para a variação entre as doses dentro de uma mesma intensidade de compactação.

Tabela 26. Modelos ajustados da resistência do solo à penetração (MPa), para a variação entre as doses de serragem dentro de uma mesma intensidade de compactação.

Intensidade de Compactação	Equação <sup>(1)</sup>	b <sub>1</sub>	b <sub>2</sub>	R <sup>2</sup>
		Serragem		
1	ns	-	-	-
2	y = -0,009x + 1,351	0,3357	0,9894	91,90%**
3	y = -0,0154x + 1,9319	0,3133	0,6371	77,72%**
4	y = 0,000x <sup>2</sup> - 0,016x + 1,794	0,0451	0,0288	76,80%*

\*\* significativo a 1 % de probabilidade; \* significativo a 5 % de probabilidade

(1) y. condutividade hidráulica em cm/s, x. doses, b<sup>1</sup>. coeficiente de x e, b<sup>2</sup>. coeficiente de x<sup>2</sup>.

Como não houve interação significativa entre as doses de BIOMIX<sup>®</sup> e as diferentes intensidades de compactação, constam da tabela 27 apenas os valores médios de resistência à penetração encontrados nos tratamentos referentes a cada dose do composto e a cada intensidade de compactação.

Para os tratamentos com Biomix<sup>®</sup>, os valores médios de resistência do solo à penetração também mostram relação direta com o aumento na intensidade de compactação e inversa com a dose utilizada do composto, resultados semelhantes aos obtidos para a adição de serragem ao solo e que evidenciam a proteção proporcionada ao solo pela adição de material orgânico. O incremento na intensidade de compactação conferiu ao solo maior resistência à penetração, comportamento que também pode ser observado na figura 20. O valor da resistência à penetração diminuiu, significativamente, com a adição de 30 t ha<sup>-1</sup> de BIOMIX<sup>®</sup>, não ocorrendo diferença significativa entre as doses, o que indica que a adição dessa dose de BIOMIX<sup>®</sup> já traz benefício ao solo.

Tabela 27. Resultados da análise de resistência do solo à penetração (MPa), referentes às amostras submetidas às diferentes intensidades de compactação ou manejadas com diferentes doses de BIOMIX®.

Intensidade de Compactação			
1	2	3	4
0,14C	0,6B	1,07A	1,27A
Dose (t ha <sup>-1</sup> )			
0	30	50	80
1,31A	0,64B	0,69B	0,44B

Médias seguidas pela mesma letra não diferem estatisticamente pelo teste de Tukey a 5% de probabilidade.

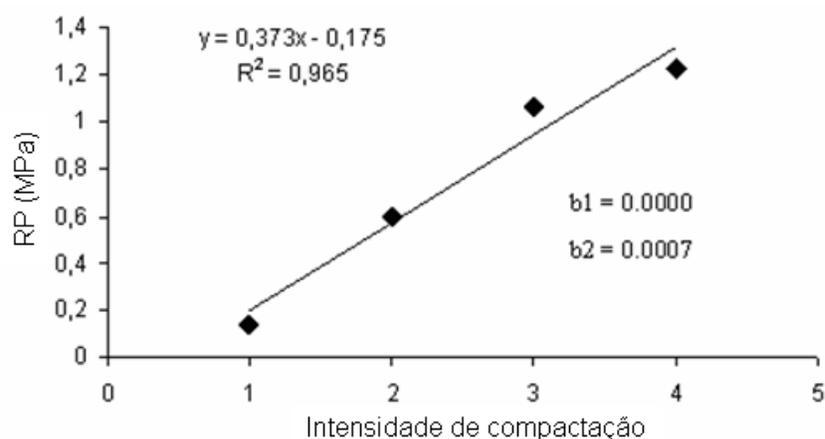


Figura 20. Variação da resistência do solo à penetração (MPa) nas diferentes intensidades de compactação para os tratamentos com adição de BIOMIX®.

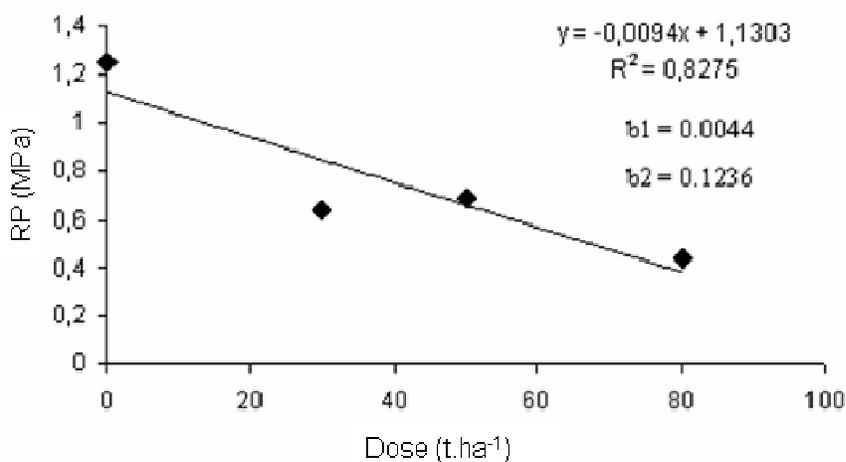


Figura 21. Variação da resistência do solo à penetração (MPa) nas diferentes doses para os tratamentos com adição de BIOMIX®.

A figura 21 mostra que o aumento na dose de BIOMIX<sup>®</sup> proporciona ao solo uma diminuição na resistência à penetração, fato também constatado e discutido anteriormente para os tratamentos com adição de serragem.

#### 4.7 Análise de imagens

Os valores da porosidade do solo (Tabela 28), referentes às amostras manejadas com diferentes doses dos materiais orgânicos e submetidas às diferentes intensidades de compactação, correspondem aos macro e mesoporos, uma vez que o tamanho mínimo de captação das imagens considerado foi de 50  $\mu\text{m}$ .

Nos tratamentos com dose de 0 t ha<sup>-1</sup> de material orgânico, a porosidade inicial do solo de 7,5%, para o tratamento sem compactação (intensidade de compactação 1), foi reduzida para 2,61%, 0,9% e 1,64%, respectivamente, nas intensidades 2, 3 e 4. O valor correspondente à intensidade sem compactação diferiu significativamente dos demais, que mostraram menor porosidade decorrente das maiores intensidades de compactação.

Tabela 28. Resultados da análise de porosidade do solo (%), referentes às amostras manejadas com diferentes doses dos materiais orgânicos e submetidas às diferentes intensidades de compactação.

Dose (t ha <sup>-1</sup> )	Intensidade de Compactação			
	1	2	3	4
Serragem				
0	7,50A	2,61B	0,90B	1,64B
30	5,65A	5,55A	3,69B	1,84C
50	3,09A	1,02AB	1,59AB	0,42B
80	2,08A	0,86A	1,28A	0,79A
BIOMIX <sup>®</sup>				
0	7,50A	2,61B	0,90B	1,64B
30	4,28A	2,26AB	3,93A	0,12B
50	1,66A	0,98A	1,03A	3,20A
80	2,31A	0,86A	1,40A	2,18A

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

As figuras 22 a 35 apresentam imagens binarizadas que ilustram as diferentes intensidades de compactação nas doses de 0 t ha<sup>-1</sup> (Figuras 22 e 23), 30 t ha<sup>-1</sup> de serragem (Figuras 24 e 25), 50 t ha<sup>-1</sup> de serragem (Figuras 26 e 27), 80 t ha<sup>-1</sup> de serragem (Figuras 28 e 29), 30 t ha<sup>-1</sup> de BIOMIX<sup>®</sup> (Figuras 30 e 31), 50 t ha<sup>-1</sup> de BIOMIX<sup>®</sup> (Figuras 32 e 33) e 80 t ha<sup>-1</sup> de BIOMIX<sup>®</sup> (Figuras 34 e 35). Além das imagens são apresentadas ilustrações da porosidade do solo do respectivo tratamento, bem como a distribuição dessa porosidade quanto a forma (Arr.=arredondados; Alon=alongados; Comp=complexos) e quanto ao tamanho dos poros (pequenos = 156 a 15600µm<sup>2</sup>; médios =15600 a 156000µm<sup>2</sup>; grandes = >156000 µm<sup>2</sup>).

Nas figuras 22 e 23 observa-se que o tamanho de poros predominante é o médio. Somente na intensidade de compactação 2 (Figura 22, B<sub>1</sub>) a ocorrência dos diferentes tamanhos de poros é semelhante. Ocorreu aumento na porcentagem de poros médios e pequenos que juntos somaram 62,08%; 66,62%; 72,29% e 82,61%, respectivamente, nas intensidades de compactação 1, 2, 3 e 4. Esse aumento foi ocasionado pela diminuição na porcentagem de poros grandes, uma vez que, no processo de compactação, os poros maiores, tendem a diminuir, sendo substituídos por poros menores (BONNE; VEEN, 1994). Os valores de porosidade do solo que eram, inicialmente, de 37,86% na intensidade de compactação 1, passaram para 33,37%; 27,71% e 17,46%, respectivamente, nas intensidades 2, 3 e 4.

Quando se avalia a porosidade quanto à forma dos poros observa-se uma predominância de poros do tipo arredondados, já que o solo foi peneirado antes de ser utilizado para a compactação das amostras. Além disso, como na análise de imagens a avaliação dos poros é realizada em um plano bidimensional, parte dos poros caracterizados como arredondados pode, na realidade, ser canais cortados transversalmente (GOMES, 2008). A predominância de poros arredondados também foi observada por Cooper e Vidal-Torrado (2005), quando estudaram o perfil de dois pedons com horizontes B nítico, por Souza et al. (2006) no horizonte AB de um Latossolo Vermelho e por Gomes (2008) em todos os tratamentos estudados. O número de poros arredondados aumenta com o incremento da compactação, a partir da intensidade 2. Nessa intensidade a porcentagem de poros arredondados era de 74,38 %, passou para 77,64% na intensidade 3 e para 87,41% na intensidade 4. Esse aumento foi ocasionado pela diminuição de poros alongados e complexos

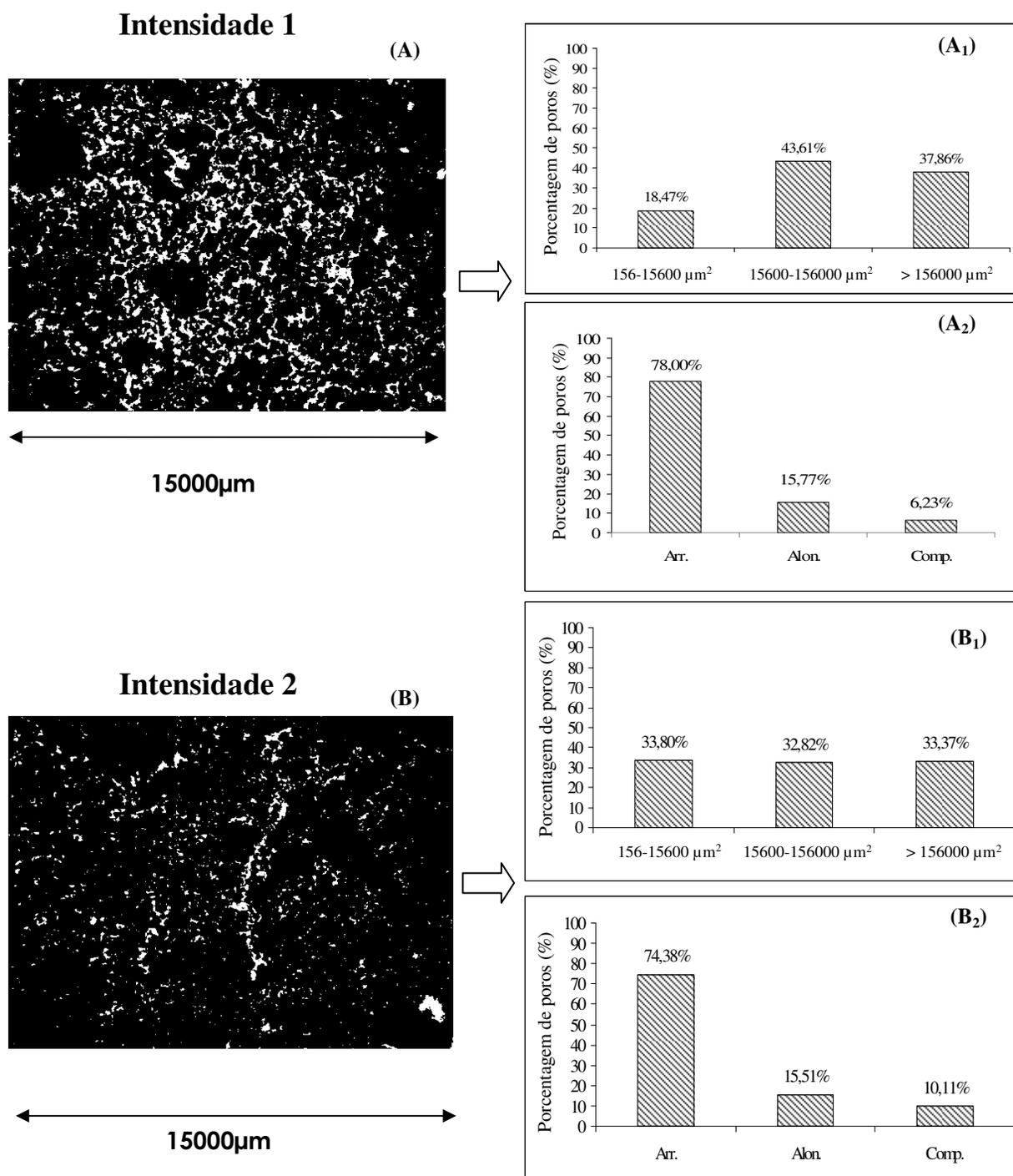


Figura 22. Imagens binarizadas (porosidade em branco e fase sólida em preto) das intensidades de compactação 1 (A) e 2 (B) no tratamento sem composto orgânico. Detalhamento da porosidade quanto ao tamanho (A<sub>1</sub> e B<sub>1</sub>) e quanto a forma (A<sub>2</sub> e B<sub>2</sub>).

