

**AUGUSTO GUILHERME DE ARAÚJO**

**ESTIMATIVA E CLASSIFICAÇÃO DA COMPACTAÇÃO DO SOLO PELO  
TRÁFEGO DE MÁQUINAS AGRÍCOLAS ATRAVÉS DA MODELAGEM  
NEBULOSA**

Tese apresentada à Escola Politécnica  
da Universidade de São Paulo para  
obtenção do Título de Doutor em  
Engenharia Elétrica.

**São Paulo  
2004**

**AUGUSTO GUILHERME DE ARAÚJO**

**ESTIMATIVA E CLASSIFICAÇÃO DA COMPACTAÇÃO DO SOLO PELO  
TRÁFEGO DE MÁQUINAS AGRÍCOLAS ATRAVÉS DA MODELAGEM  
NEBULOSA**

Tese apresentada à Escola Politécnica  
da Universidade de São Paulo para  
obtenção do Título de Doutor em  
Engenharia Elétrica.

Área de concentração:  
Sistemas digitais

Orientador;  
Prof. Dr. Antonio Mauro Saraiva

**São Paulo  
2004**

**Este exemplar foi revisado e alterado em relação à versão original, sob responsabilidade única do autor e com a anuência de seu orientador.**

**São Paulo, 30 de novembro de 2004.**

**Assinatura do autor**

**Assinatura do orientador**

## **FICHA CATALOGRÁFICA**

**Araújo, Augusto Guilherme de**  
**Estimativa e classificação da compactação do solo pelo**  
**tráfego de máquinas agrícolas através da modelagem nebulosa /**  
**A.G. Araújo. -- São Paulo, 2004.**  
**224 p.**

**Tese (Doutorado) - Escola Politécnica da Universidade de**  
**São Paulo. Departamento de Engenharia de Computação e**  
**Sistemas Digitais.**

**1.Mecanização agrícola 2.Fuzzy 3.Modelagem matemática**  
**4.Física do solo I.Universidade de São Paulo. Escola Politécnica.**  
**Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas**  
**Digitais II.t.**

*Dedico à Pul e ao Pedro.*

## AGRADECIMENTOS

O treinamento de pós-graduação junto ao Departamento de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais, mais especificamente com a equipe do Laboratório de Automação Agrícola, representou um importante desafio profissional e pessoal e, nesse período, contei com o apoio e a colaboração de várias pessoas.

Ao lembrá-las, gostaria de reconhecer minha gratidão.

Tive o privilégio de contar com a orientação segura e a amizade do professor Antonio Mauro Saraiva, cujo incentivo e atenção foram fundamentais para superação desse desafio.

Sempre que necessário, tive o apoio dos professores do PCS, Marco Tulio, André Hirakawa e Carlos Cugnasca; dos colegas de LAA, Madeleine, Jacinto e Etienne além de funcionários de vários setores da Escola Politécnica.

A realização do treinamento não teria sido possível sem o apoio do Instituto Agrônomo do Paraná (IAPAR) e da EMBRAPA, instituições que me facultaram o privilégio da dedicação integral ao curso.

O incentivo e a colaboração dos amigos da Área de Engenharia Agrícola do IAPAR durante as fases de experimentação no campo, análises e redação foram essenciais para conclusão do curso. Dentre vários profissionais, gostaria de lembrar, o Adriano, Audilei, Alexandre, Cristian, João Henrique, Milton, Pedro, Rogério, Ronaldo, Ruy Casão e Zé do Brejo.

À professora Maria de Fátima do Departamento de Agronomia da Universidade Estadual de Londrina (UEL) pelas discussões, idéias, colaboração técnica e metodológica, juntamente com seus alunos de graduação e pós, Lisane, Daniela, Bruno e Tiago.

À Cléo, Eunice e Edna, profissionais de suporte administrativo do IAPAR sempre prontas para resolver os problemas da maneira mais simples.

À Fundação Araucária, órgão de apoio à pesquisa do Paraná pelo financiamento do projeto de pesquisa.

E, finalmente, gostaria de lembrar minha família. A meus pais pela atenção e dedicação redobradas durante minha estada em São Paulo e à Silvia e Pedro pelo apoio e dezenas de horas de convívio postergadas.

## RESUMO

A mecanização agrícola é um dos principais componentes tecnológicos responsáveis pelo avanço na produção agrícola brasileira, nos últimos anos, contudo, sua utilização aumenta o risco de impactos ambientais negativos relacionados à degradação dos solos, notadamente à compactação excessiva pelo tráfego de máquinas. A adoção recente de sistemas conservacionistas de manejo do solo, nas culturas anuais, gerou ainda mais preocupação quanto aos efeitos negativos da mecanização. Pesquisas nesse tema visam, em geral, estimar a influência do tráfego sobre as propriedades físicas do solo e identificar classes de compactação restritivas ao desenvolvimento das plantas, com o propósito de fornecer subsídios para evitar a compactação excessiva. O objetivo do trabalho foi propor e avaliar uma metodologia para aplicação da modelagem nebulosa na estimativa e classificação da compactação do solo pelo tráfego, baseada no conhecimento especialista e em dados experimentais. A utilização de modelos simples e confiáveis no planejamento das operações mecanizadas é fundamental para aumentar a sustentabilidade ambiental da atividade. A partir de dados experimentais, foram identificados modelos para estimativa da densidade aparente, porosidade total e resistência à penetração do solo, após o tráfego, e cujas variáveis de entrada são relacionadas às condições iniciais do solo e das máquinas. Tais modelos foram identificados através de um algoritmo neuro-nebuloso e testados com dados independentes. O modelo de classificação relacionou qualitativamente as propriedades físicas do solo com as classes de compactação identificadas pelo método do perfil cultural, sendo as propriedades representadas por conjuntos nebulosos e as relações entre elas e as classes de compactação estabelecidas através de regras lingüísticas. Os dados observados experimentalmente e estimados pelos modelos foram comparados a partir de critérios estatísticos e as estimativas foram analisadas para combinações das variáveis de entrada cujas respostas são conhecidas. O modelo de classificação foi analisado através da porcentagem de acertos segundo as profundidades. O método proposto possibilitou a aquisição de quantidade suficiente de dados para treinamento e teste dos modelos embora ainda sejam necessários novos dados para diferentes faixas de valores e combinações das variáveis de entrada. Os erros percentuais médios obtidos

pelo modelo de estimativa da densidade e da porosidade foram da ordem de 5% e 3%, respectivamente, e a diferença média entre os pares de dados observados e estimados não foi significativamente diferente de zero. Os erros dos modelos de estimativa da resistência à penetração atingiram 18%. O modelo de classificação apresentou desempenho satisfatório, com níveis elevados de acertos, embora ainda sejam necessários ajustes para a camada de 0,10 a 0,20 m. Os resultados demonstram que a metodologia é viável para identificação de modelos de compactação do solo baseada em dados e no conhecimento especialista e que a modelagem nebulosa é uma ferramenta com potencial para aplicação a problemas relacionados ao manejo do solo e, particularmente, para simular o processo de compactação do solo pelo tráfego.

## ABSTRACT

Agricultural mechanization is an important technological issue responsible for Brazilian agricultural advance but its large use increases the risk of environmental impacts due to soil degradation resulting from machine traffic. Conservation agriculture adopted in crop production systems has renewed concerns about soil compaction due to machine traffic. Research on this subject approaches the problem in two ways: estimation or prediction of traffic influence on soil physical properties and classification of soil compaction regarding its effects on plant development. The general target is to develop tools in order to avoid excessive soil compaction. This work presents a method to apply fuzzy modeling techniques to estimate and classify soil compaction due to machine traffic based on expert knowledge and experimental data. Simple and accurate models are useful tools for mechanization planning and for increasing agricultural sustainability. Fuzzy models to estimate soil bulk density, total porosity and penetration resistance after traffic were identified based on data and using initial soil conditions and machine variables as inputs. Fuzzy classification model was derived from expert knowledge and represented the qualitative relations between compaction classes and soil physical properties, the former identified by cultural profile method. Soil properties were represented by fuzzy sets and qualitative relations by linguistic fuzzy rules. Observed and estimated data were compared using statistical criteria and expected responses for known input combinations were analyzed. The rate of classification success for each depth was used to evaluate the performance of the classification model. The proposed method was able to provide sufficient amount of data for model training and testing, however more data are required for different input levels and combinations in order to improve models' performances. The average percentual errors of the estimation models for soil density and porosity were 5% and 3% respectively, and the average difference between observed and estimated data pairs was not statistically different from zero. For the penetration resistance model, the error was about 18%. The classification model showed good performance with high success rates but with medium accuracy in the 0,10-0,20 m depth. The results show that fuzzy modeling is a valuable tool to approach soil management problems and, in particular, to simulate soil compaction process due to traffic.