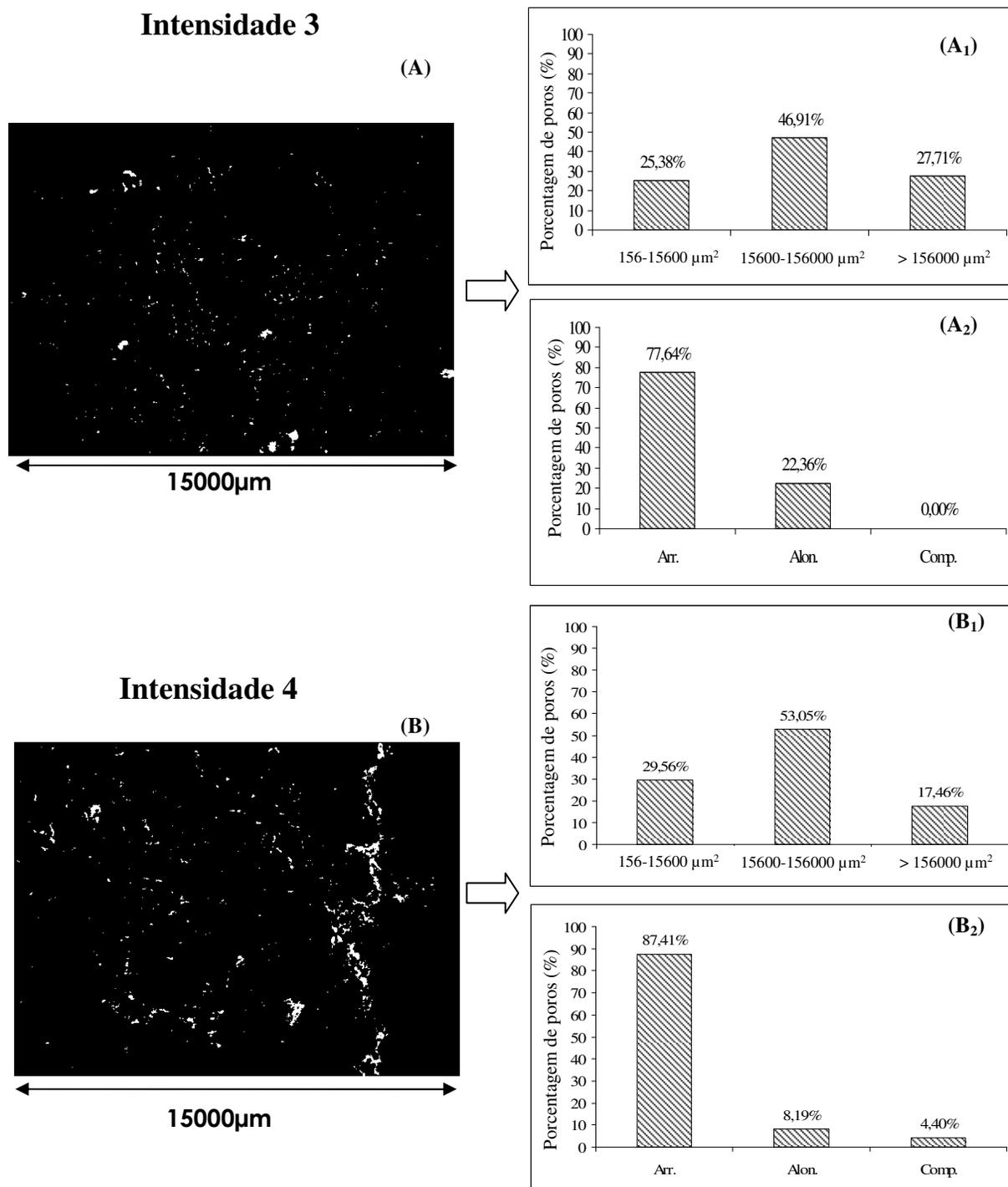


Figura 23. Imagens binarizadas (porosidade em branco e fase sólida em preto) das intensidades de compactação 3 (A) e 4 (B) no tratamento sem composto orgânico. Detalhamento da porosidade quanto ao tamanho (A<sub>1</sub> e B<sub>1</sub>) e quanto a forma (A<sub>2</sub> e B<sub>2</sub>).

que juntos somaram 26,62% na intensidade de compactação 2, 22,36% na intensidade de compactação 3 e 12,59% na intensidade de compactação 4.

A quantidade de poros complexos foi bastante reduzida com o aumento na intensidade de compactação, dando origem aos poros arredondados, em função do rearranjo das partículas e agregados do solo (Figuras 22 e 23). Os poros de empacotamento (poros complexos), desapareceram, dando origem a poros tipo cavidades e câmaras (poros arredondados), os quais estão relacionados com os processos de compactação do solo (Ringrose-Voase & Bullock, 1984).

Nos tratamentos com dose de 30 t ha<sup>-1</sup> de serragem (Tabela 28) também observa-se uma diminuição na porosidade do solo com o aumento na intensidade de compactação. Neste caso os valores das intensidades 1 e 2, respectivamente, 5,65% e 5,55%, não diferem significativamente entre si, mas diferem das intensidades 3 e 4 que mostraram porosidade de 3,69% e 1,84%, respectivamente. Entre as intensidades 3 e 4 também foram encontradas diferenças significativas. A ausência de diferença de porosidade entre as intensidades 1 e 2 pode ser atribuída à quantidade de serragem adicionada ao solo.

Nas figuras 24 e 25 o tipo de poro predominante, em todas as intensidades de compactação, é o arredondado, sendo os valores maiores para as maiores intensidades de compactação. Na intensidade de compactação 1 a porcentagem de poros arredondados foi de 64,02%, na intensidade 2 de 75,14%, na intensidade 3 de 78,12% e na intensidade 4 de 87,14%. Este aumento na porcentagem de poros arredondados é causado pela diminuição na porcentagem de poros alongados e complexos, que juntos somam um total de 36,0% na intensidade de compactação 1, 24,89% na intensidade 2, 21,90% na intensidade 3 e 12,85% na intensidade 4.

Quanto ao tamanho dos poros observa-se aumento na porcentagem de poros pequenos com o aumento na intensidade de compactação. Os valores de poros pequenos correspondem a 18,90%; 20,50%; 27,30% e 30,70%, respectivamente, nas intensidades de compactação 1, 2, 3 e 4. Esse aumento está relacionado com a diminuição na porcentagem de poros médios e grandes, que juntos totalizam 81,10% na intensidade de compactação 1, 79,50% na intensidade 2, 72,60% na intensidade 3 e 69,30% na intensidade 4.

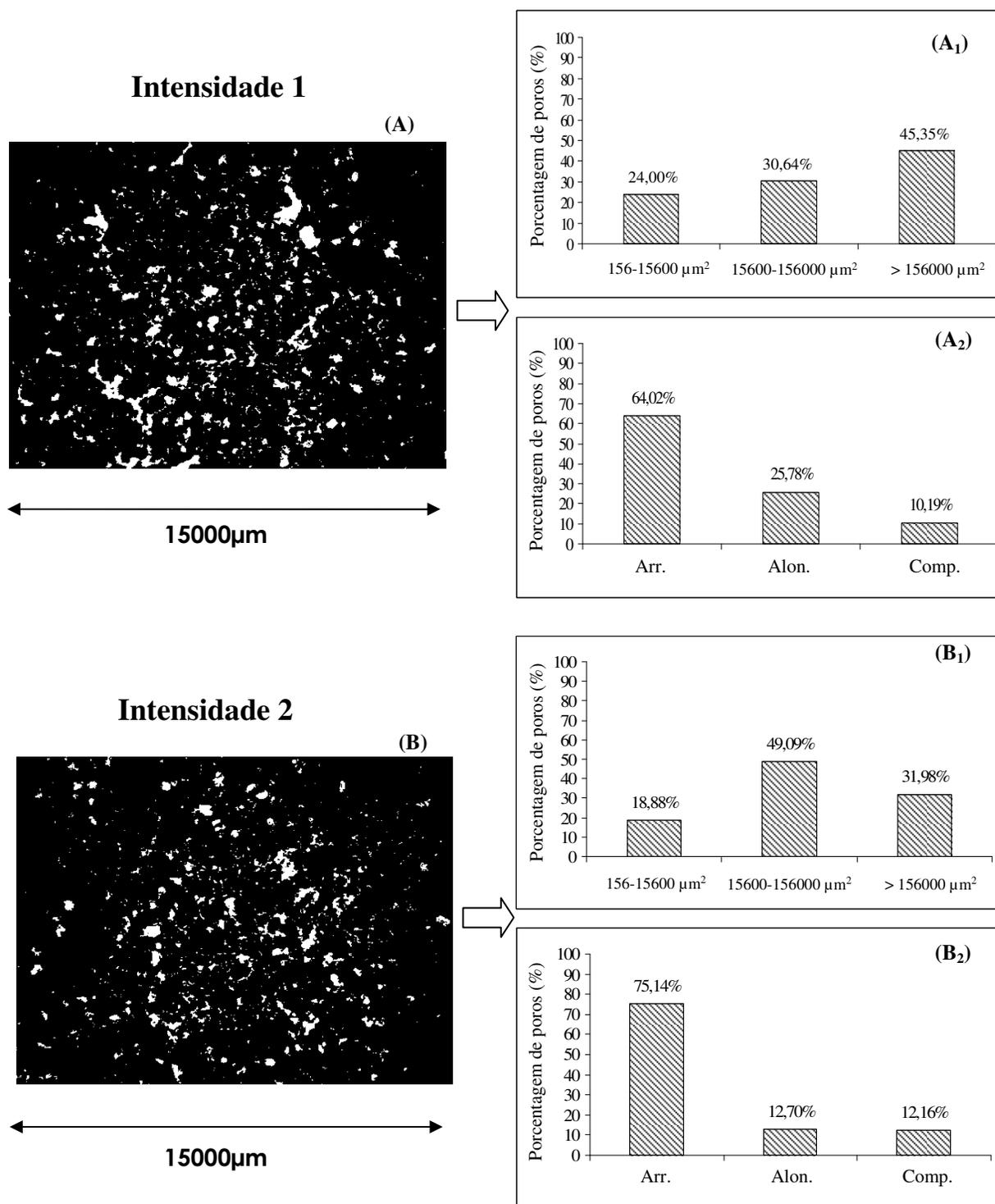


Figura 24. Imagens binarizadas (porosidade em branco e fase sólida em preto) das intensidades de compactação 1 (A) e 2 (B) no tratamento com 30 t ha<sup>-1</sup> de serragem. Detalhamento da porosidade quanto ao tamanho (A<sub>1</sub> e B<sub>1</sub>) e quanto a forma (A<sub>2</sub> e B<sub>2</sub>).

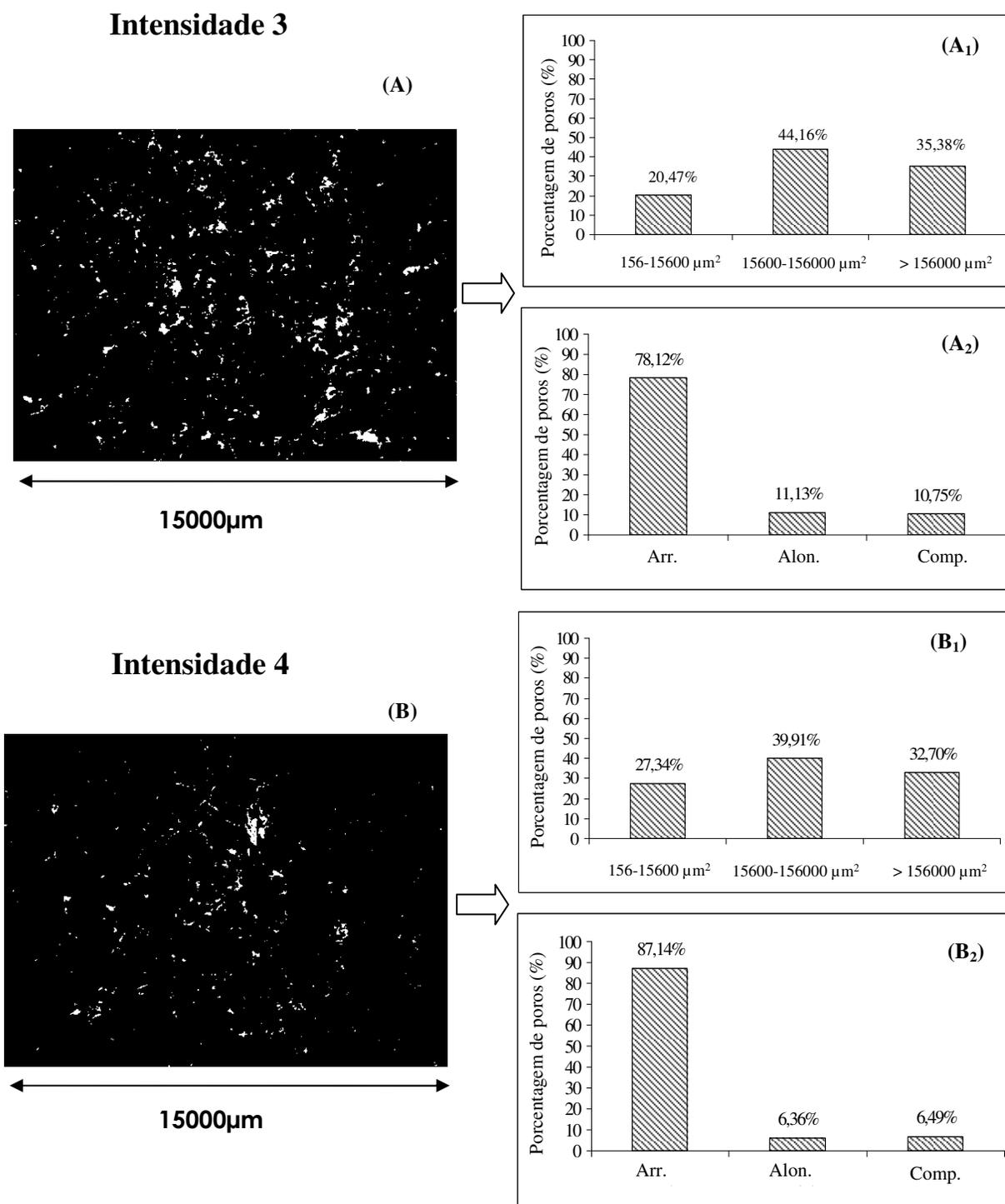


Figura 25. Imagens binarizadas (porosidade em branco e fase sólida em preto) das intensidades de compactação 3 (A) e 4 (B) no tratamento com 30 t ha<sup>-1</sup> de serragem. Detalhamento da porosidade quanto ao tamanho (A<sub>1</sub> e B<sub>1</sub>) e quanto a forma (A<sub>2</sub> e B<sub>2</sub>).

Para a dose de 50 t ha<sup>-1</sup> de serragem os valores de porosidade encontrados foram de 3,8%, 0,89%, 2,72% e 0,38%, respectivamente, nas intensidades de compactação 1, 2, 3 e 4, evidenciando que esta dose ainda não se mostra suficiente para impedir, totalmente, o efeito nocivo da compactação, pois ocorreu diminuição da porosidade, principalmente, em relação as intensidades de compactação 1 e 4 que diferem estatisticamente entre si (Tabela 28).

Em todas as intensidades de compactação da dose de 50 t ha<sup>-1</sup> de serragem há predominância de poros do tipo arredondado (Figuras 26 e 27). Na intensidade de compactação 1 os poros arredondados representam 81,90% do total de poros, na intensidade 2 representam 97,0% do seu total de poros, na intensidade de compactação 3 correspondem a 87,58% e na intensidade 4 correspondem a 98,18%. A maior porcentagem de poros alongados ocorreu para a intensidade de compactação 1, ou seja, 14,70%. Nas demais intensidades os poros alongados representam 2,16%; 3,0% e 1,81%, respectivamente, nas intensidades 2, 3 e 4. Os poros complexos foram encontrados apenas nas intensidades 1 e 3 com valores de 3,41% e 9,40%, respectivamente.

Quanto ao tamanho dos poros para a dose de 50 t ha<sup>-1</sup> de serragem, observa-se que em todas as intensidades de compactação os poros que ocorreram em menor porcentagem foram os poros grandes. Na intensidade de compactação 1 houve predominância de poros médios na proporção de 49,4%, seguida por 30,68% de poros pequenos e 19,98% de poros grandes. Para a intensidade de compactação 2 observou-se 65,04% poros pequenos e 34,96% de poros médios. Ocorreu predominância de poros de médios na intensidade de compactação 2 com 41,42%, seguida por 30,38% de poros pequenos e 28,20% de poros grandes. Na intensidade de compactação 4 também houve predominância de poros médios com 42,08%, seguida por poros pequenos com 37,03% e por poros grandes com 20,17%.

Nos tratamentos com dose de 80 t ha<sup>-1</sup> não foram encontradas diferenças significativas entre as intensidades de compactação em função da maior dose de material orgânico adicionada, resultado que comprova a atuação desses materiais dificultando o rearranjo das partículas e, conseqüentemente, a diminuição da porosidade do solo como resultado do processo de compactação. Maiores teores de matéria orgânica no solo podem evitar ou reduzir a compactação do solo (MORAES et al., 1995), pois esta possui um

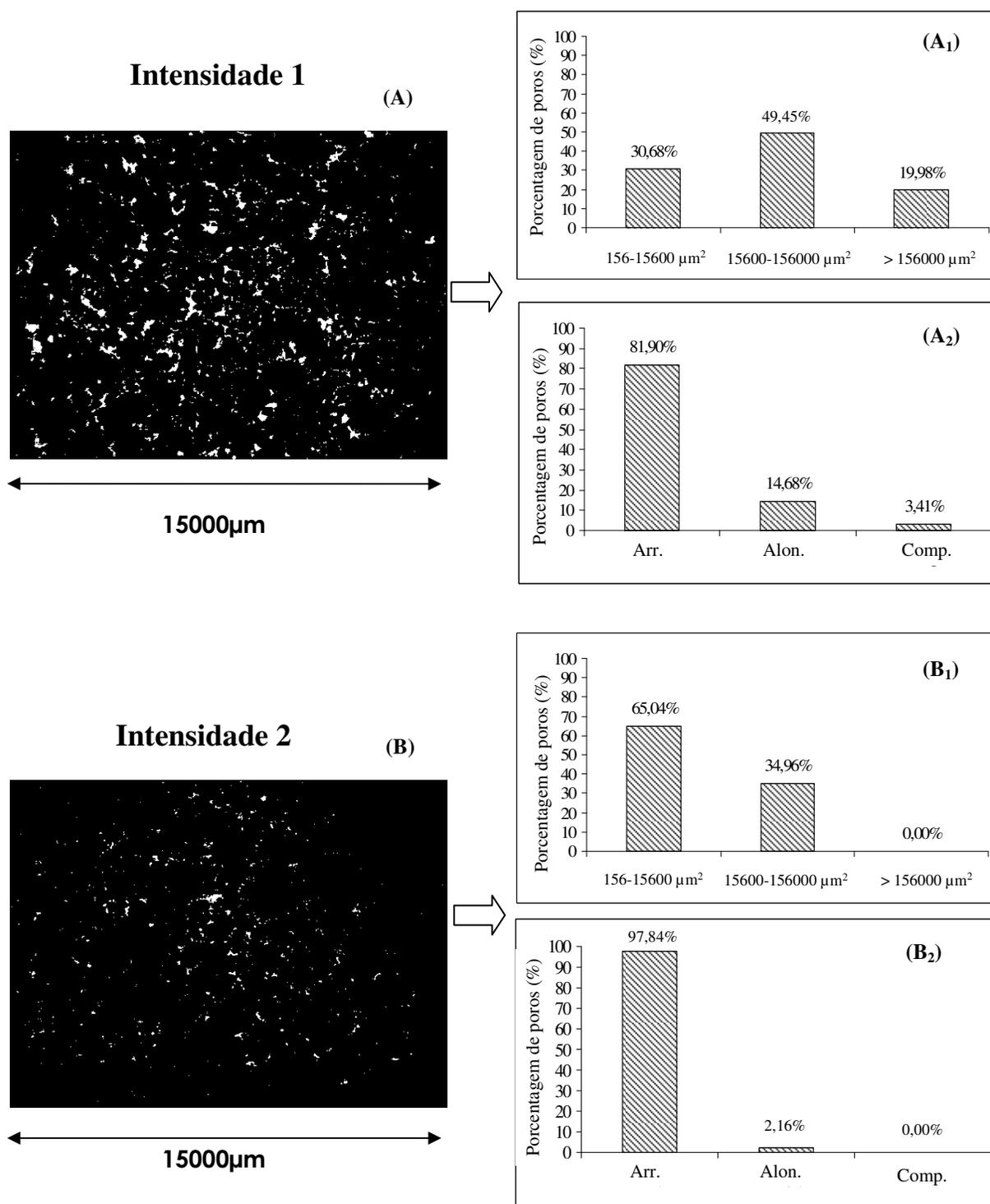


Figura 26. Imagens binarizadas (porosidade em branco e fase sólida em preto) das intensidades de compactação 1 (A) e 2 (B) no tratamento com 50 t ha<sup>-1</sup> de serragem. Detalhamento da porosidade quanto ao tamanho (A<sub>1</sub> e B<sub>1</sub>) e quanto a forma (A<sub>2</sub> e B<sub>2</sub>).

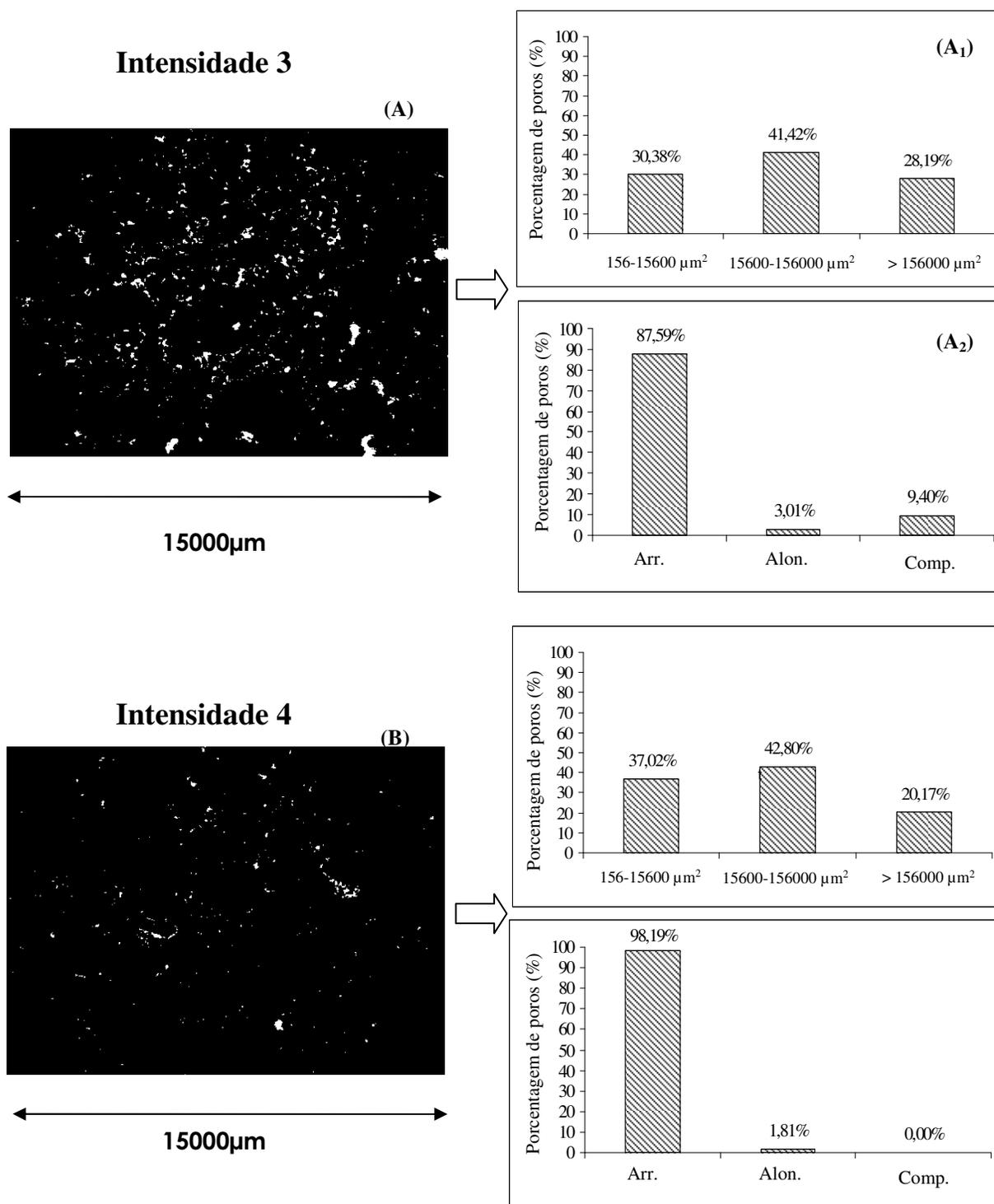


Figura 27. Imagens binarizadas (porosidade em branco e fase sólida em preto) das intensidades de compactação 3 (A) e 4 (B) no tratamento com 50 t ha<sup>-1</sup> de serragem. Detalhamento da porosidade quanto ao tamanho (A<sub>1</sub> e B<sub>1</sub>) e quanto a forma (A<sub>2</sub> e B<sub>2</sub>).

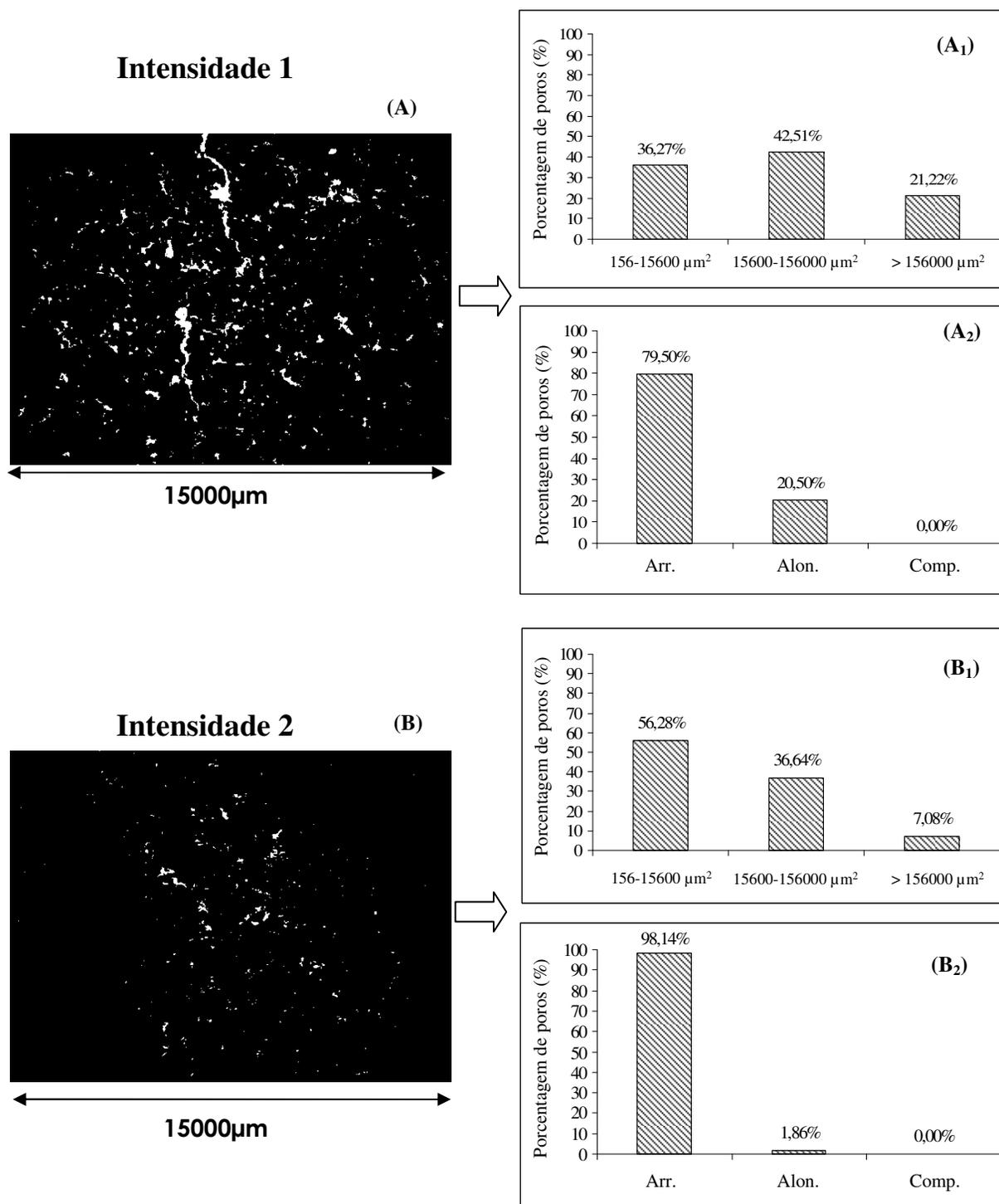


Figura 28. Imagens binarizadas (porosidade em branco e fase sólida em preto) das intensidades de compactação 1 (A) e 2 (B) no tratamento com 80 t ha<sup>-1</sup> de serragem. Detalhamento da porosidade quanto ao tamanho (A<sub>1</sub> e B<sub>1</sub>) e quanto a forma (A<sub>2</sub> e B<sub>2</sub>).

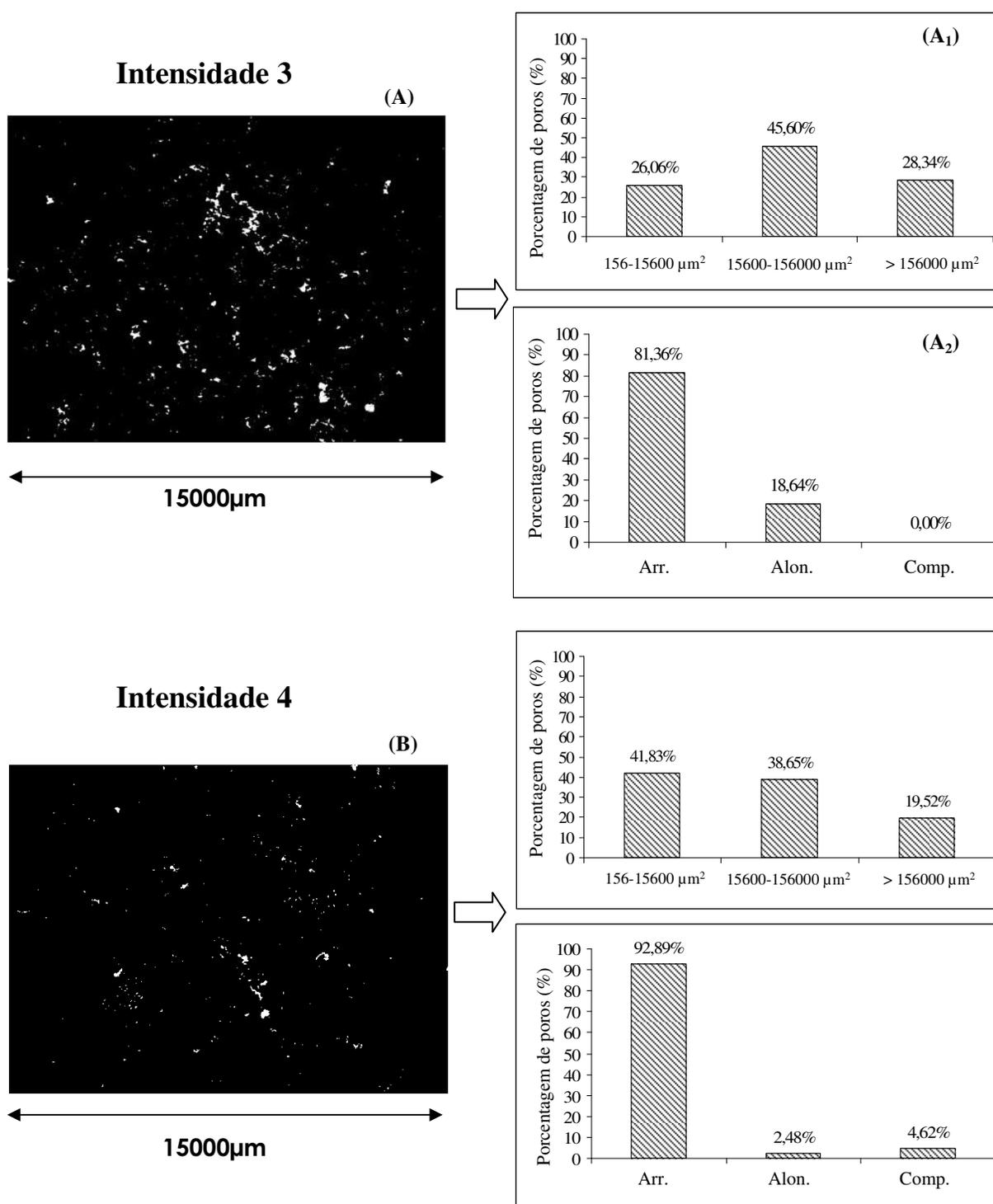


Figura 29. Imagens binarizadas (porosidade em branco e fase sólida em preto) das intensidades de compactação 3 (A) e 4 (B) no tratamento com 80 t ha<sup>-1</sup> de serragem. Detalhamento da porosidade quanto ao tamanho (A<sub>1</sub> e B<sub>1</sub>) e quanto à forma (A<sub>2</sub> e B<sub>2</sub>).

alto poder de adsorção de água, aumentando a demanda desta para que o solo alcance o conteúdo de umidade crítico para causar compactação (BRADY, 1989).

A ocorrência de poros arredondados também foi predominante para a dose de 80 t ha<sup>-1</sup> (Figuras 28 e 29), assim como para as doses de 30 e 50 t ha<sup>-1</sup>. Os valores encontrados foram de 79,5%; 98,14%; 81,36% e 92,89%, respectivamente, nas intensidades 1, 2, 3 e 4. Nas intensidades 1 e 3 os valores de poros do tipo alongados foram 20,5% e 18,64%, respectivamente, maiores em comparação a todos os tratamentos com serragem analisados no trabalho. A única intensidade de compactação que apresentou poros complexos foi a intensidade 4 com 4,63% do total de poros.

A porosidade do solo na dose de 30 t ha<sup>-1</sup> de BIOMIX<sup>®</sup> (Tabela 28) não mostrou diferença estatística entre as intensidades 1, 2 e 3, respectivamente, 4,28%, 2,26% e 3,93%, valores esses maiores que o observado para a intensidade 4, de 0,12%, resultado que mostra a influência positiva da adição desse material ao solo, contra os efeitos da compactação, em comparação com o tratamento sem adição de serragem, para o qual foram observados menores valores de porosidade para as intensidades de compactação 2, 3 e 4 em comparação com a intensidade 1.

Nas figuras 30 e 31, observa-se predominância de poros médios nas intensidades de compactação 1, 2 e 3. Esse tamanho de poro representa 47,82% na intensidade de compactação 1, 50,30% na intensidade de compactação 2 e 51,49% na intensidade 3. A intensidade de compactação 4, considerada a mais severa, é a única que apresenta predominância de poros pequenos. A predominância de poros pequenos é resultado da diminuição dos poros grandes do solo em função da ocorrência de compactação (KLEIN; LIBARDI, 2002; RICHART et al., 2005) e ao aumento da microporosidade (MACHADO; FAVARETTO, 2006).

Quanto a forma o tipo de poros predominante são os arredondados, sendo 93,09% na intensidade de compactação 1 (Figura 30 A<sub>2</sub>), 95,07% na intensidade 2 (Figura 30 B<sub>2</sub>), 76,69% na intensidade 3 (Figura 31 A<sub>2</sub>) e 100% na intensidade 4 (Figura 31 B<sub>2</sub>).

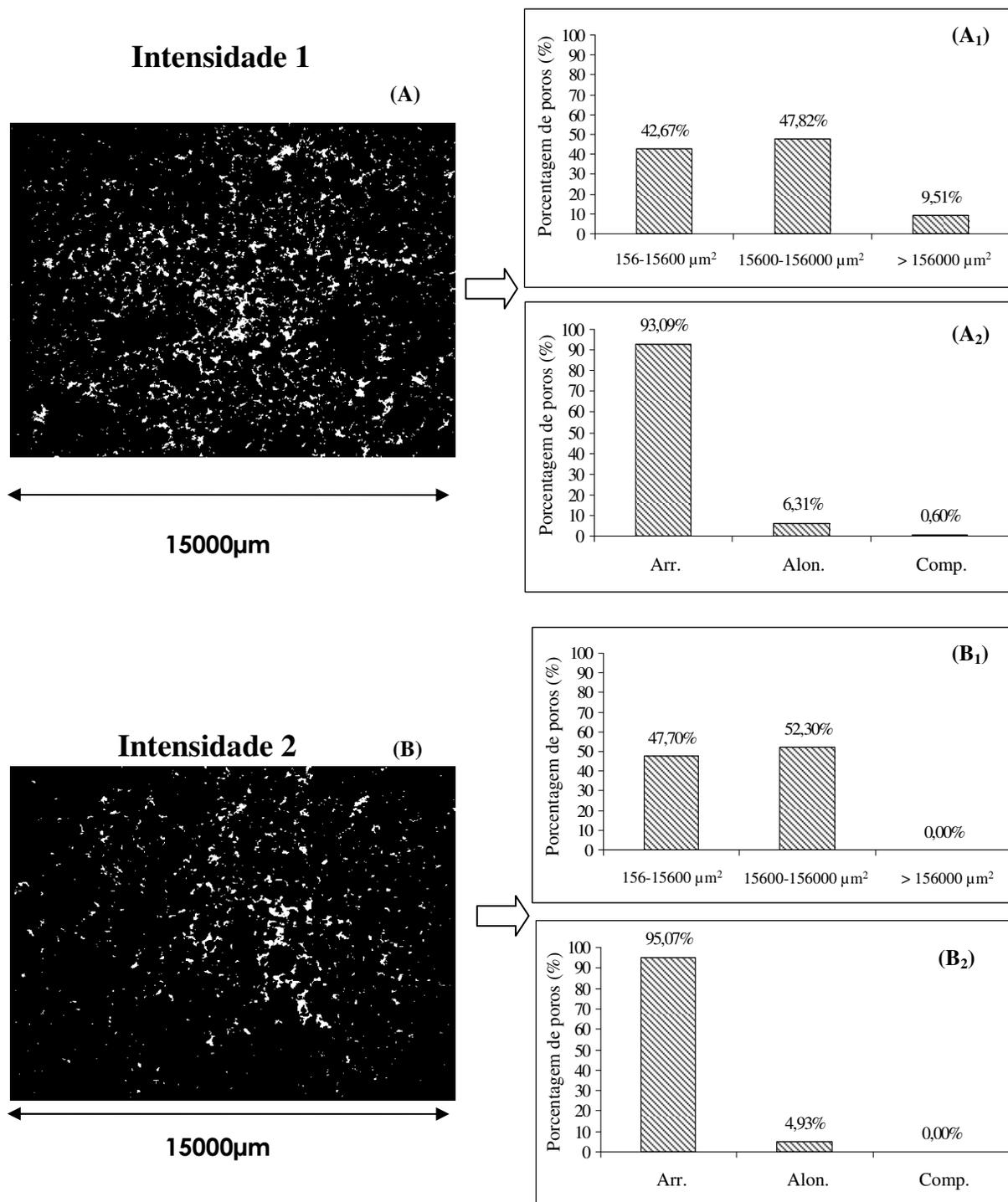


Figura 30. Imagens binarizadas (porosidade em branco e fase sólida em preto) das intensidades de compactação 1 (A) e 2 (B) no tratamento com 30 t ha<sup>-1</sup> de BIOMIX<sup>®</sup>. Detalhamento da porosidade quanto ao tamanho (A<sub>1</sub> e B<sub>1</sub>) e quanto a forma (A<sub>2</sub> e B<sub>2</sub>).

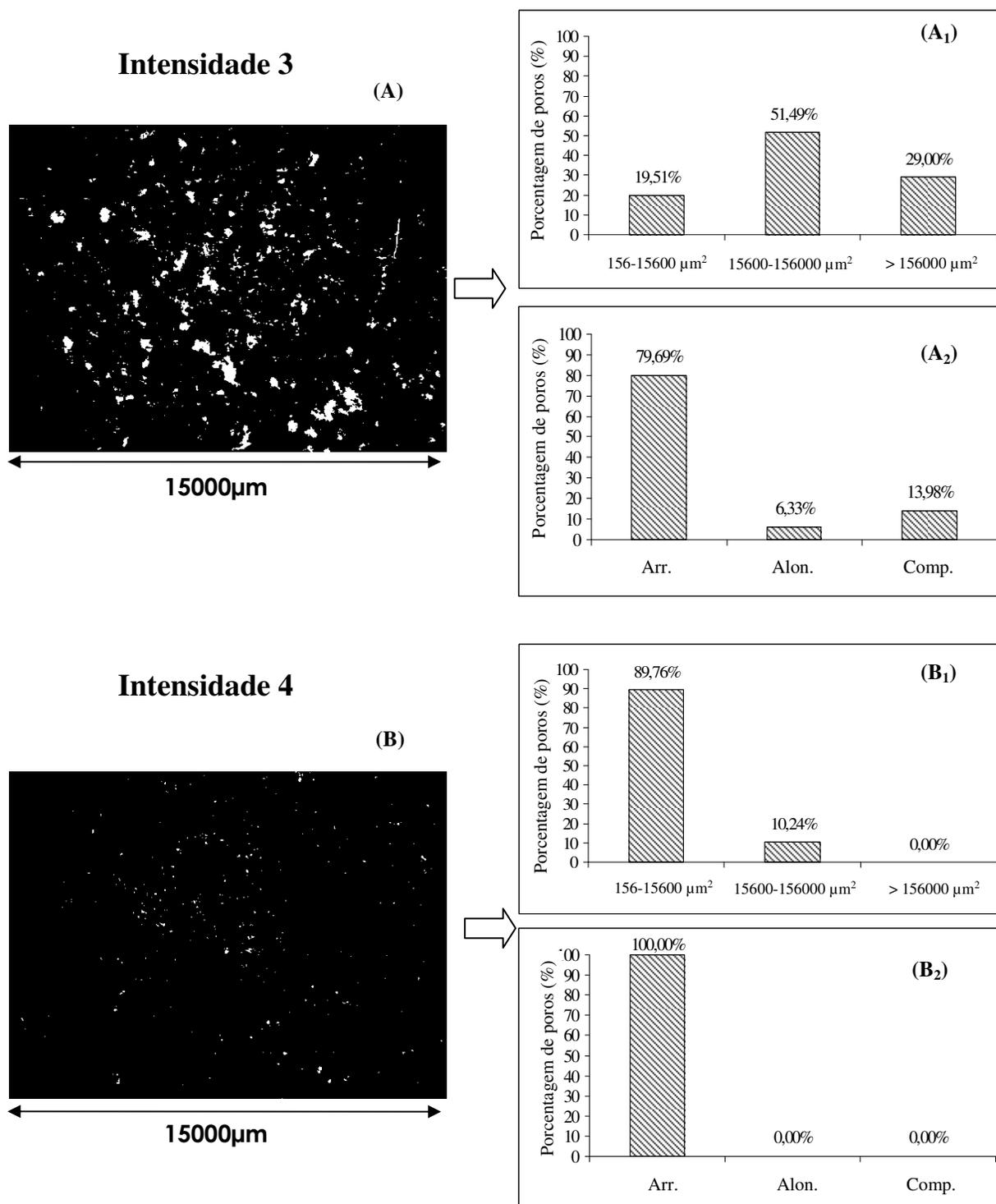


Figura 31. Imagens binarizadas (porosidade em branco e fase sólida em preto) das intensidades de compactação 3 (A) e 4 (B) no tratamento com 30 t ha<sup>-1</sup> de BIOMIX<sup>®</sup>. Detalhamento da porosidade quanto ao tamanho (A<sub>1</sub> e B<sub>1</sub>) e quanto a forma (A<sub>2</sub> e B<sub>2</sub>).

Os valores da porosidade do solo nas intensidades 1, 2, 3 e 4 foram de 1,66%, 0,98%, 1,03% e 3,20%, e de 2,31%, 0,86%, 1,40% e 2,18%, respectivamente, para as doses de 50 e 80 t ha<sup>-1</sup> de BIOMIX<sup>®</sup> (Tabela 28). Apesar dessa variação os valores não diferem estatisticamente entre si, evidenciando que as duas doses de BIOMIX<sup>®</sup> evitaram a redução causada pela compactação na porosidade do solo.

Essa semelhança na porosidade pode ser atribuída ao fato de que, apesar do aumento na intensidade de compactação houve elevação na porcentagem de poros grandes (Figuras 32, 33, 34 e 35), devido à melhor agregação das partículas ocasionada pela adição do material orgânico ao solo (BRANDÃO, 2006), uma vez que os poros maiores se formam entre agregados (PREVEDELLO, 1996; BENITES et al., 2005), bem como pela predominância de partículas grandes, uma vez que 89,79% do material era constituído por partículas esféricas com diâmetro entre 4,0 e 1,0 mm. Quando as partículas do solo ocorrem, predominantemente, na forma esférica, com diâmetro semelhante, se agrupam na forma cúbica, resultando numa porosidade de maior tamanho do que quando comparada com uma disposição das partículas na forma piramidal, formando tetraedros (KIEHL, 1979).

A porcentagem de poros grandes, para a dose de 50 t ha<sup>-1</sup> de BIOMIX<sup>®</sup> foi de 12,58% (Figura 32 A<sub>1</sub>), 30,77% (Figura 32 B<sub>1</sub>), 70,33% (Figura 33 A<sub>1</sub>) e 82,05% (Figura 33 B<sub>1</sub>), e para a dose de 80 t ha<sup>-1</sup> de BIOMIX<sup>®</sup> foi de 15,54% (Figura 34 A<sub>1</sub>), 30,07% (Figura 34 B<sub>1</sub>), 56,20% (Figura 35 A<sub>1</sub>) e 64,62% (Figura 35 B<sub>1</sub>), respectivamente, nas intensidades de compactação 1, 2, 3 e 4. Deve-se considerar, também, que a presença de material orgânico, entre as partículas minerais do solo, dificultou a ocorrência do processo de compactação, pois, como o material orgânico adsorve parte da água adicionada ao solo não ocorre um rearranjo mais denso das partículas, com diminuição no tamanho dos poros, característico do processo de compactação (BRADY, 1989; MORAES et al., 1995).

Nas figuras 32 e 33 observa-se que, para a dose de 50 t ha<sup>-1</sup> de Biomix<sup>®</sup>, com o aumento na intensidade de compactação a porcentagem de poros arredondados diminuiu, dando lugar aos poros alongados e complexos. Na intensidade de compactação 1, a porcentagem de poros arredondados foi de 90,05%, a de poros alongados de 3,07% e a de poros complexos de 6,88% (Figura 32 A<sub>2</sub>). Na intensidade de compactação 2 a porcentagem de poros arredondados diminuiu para 85,69%, a de poros alongados para 1,78%,

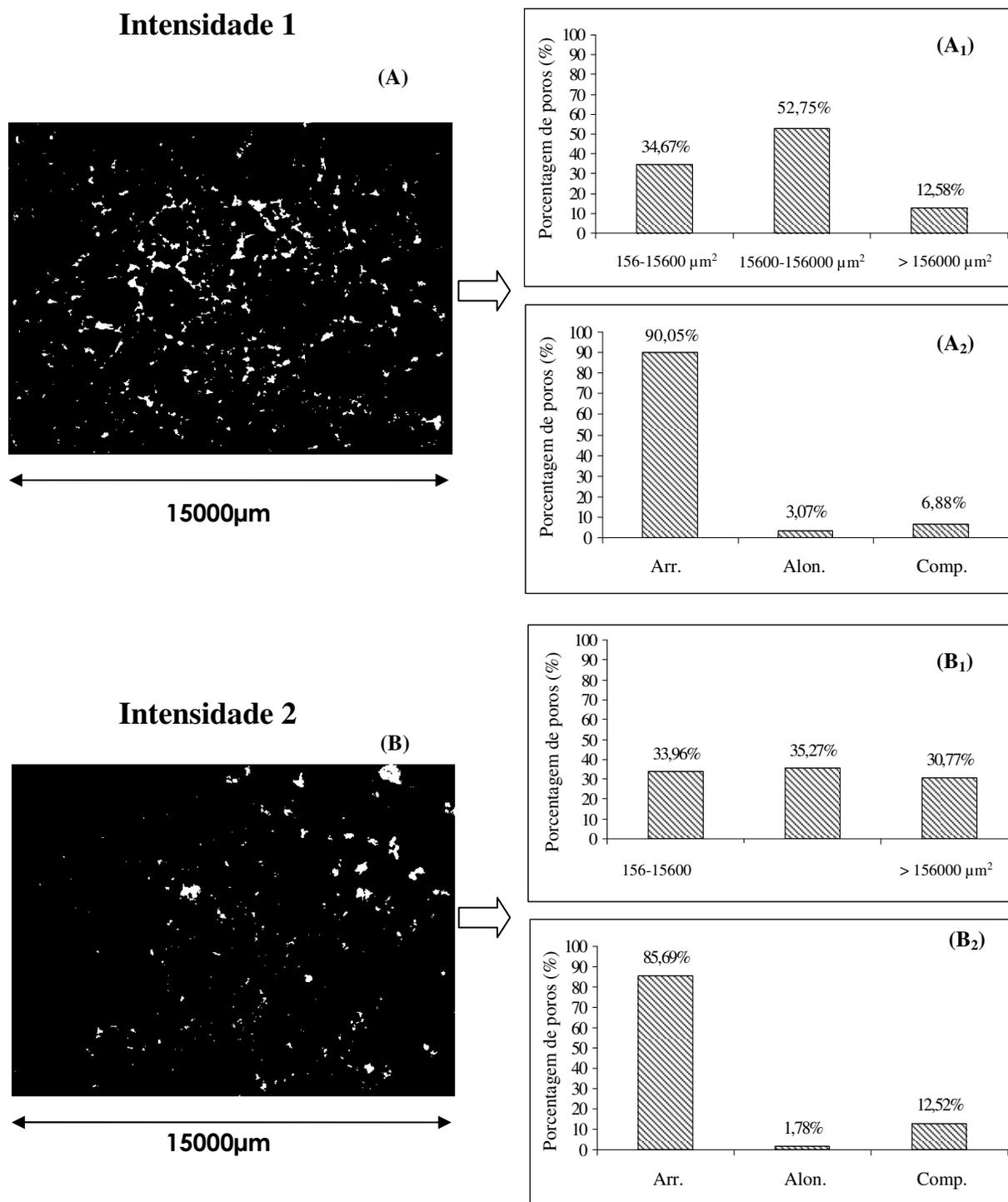


Figura 32. Imagens binarizadas (porosidade em branco e fase sólida em preto) das intensidades de compactação 1 (A) e 2 (B) no tratamento com 50 t ha<sup>-1</sup> de BIOMIX<sup>®</sup>. Detalhamento da porosidade quanto ao tamanho (A<sub>1</sub> e B<sub>1</sub>) e quanto a forma (A<sub>2</sub> e B<sub>2</sub>).

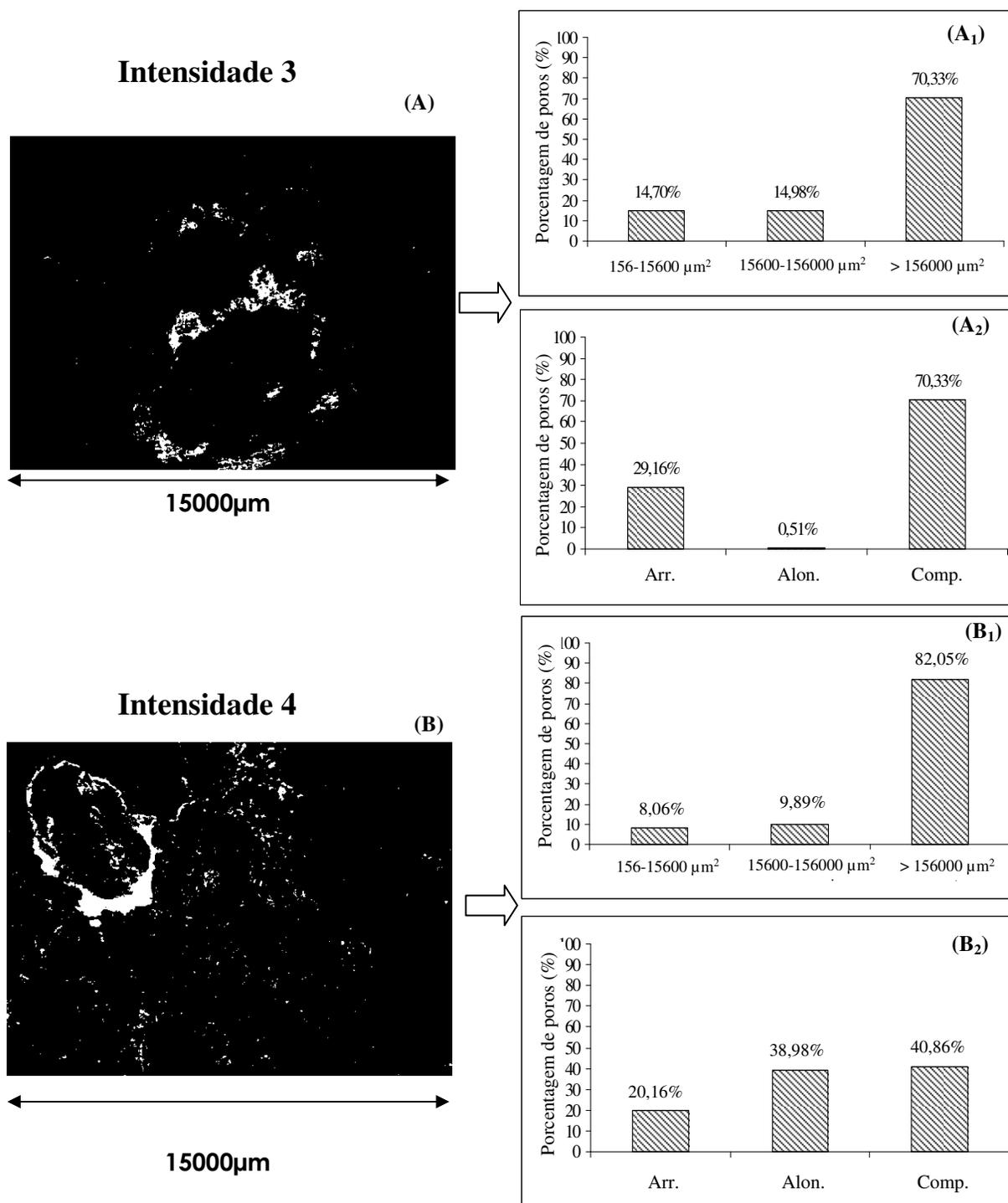


Figura 33. Imagens binarizadas (porosidade em branco e fase sólida em preto) das intensidades de compactação 3 (A) e 4 (B) no tratamento com 50 t ha<sup>-1</sup> de BIOMIX<sup>®</sup>. Detalhamento da porosidade quanto ao tamanho (A<sub>1</sub> e B<sub>1</sub>) e quanto a forma (A<sub>2</sub> e B<sub>2</sub>).

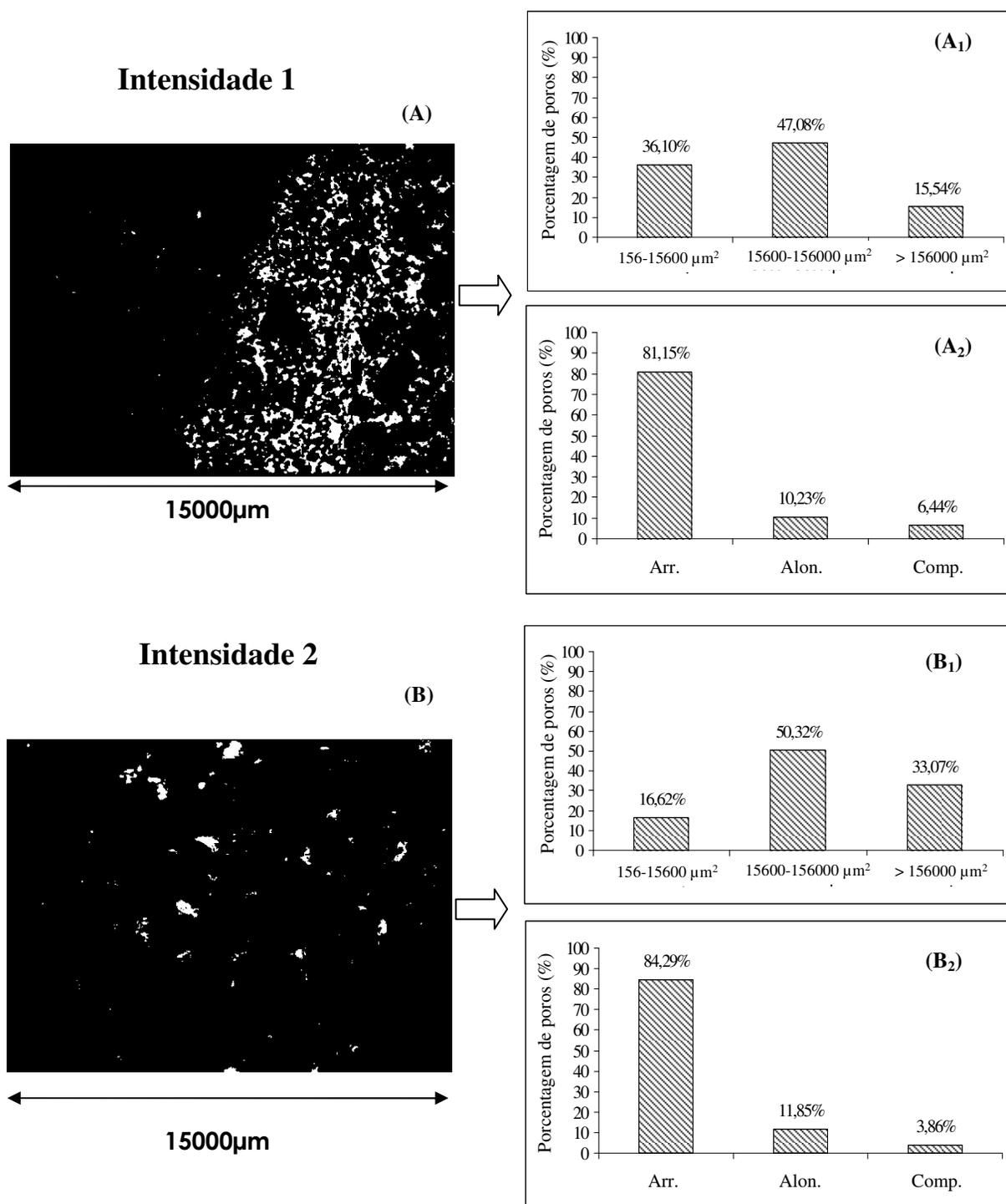


Figura 34. Imagens binarizadas (porosidade em branco e fase sólida em preto) das intensidades de compactação 1 (A) e 2 (B) no tratamento com  $80 \text{ t ha}^{-1}$  de BIOMIX<sup>®</sup>. Detalhamento da porosidade quanto ao tamanho (A<sub>1</sub> e B<sub>1</sub>) e quanto a forma (A<sub>2</sub> e B<sub>2</sub>).

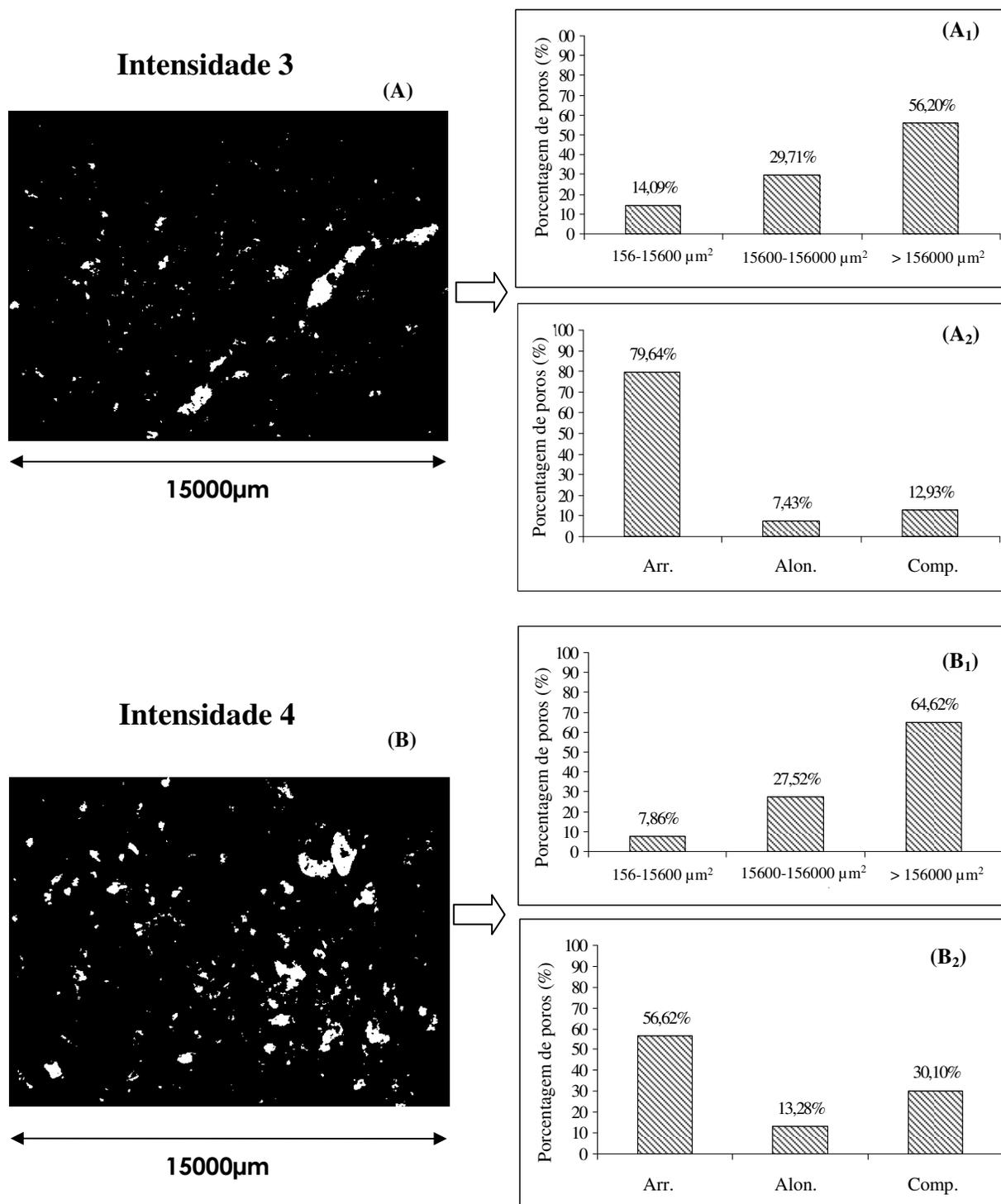


Figura 35. Imagens binarizadas (porosidade em branco e fase sólida em preto) das intensidades de compactação 3 (A) e 4 (B) no tratamento com 80 t ha<sup>-1</sup> de BIOMIX<sup>®</sup>. Detalhamento da porosidade quanto ao tamanho (A<sub>1</sub> e B<sub>1</sub>) e quanto a forma (A<sub>2</sub> e B<sub>2</sub>).

e a de poros complexos aumentou para 12,52% (Figura 32 B<sub>2</sub>). Na intensidade de compactação 3 a porcentagem de poros arredondados foi de 29,16%, a de alongados foi de 0,51% e a de poros complexos foi de 70,33% (Figura 33 A<sub>2</sub>). Na intensidade de compactação 4 a porcentagem de poros arredondados foi de 20,16%, a de poros alongados foi de 38,98% e a de poros complexos foi de 40,86% (Figura 33 B<sub>2</sub>).

Para a dose de 80 t.ha<sup>-1</sup> de BIOMIX<sup>®</sup>, nas intensidades de compactação 1 e 2, ocorreu predominância de poros médios. Na intensidade de compactação 1 a porcentagem de poros médios foi de 47,08%, a de poros pequenos foi de 36,10% e a de poros grandes foi de 15,54% (Figura 34 A<sub>1</sub>); na intensidade de compactação 2 a porcentagem de poros médios foi de 50,32%, seguida pela porcentagem de poros grandes que foi de 30,07% e pela porcentagem de poros pequenos que foi de 16,62% (Figura 34 B<sub>1</sub>). Nas intensidades de compactação 3 e 4 a predominância, quanto ao tamanho dos poros, passa a ser de poros grandes. A porcentagem de poros grandes foi de 56,20% na intensidade de compactação 3, seguida pela porcentagem de poros médios de 29,71% e de poros pequenos de 14,09% (Figura 35 A<sub>1</sub>). Na intensidade 4 os poros grandes representaram 64,62%, os poros médios 27,52% e os pequenos 7,86% (Figura 35 A<sub>1</sub>).

Para todas as intensidades de compactação (Figuras 34 e 35), ocorreu predominância de poros arredondados, porém, nas intensidades 3 e 4 a porcentagem desse tipo de poro diminuiu em relação a intensidade 1, sendo essa porcentagem de 81,15% na intensidade 1 (Figura 34 A<sub>2</sub>), 79,64% na intensidade 3 (Figura 35 A<sub>2</sub>) e 56,62% na intensidade 4 (Figura 35 B<sub>2</sub>). Para os poros do tipo complexos, a porcentagem aumentou da intensidade 1 para a intensidade 3 e, posteriormente, para a intensidade 4, sendo seus valores de 6,44%, 12,93% e 30,10%, respectivamente.

## 5 CONCLUSÕES

O processo compactação altera negativamente a densidade do solo, a resistência do solo à penetração, a porosidade total, a macroporosidade e condutividade hidráulica.

A adição de matéria orgânica melhora as propriedades físicas do solo, sendo capaz de minimizar os efeitos ocasionados pela compactação.

A dose de 30 t.ha<sup>-1</sup> de material orgânico é suficiente para diminuir os efeitos nocivos da compactação na densidade do solo, porosidade total, a macroporosidade e a resistência do solo à penetração.

A análise de imagens permite a identificação de alterações na porosidade do solo ocasionadas pela compactação, principalmente quanto ao tipo de poros e quanto ao tamanho dos mesmos.

A compactação ocasiona redução de poros grandes e complexos, e aumento de poros pequenos e arredondados.

Solos nas doses de 50 t.ha<sup>-1</sup> e 80 t.ha<sup>-1</sup> de BIOMIX<sup>®</sup> apresentam melhoria na conectividade entre poros e aumento de poros complexos.

## 6 REFERÊNCIAS

ALVES, M. C.; SUZUKI, L. E. A. S. Influência de diferentes sistemas de manejo do solo na recuperação de suas propriedades físicas. **Acta Scientiarum Agronomy**, Maringá, v. 26, n. 1, p.27-34, 2004.

ARAÚJO, M. A.; TORMENA, C. A.; SILVA, A.P. Propriedades físicas de uma Latossolo Vermelho distrófico cultivado e sob mata nativa. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 2, p. 337-345, 2004.

ASSOCIAÇÃO BRASILEIRA DE NORMAS TÉCNICAS. **NBR 7182/86**: solo: ensaio de compactação. Rio de Janeiro, 1986. 10 p.

ANDREOLA, F.; COSTA, L. M.; OLSZEWSKI, N. Influência da cobertura vegetal de inverno e da adubação orgânica e ou mineral sobre as propriedades físicas de uma Terra Roxa Estruturada. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 24, p. 857-865, 2000.

BARBOSA, G. M. C.; TAVARES FILHO J.; FONSECA, I. C. B. Condutividade hidráulica saturada e não saturada de Latossolo Vermelho eutroférico tratado com lodo de esgoto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, p. 403-407, 2004.

BARILLI, J. **Atributos de um Latossolo Vermelho sob aplicação de resíduos de suínos.** 2005. 78 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Agricultura)–Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2005.

BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Dinâmica e fundação da matéria orgânica. In: SANTOS, G. de A.; SILVA, L. S. da; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. (eds.). **Fundamentos da matéria orgânica no solo:** ecossistemas tropicais e subtropicais. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p. 7-18.

BENITES, V. de M.; MADARI, B.; BERNARDI, A. C. C.; MACHADO, P. L. O. Matéria orgânica do solo. In: Walt, P. G. S (ed) **Manejo do solo e recomendação de adubação para o estado do Acre.** Rio Branco: Embrapa Acre, 2005. p. 93-120.

BERTONI, J.; LOMBARDI NETO, F. **Conservação do solo.** São Paulo: Ícone, 1990. 355 p.

BERTOL, I.; ALBUQUERQUE, J. A.; LEITE, D.; AMARAL, A. J.; JUNIOR, W. A. Z. Propriedades físicas do solo sob preparo convencional e semeadura direta em rotação e sucessão de culturas, comparadas as do campo nativo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, n. 1, p. 155-163, 2004.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F. Matéria seca e altura das plantas de soja e arroz em função do grau de compactação e do teor de água de dois Latossolos. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 24, n. 1, p. 142-149, 2004.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; SILVA, A. P.; ROQUE, C. G.; FERRAZ, M. V. Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo na produtividade de arroz de sequeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 6, p. 557-580, 2004.

BEUTLER, A. N.; CENTURION, J. F.; CENTURION, M. A. P. DA C.; FREDDI, O. DA S.; SOUSA NETO, E. L. DE; LEONEL, C. L.; SILVA, Á. P. DA. Compactação de um Latossolo devido ao tráfego relacionado ao desenvolvimento e produtividade de soja. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 64, n. 6, p. 608-615, 2007.

BOONE, F. R.; VEEN, B. W. Mechanisms of crop responses to soil compaction. In: SOANE, B. D.; van OUWERKWRK, C. **Soil compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier, 1994. p. 237-264.

BORDIN, I.; NEVES, C. S. V. J.; AZEVEDO, M. C. B. de; VIDAL, L. H. I. Desenvolvimento de mudas de aceroleira propagadas por estacas e sementes em solo compactado. *Ciência Rural*, Santa Maria, v. 35, n. 3, p. 539-536, 2005.

BORDIN, I. V.; MISSIO, R. F.; CASIMIRO, E. L. N.; CASTRO, A. M. C.e; FEY, E. Desenvolvimento de mudas de pupunheira em Latossolo argiloso compactado artificialmente em subsuperfície. *Ciencia Rural*, Santa Maria, v. 36, n. 1, 2006.

BORGES, E. N.; LOMBARDI NETO, F.; CORRÊA, G. F. E.; BORGES, E. V. S. Alterações físicas introduzidas por diferentes níveis de compactação em Latossolo Vermelho Escuro textura média. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 34, p. 1663-1667, 1999.

BOWEN, H. D. Alleviating mechanical impedance. In: ARKIN, G. F., TAYLOR, H. M., (eds.) **Modifying the root environment to reduce crop stress**. St. Joseph: American Society of Agricultural Engineers, 1981. p. 21-57.

BRADY, N. C. **Natureza e propriedades dos solos**. 7. ed. Rio de Janeiro: Freitas Barros, 1989. 898 p.

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

BRANDÃO, V. dos S. **Infiltração da água no solo**. 3. ed. Viçosa: Editora da UFV, 2006. 120 p.

BULLOCK, P.; FEDOROFF, N.; JONGERIUS, A.; STOOPS, G.; TURSINA, T.; BABEL, U. **Handbook for soil thin section description**. Wolverhampton: Waine Research Publication, 1985. 152 p.

CALONEGO, J. C. **Uso de plantas de cobertura na recuperação de solo compactado**. 2007. 125 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônomicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2007.

CAMARA, K. C.; KLEIN, V. A. Propriedades físico-hídricas do solo sob plantio direto escarificado e rendimento da soja. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 4, p. 813-819, jul./ago, 2005.

CAMARGO, O. A. de. **Compactação do solo e desenvolvimento de plantas**. Campinas: Fundação Cargill. 1983. 44 p.

CAMARGO, O. A.; ALLEONI, L. R. F. **Compactação do solo e o desenvolvimento das plantas**. Piracicaba: [s.n.], 1997. 132 p.

CAMARGO, C. M. S.; MALINOVSKI, J. R.; ROLOFF, G. A sustentabilidade de um Cambissolo após a colheita de Pinus no sistema fuste. In: SEMINÁRIO DE ATUALIZAÇÃO EM SISTEMA DE COLHEITA DE MADEIRA E TRANSPORTE FLORESTAL, 11., 2000, Curitiba. **Anais...**: Curitiba: UFPR, 2000, p. 274-290.

CAMILOTTI, F.; ANDRIOLI, I.; DIAS, F. L. F.; CASAGRANDE, A. A.; SILVA, A. R. da; MUTTON, M. A.; CENTURION, J. F. Efeito prolongado de sistemas de preparo do solo com e sem cultivo de soqueira de cana crua em algumas propriedades físicas do solo. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 25, p. 189-198, 2005.

CASTRO NETO, P. **Desenvolvimento e avaliação de equipamentos e metodologia para determinação de parâmetros físicos do solo relacionados a dias trabalháveis com máquinas agrícolas.** 2001. 155 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Energia na Agricultura)–Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2001.

CASTRO, S. S. **Impregnação de amostras de solo para confecção de lâmina delgada.** Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1985, p. 31-44. (Boletim Informativo).

CASTRO, S. S. Micromorfologia de solos aplicada ao diagnóstico de erosão. In: GUERRA, A. J. T.; SILVA, A. S. & BOTELHO, R. G. M., (orgs). **Erosão e conservação dos solos: conceitos, temas e aplicações.** Rio de Janeiro, Bertrand Brasil, 1999. p. 127-163.

CASTRO, S. S.; COOPER, M.; SANTOS, M. C.; VIDAL-TORRADO, P. Micromorfologia do solo: bases e aplicações. In: CURI, N; MARQUES, J. J.; GUILHERME, L. R. G.; LIMA, J. M.; LOPES, A. S.; ALVAREZ VENEGAS, V. H. (Eds). **Tópicos em ciência do solo. Sociedade Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 3, p. 107-164, 2003.

CERRI, C. C.; MORAES, J. F. L. Conseqüência do uso e manejo do solo no teor de matéria orgânica. In: ENCONTRO SOBRE MATÉRIA ORGÂNICA DO SOLO, 1992, Botucatu. *Anais...* Botucatu: Universidade Estadual de São Paulo, 1992. p.26-36.

CONEGLIAN, C. **Efeito de resíduos vegetais de milho (*Pennisetum americanum*) e da calagem em algumas propriedades físicas de um Nitossolo Vermelho em sistema de semeadura direta.** 2002. 89 f. Tese (Mestrado em Agronomia/Agricultura)–Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2002.

COOPER, M. **Influência das condições físico-hídricas nas transformações estruturais entre horizontes B latossólico e B textural sobre diabásio.** 1999. 127 p. Tese (Doutorado em Solos e Nutrição de Plantas) – Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 1999.

COOPER, M.; Vidal-Torrado, P. Caracterização morfológica, micromorfológica e físico-hídrica de solos com horizonte B nítico. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 29, n. 4, p. 581-595, 2005.

COSTA, J. B. **Caracterização e constituição do solo**. 2.ed. Lisboa: Fundação Calouste Gulbenkia, 1979. 526 p.

COSTA, F. S.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; FONTOURA, S. M. V.; WOBETO, C. Propriedades físicas de um Latossolo Bruno afetadas pelos sistemas plantio direto e preparo convencional. Viçosa, **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 27, n. 3, p. 527-535, 2003.

CRUCIANI, D. E. **A drenagem na agricultura**. Nobel: São Paulo, 1989. 337 p.

CURI, N.; LARACH, J. O. I.; KÄMPF, N.; MONIZ, A. C.; FONTES, L. E. F. **Vocabulário de ciência do solo**. Campinas: Sociedade Brasileira de Ciência do Solo. 1993. 90 p.

DIAS, F. da C. **Uso do software image j para análise quantitativa de imagens de microestruturas de materiais**. 2008. 148 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia e Tecnologia Espaciais/Ciência e Tecnologia de Materiais e Sensores)- Instituto Nacional de Pesquisas Espaciais, São José dos Campos, 2008.

DIAS JÚNIOR, M. S. **Notas de aulas de física do solo**. Lavras: Departamento de Ciência do Solo, UFLA, 1996.168 p.

DIAS JUNIOR, M. de S.; PIERCE, F. J. O processo de compactação do solo e sua modelagem. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Campinas, v. 20, p. 175-182, 1996.

DURUOHA, C. **Desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar (*Saccharum spp.*) em função da compactação, do teor de água e do tipo de solo**. 2000. 109 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Energia na Agricultura)–Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2000.

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

EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA, Centro Nacional de Pesquisa de Solos. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. 2. ed. Rio de Janeiro: EMBRAPA Solos, 2006. 306 p.

FOLONI, J. S. S. **Crescimento radicular da soja (*Glycine max* (L.) Merrill) e de cinco adubos verdes em função da compactação do solo**. 1999. 73 f. Dissertação (Mestrado em Agricultura) - Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 1999.

FOLONI, J. S. S.; CALONEGO, J. C.; LIMA, S. L. de. Efeito da compactação do solo no desenvolvimento aéreo e radicular de cultivares de milho. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 38, n. 8, p. 947-953, 2003.

FREDDI, O. da S., CENTURON, J. F.; BEUTLER, A. N.; ARATANI, R. G.; LEONEL, C. L.; SILVA, A. P. da, Compactação do solo e intervalo hídrico ótimo no crescimento e na produtividade da cultura do milho. **Bragantia**, Campinas, v. 66, n. 3, p. 477-486, 2007.

GLÓRIA, N. A. **Uso agronômico de resíduos**. In: SIMPÓSIO DA REUNIÃO BRASILEIRA DE FERTILIDADE DO SOLO E NUTRIÇÃO DE PLANTAS, 20., 1992, Piracicaba. *Anais...* Piracicaba: SBCS – Sociedade Brasileira de Ciência do Solo, 1992. p. 195-212.

GOMES, M. R. M. **Análise de imagens no estudo da porosidade em latossolo cultivado com batata (*Solanum tuberosum* L.) sob dois sistemas de irrigação**. 2008. 61 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Agricultura)-Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2008.

GROHMANN, F. Compacidade. In: MONIZ, A.C. (Ed.). **Elementos de pedologia**. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos, 1975. p. 93-99.

GUIMARÃES, C. M.; STONE, L. F.; MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro II: efeito sobre o desenvolvimento radicular e da parte aérea. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 207-212, 2002.

HILLEL, D. **Introduction to soil physics**. New York: Academic Press Inc. 1982. 362 p.

HORTON, R.; ANKENY, M.D.; ALLMARAS, R.R. Effects of compaction on soil hydraulic properties. In: SOANE, B.D., OUWERKERK, C.VAN. (Eds.) **Soil Compaction in crop production**. Amsterdam: Elsevier Science, 1994. p. 141-165.

JORGE, J. A. **Solo: manejo e adubação: compêndio de edafologia**. 2. ed. São Paulo: Nobel, 1983.

JORGE, J. A. **Física e manejo dos solos tropicais**. Campinas: Instituto Campineiro de Ensino Agrícola, 1985. 328 p.

KEMPER, W. D.; STEWART, B. A.; PORTER, L. K. Effects of compaction on soil nutrient status. In: BARNES, K. K. (org). **Compaction of agricultural soils**. St. Joseph: ASAE, 1971. p. 178-189.

KIEHL, E. J. **Manual de Edafologia: relações solo-planta**. São Paulo: CERES, 1979. 262 p.

KIEHL, E. J. **Fertilizantes orgânicos**. Piracicaba: CERES, 1985. 429 p.

KLEIN, V. A.; LIBARDI, P. L. Condutividade Hidráulica de um Latossolo Roxo, não saturado, sob diferentes sistemas de uso e manejo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 32, n. 6, p. 945-953, 2002.

KOOISTRA, M. J.; SCHOONDERBEEK, D.; BOONE, F. R.; VEEN, B. W.; NOORDWIJK, M. van. Root-soil contact of maize, as measured by a thin-section technique II: effects of soil compaction. **Plant and Soil**, Dordrecht, v. 139, p. 119-129, 1992.

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

LEPSCH, I. F **Formação e conservação dos solos**. Uberlândia: Oficina dos textos, 2002. 178 p.

LIMA, H. V.; LIMA, C. L. R. de; LEÃO, T. P.; COOPER, M., SILVA, A. P. da; ROMERO, R. E. Tráfego de máquinas agrícolas e alterações de bioporos em área sob pomar de laranja. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 5, p. 677-684, 2005.

LIMA, C. L. R. de; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; SUZUKI, L. E. A. S.; GUBIANI, P. I. Qualidade físico-hídrica e rendimento de soja (*Glycine max L.*) e feijão (*Phaseolus vulgaris L.*) de um Argissolo Vermelho distrófico sob diferentes sistemas de manejo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 36, n. 4, p. 1172-1178, 2006.

MACHADO, A. de M. M.; FAVARETTO, N. Atributos físicos do solo relacionados ao manejo e conservação dos solos. In: LIMA, M. R. et al. **Diagnóstico e recomendações de manejo do solo: aspectos teóricos e metodológicos**. Curitiba: UFPR/ Setor de Ciências Agrárias, 2006. p. 234-254.

MANTOVANI, E. C. Compactação do solo. **Informe Agropecuário**, Belo Horizonte, v. 13, n. 147, p. 52-55, 1987.

MEDEIROS, R. D. de; SOARES, A .A.; GUIMARÃES, R. M. Compactação do solo e manejo da água. I: Efeitos sobre a absorção de N, P, K, massa seca de raízes e parte aérea de plantas de arroz. **Ciência e Agrotecnologia**, Lavras, v. 29, n. 5, p. 940-947, 2005.

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

MINATEL, A. L. G. I; ANDRIOLI, I.; CENTURION, J. F; NATALE, W. Efeitos da subsolagem e da adubação verde nas propriedades físicas do solo em pomar de citros. **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 26, n. 1, p. 86-95, 2006.

MORAES, M. H.; BENEZ, S. H; LIBARDI, P. Efeitos da compactação em algumas propriedades físicas do solo e seu reflexo no desenvolvimento das raízes de plantas de soja. **Bragantia**, Campinas, v. 54, n. 2, p. 393-403, 1995.

MORAES, M. H.; VILLAS BÔAS, R. L.; BREDÁ, C.C.; ELIAS JUNIOR, R. C.; LUNA, P. E. V.; PRADO FILHO, R. S. Efeito da compactação subsuperficial do solo no desenvolvimento inicial e no estado nutricional de plantas de feijoeiro (*Phaseolus vulgaris* L.). **Engenharia Agrícola**, Jaboticabal, v. 18, p. 35-43, 1998.

MORAES, M. H. **Porosity of a red latosol soil under different use and management systems**. 2006. In: V Congreso internacional de ingeniería agrícola, Termas de Chillan, Chile. 2006.

OLIVEIRA; J. C. M. de; VAZ, C. M. P; REICHARDT, K. Efeito do cultivo contínuo de cana de açúcar em propriedades físicas de um Latossolo Vermelho escuro. **Scientia Agrícola**, Piracicaba, v. 52, n. 1, p. 50-55, 1995.

OLIVEIRA, G. C. de; DIAS JUNIOR, M. de S.; RESCK, D. V. S.; CURI; N. Alterações estruturais e comportamento compressivo de um Latossolo Vermelho distrófico argiloso sob diferentes sistemas de uso e manejo. Brasília, **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 38, n. 2, p. 291-299, fev. 2003.

OLIVEIRA, J. B. de. **Pedologia Aplicada**. 2. ed. Piracicaba: Fealq: 2005. 574 p.

OLSZEWSKI, N.; COSTA, L. M.; FERNANDES FILHO, E. I.; RUIZ, H. A; ALVARENGA, R. C.; CRUZ, J. C. Morfologia de agregados do solo avaliada por meio de análise de imagens. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 28, p. 901-909, 2004.

ORTOLANI, A. F., COAN, O., SALLES, H. C. Influência da compactação do solo no desenvolvimento da soja (*Glycine max* (L) Merrill). **Engenharia Agrícola**, Botucatu, v. 6, n. 1, p. 35-42, 1982.

PAGLIAI, M.; BIISDOM, E.B.A.; LEDIN, S. Changes in surface structure (crusting) after application of sewage sludge and pig slurry to cultivated agricultural soils in northern Italy. **Geoderma**, Amsterdam, v. 30, p. 35-53, 1983.

PELÁ, A. **Efeito de adubos orgânicos provenientes de dejetos de bovinos confinados nos atributos físicos e químicos do solo e na produtividade do milho**. 2005. 134 f. Tese (Doutorado em Agronomia/Agricultura)–Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual Paulista, Botucatu, 2005.

PREVEDELLO, C. L. **Física do solo com problemas resolvidos**. Curitiba: SAEAFS, 1996. 446 p.

REICHARDT, K. **A água em sistemas agrícolas**. São Paulo: Editora Manoele Ltda, 1990. 188 p.

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

RESENDE, M.; CURI, N.; REZENDE, S. B.; CORRÊA, S. A. **Pedologia: base para distinção de ambientes**. 4. ed. Viçosa: NEPUT, 2002. 338 p.

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

RINGROSE-VOASE, A. J.; BULLOCK, P. The automatic recognition and measurement of soil pore types by image analysis and computer programs. **Journal of Soil Science**, Oxford, v. 35, p. 673-684, 1984.

ROSOLEM, C. A., FERNANDEZ, E. M., ANDREOTTI, M., CRUSCIOL, C. A. C. Crescimento radicular de plântulas de milho afetado pela resistência do solo à penetração. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 5, p. 821-828, 1999.

SECCO, D.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; DA ROS, C. O. Produtividade de soja e propriedades físicas de um Latossolo submetido a sistemas de manejo e compactação. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 5, p. 797-804, 2004.

SECCO, D.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; SILVA, V. R. da. Atributos físicos e rendimento de grãos de trigo, soja e milho em dois Latossolos compactados e escarificados. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 39, n.1, p. 58-64, 2009.

SCHULTZ, L. A. **Manual do plantio direto: técnicas e perspectivas**. Porto Alegre: Editora Agropecuária, 1978. 84 p.

SILVA, M. L. L. **Modelagem matemática na estimativa da densidade de um Latossolo Vermelho Escuro textura argilosa, pelo índice de cone**. 1999. 161f. Tese (Doutorado em Engenharia Agrícola)-Universidade Estadual de Campinas, Campinas, 1999.

SILVA, R. H.; RO SOLEM, C. A. Crescimento radicular de espécies utilizadas como cobertura decorrente da compactação do solo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v.25, n. 2, p. 253-260, 2001.

SILVA, A. P.; KAY, B. D. The sensitivity of shoot growth of corn to the least limiting water range of soils. **Plant and Soil**, v. 184, n. 2, p. 323-329, 1996.

SILVA, V. R. da, REINERT, D. J., REICHERT, J. M. Resistência mecânica do solo à penetração influenciada pelo tráfego de uma colhedora em dois sistemas de manejo do solo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 30, n. 5, p. 785-801, 2000.

SILVA, A. P.; TORMENA, C. A.; IMHOFF, S. Intervalo hídrico ótimo. In: MORAES, M. H.; MÜLLER, M. M. L.; FOLONI, J. S. S. **Qualidade física do solo: métodos de estudo sistemas de preparo e manejo do solo**. Jaboticabal: FUNEP, 2002. p.1-18.

SILVA, R. B.; DIAS JUNIOR, M. S.; SILVAF, A. M.; FOLE, S. M. O tráfego de máquinas agrícolas e as propriedades físicas, hídricas e mecânicas de um Latossolo dos Cerrados.. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 27, n. 6, p. 973-983, 2003.

SILVA, V. R.; REICHERT, J. M; REINERT, D. J. Variabilidade espacial da resistência do solo à penetração em plantio direto. **Ciência Rural**, v. 34, n. 2, p. 399-406, 2004.

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

SILVA, M. A. S. da; MAFRA, Á. L.; ALBUQUERQUE, J. A.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Atributos físicos do solo relacionados ao armazenamento de água em um Argissolo Vermelho sob diferentes sistemas de preparo. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 35, n. 3, p. 491-497, 2005b.

SILVA, M. A. S.; MAFRA, A. L.; ALBUQUERQUE, J. A.; ROSA, J. D.; BAYER, C.; MIELNICZUK, J. Propriedades físicas e teor de carbono orgânico de um Argissolo Vermelho sob distintos sistemas de uso e manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 30, n. 2, p. 329-337, 2006.

SILVA, C. A. Uso de resíduos orgânicos na agricultura. In: SANTOS, G. de A.; SILVA, L. S. da; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. (eds.). **Fundamentos da matéria orgânica no solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p. 597-621.

SOARES, J. L. N.; ESPINDOLA, C. R.; CASTRO, S. S. de. Alteração física e morfológica em solos cultivados sob sistema tradicional de manejo. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 29, n. 6, p.1005 - 1014, 2005a .

SOARES, J. L. N.; ESPINDOLA, C. R.; FOLONI, L. L. Alteração física e morfológica em solos cultivados com citros e cana-de-açúcar, sob sistema tradicional de manejo. **Ciência Rural**, v. 35, n. 2, p. 353-359, 2005b.

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

SPERA, S. T.; SANTOS, H. P., FONTANELI, R. S.; TOMM, G. O. Avaliações de alguns atributos físicos de solo em sistemas de produção de grãos, envolvendo pastagens sob plantio direto. **Revista Científica Rural**, v. 9, n.1, p. 23-31, 2004.

STONE, L. F.; SILVEIRA, P. M. da. Efeitos do sistema de preparo na compactação do solo, disponibilidade hídrica e comportamento do feijoeiro. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 34, n. 1, p. 83-91, 1999.

STONE, L. F.; GUIMARÃES, C. M.; MOREIRA, J. A. A. Compactação do solo na cultura do feijoeiro: I. nas propriedades físico-hídricas do solo. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 213-218, 2002.

STRECK, C. A.; REINERT, D. J.; REICHERT, J. M.; KAISER, D. R. Modificações em propriedades físicas com a compactação do solo causada pelo tráfego induzido de um trator em plantio direto. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 34, n. 3, p. 755-760, 2004.

TAYLOR, H. M.; ROBERSON, G. M.; PARKER Jr., J. J. Soil strength-root penetration relations to medium to coarse-textured soil materials. **Soil Science**, v. 102, p. 18-22, 1966.

TOMA, R. S. **Efeito da aplicação de composto orgânico sobre o processo de encrostamento e a recuperação de solos degradados pela erosão hídrica**. 2008. 111 f. Dissertação (Mestrado em Agronomia/Solos e Nutrição de Plantas)-Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2008.

TORMENA, C. A.; SILVA, A. P.; LIBARDI, P. L. Caracterização do intervalo hídrico ótimo de um Latossolo Roxo sob plantio direto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 22, n. 4, p. 573-581, 1998.

TORMENA, C. A.; BARBOSA, M. C.; COSTA, A. C. S.; GONÇALVES, A. 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.

TORRES, E.; SARAIVA, O. F.; MOREIRA, J. A. A.; URCHEI, M. A.; HERNANI, L. C.; GAUDÊNCIO, C. A.; PRIMAVESI, O.; FRANZ, C. A. B. Compactação do solo. In: SALTON, J. C.; HERNANI, L. C.; FONTES, C. Z. (Org). **Sistema Plantio Direto**. Brasília: Embrapa - SPI, 1998. p. 104-118.

TORRES, E.; SARAIVA, O. F. **Camadas de impedimento do solo em sistemas agrícolas com a soja**. Londrina: Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, 1999. 58 p. (Circular técnica, 23)

VASCONCELOS, A. C. M.; PRADO, H.; LANDELL, M. G. A. **Desenvolvimento do sistema radicular da cana-de-açúcar e características físico-hídricas e químicas dos ambientes de produção**. Ribeirão Preto: IAC, 2004. 31 p. (Relatório de pesquisa do Projeto RHIZOCANA).

VERDADE, F. da C. O. Conceito de Solo e Evolução da Pedologia. In: MONIZ, A. C (coord.) **Elementos da Pedologia**. São Paulo: Editora da Universidade de São Paulo, 1972. p. 3-8.

VEIGA, M. da. **Propriedade de um Nitossolo Vermelho após nove anos de uso de sistemas de manejo e efeito sobre culturas**. 2005. 110f. Tese (Doutorado em Ciência do Solo) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2005.

VEZZANI, F. M.; CONCEIÇÃO, P. C.; MELO, N. A. DIECKOW, J. Matéria orgânica e a qualidade do solo. In: SANTOS, G. de A.; SILVA, L. S. da; CANELLAS, L. P.; CAMARGO, F. A. O. (eds.). **Fundamentos da matéria orgânica no solo: ecossistemas tropicais e subtropicais**. 2. ed. Porto Alegre: Metrópole, 2008. p. 483-494.

VIANA, J. H. M.; FERNANDES FILHO, E.I.; SCHAEFER, C. E. G. R. Efeitos de ciclos de umedecimento e secagem na reorganização da estrutura microgranular de Latossolos. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, v. 28, n. 1, p. 11-19, 2004.

VIEIRA, L. S. **Manual de Ciência do solo: com ênfase aos solos tropicais**. 2. ed. São Paulo: Editora Agronômica Ceres Ltda, 1988. 464 p.

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, L. S.; SANTOS, P. C. J. **Amazônia: seus solos e outros recursos naturais**. São Paulo, Ed. Agronômica Ceres, 1987, 416p.

WEIRICH NETO, P. H.; ROSA, A. L. T. da; GOMES, J. A. Suscetibilidade de dois tipos de solo à compactação. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 2, p. 349-353, 2002.