## SUMÁRIO

**LISTA DE FIGURAS**

**LISTA DE TABELAS**

**LISTA DE ABREVIATURAS**

**LISTA DE SÍMBOLOS**

<b><u>1. INTRODUÇÃO</u></b> .....	<b>1</b>
<u>1.1. JUSTIFICATIVA</u> .....	2
<u>1.2. OBJETIVOS</u> .....	6
<u>1.3. ESCOPO E MOTIVAÇÃO</u> .....	7
<u>1.4. ESTRUTURA DO TRABALHO</u> .....	8
<b><u>2. CARACTERIZAÇÃO DA COMPACTAÇÃO DO SOLO PELO TRÁFEGO DE MÁQUINAS</u></b> .....	<b>9</b>
<u>2.1. INTRODUÇÃO</u> .....	9
<u>2.2. PROCESSO E FATORES DETERMINANTES DA COMPACTAÇÃO DO SOLO</u> .....	13
<u>2.3. EFEITOS DA COMPACTAÇÃO NO SOLO E NAS PLANTAS</u> .....	19
<u>2.4. MÉTODOS PARA AVALIAÇÃO DA COMPACTAÇÃO DO SOLO</u> .....	24
<u>2.5. MODELAGEM DA COMPACTAÇÃO DO SOLO</u> .....	34
<u>2.6. INCERTEZAS ASSOCIADAS À COMPACTAÇÃO DO SOLO</u> .....	37
<u>2.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS</u> .....	40
<b><u>3. FUNDAMENTOS E APLICAÇÕES DA MODELAGEM NEBULOSA</u></b> .....	<b>42</b>
<u>3.1. INTRODUÇÃO</u> .....	42
<u>3.2. CONCEITUAÇÃO</u> .....	46
<u>3.3. CONFIGURAÇÃO DE MODELOS NEBULOSOS</u> .....	50
<u>3.3.1. Funções de pertinência dos conjuntos nebulosos</u> .....	51
<u>3.3.2. Regras nebulosas</u> .....	51
<u>3.3.3. Fuzificação</u> .....	53
<u>3.3.4. Inferência nebulosa</u> .....	53
<u>3.3.5. Defuzificação</u> .....	54
<u>3.4. CLASSIFICAÇÃO DE MODELOS NEBULOSOS</u> .....	55
<u>3.4.1. Modelos nebulosos lingüísticos</u> .....	55
<u>3.4.2. Modelos nebulosos paramétricos</u> .....	57
<u>3.5. CONSTRUÇÃO DE MODELOS NEBULOSOS</u> .....	59
<u>3.5.1. Construção de modelos nebulosos a partir do conhecimento especialista</u> .....	62
<u>3.5.2. Construção de modelos nebulosos a partir de dados</u> .....	63
<u>3.6. APLICAÇÕES DA MODELAGEM NEBULOSA</u> .....	67
<u>3.7. CONSIDERAÇÕES FINAIS</u> .....	72
<b><u>4. METODOLOGIA PARA ESTIMATIVA E CLASSIFICAÇÃO DA COMPACTAÇÃO DO SOLO ATRAVÉS DA MODELAGEM NEBULOSA</u></b> ..	<b>73</b>
<u>4.1. INTRODUÇÃO</u> .....	73
<u>4.2. FASE EXPERIMENTAL</u> .....	75
<u>4.2.1. Seleção das variáveis e procedimentos de medição</u> .....	75
<u>4.2.2. Tratamentos experimentais</u> .....	80

4.2.3. Aquisição e pré-processamento dos dados.....	85
4.3. <u>MODELO NEURO-NEBULOSO PARA ESTIMATIVA DA COMPACTAÇÃO DO SOLO</u> ..	87
4.3.1. Identificação da estrutura inicial do modelo .....	93
4.3.2. Seleção das variáveis de entrada do modelo de estimativa .....	95
4.3.3. Treinamento e teste dos modelos neuro-nebulosos de estimativa .....	98
4.3.4. Avaliação dos resultados dos modelos de estimativa .....	99
4.4. <u>MODELO NEBULOSO PARA CLASSIFICAÇÃO DA COMPACTAÇÃO DO SOLO</u> .....	101
4.5. <u>CONSIDERAÇÕES FINAIS</u> .....	103
<b><u>5. RESULTADOS E DISCUSSÃO</u></b> .....	<b>105</b>
5.1. <u>RESULTADOS EXPERIMENTAIS</u> .....	105
5.2. <u>MODELO DE ESTIMATIVA DA COMPACTAÇÃO DO SOLO</u> .....	124
5.2.1. Modelo para estimativa da densidade do solo após uma passada .....	124
5.2.2. Modelo para estimativa da densidade do solo após três passadas .....	135
5.2.3. Modelo para estimativa da porosidade total do solo após uma passada .....	142
5.2.4. Modelo para estimativa da porosidade total do solo após três passadas .....	149
5.2.5. Modelo para estimativa da resistência à penetração após uma passada .....	155
5.2.6. Modelo para estimativa da resistência à penetração após três passadas .....	161
5.3. <u>DISCUSSÃO DOS RESULTADOS DOS MODELOS DE ESTIMATIVA</u> .....	168
5.3.1. Desempenho dos modelos de estimativa da densidade do solo .....	168
5.3.2. Desempenho dos modelos de estimativa da porosidade total .....	174
5.3.3. Desempenho dos modelos de estimativa da resistência à penetração .....	178
5.4. <u>MODELO PARA CLASSIFICAÇÃO DA COMPACTAÇÃO DO SOLO</u> .....	183
5.5. <u>CONSIDERAÇÕES FINAIS</u> .....	190
<b><u>6. CONSIDERAÇÕES FINAIS</u></b> .....	<b>192</b>
6.1. <u>INTRODUÇÃO</u> .....	192
6.2. <u>SÍNTESE DOS RESULTADOS EXPERIMENTAIS</u> .....	193
6.3. <u>SÍNTESE DOS RESULTADOS DOS MODELOS DE ESTIMATIVA DA COMPACTAÇÃO DO SOLO</u> .....	195
6.4. <u>SÍNTESE DOS RESULTADOS DO MODELO DE CLASSIFICAÇÃO DA COMPACTAÇÃO DO SOLO</u> .....	199
6.5. <u>CONCLUSÕES GERAIS</u> .....	200
6.6. <u>CONTRIBUIÇÕES</u> .....	202
6.7 <u>PERSPECTIVAS</u> .....	203
<b><u>ANEXO 1 - IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS DO CONSEQÜENTE DO MODELO NEURO-NEBULOSO PELO MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS</u></b> .....	<b>205</b>
<b><u>ANEXO 2 - IDENTIFICAÇÃO DOS PARÂMETROS DO ANTECEDENTE DO MODELO NEURO-NEBULOSO PELO MÉTODO DO GRADIENTE DESCENDENTE (“BACKPROPAGATION”)</u></b> .....	<b>208</b>
<b><u>ANEXO 3- PERFIS CULTURAIS DAS PARCELAS EXPERIMENTAIS</u></b> .....	<b>210</b>
<b><u>LISTA DE REFERÊNCIAS</u></b> .....	<b>214</b>

## Gracias por visitar este Libro Electrónico

Puedes leer la versión completa de este libro electrónico en diferentes formatos:

- HTML(Gratis / Disponible a todos los usuarios)
- PDF / TXT(Disponible a miembros V.I.P. Los miembros con una membresía básica pueden acceder hasta 5 libros electrónicos en formato PDF/TXT durante el mes.)
- Epub y Mobipocket (Exclusivos para miembros V.I.P.)

Para descargar este libro completo, tan solo seleccione el formato deseado, abajo:

