

**MADELEINE LITA BARRIGA PUENTE DE LA VEGA**

**FITOMONITORAÇÃO E MODELAGEM DE FOTOSSÍNTESE EM  
JATOBÁ (*Hymenaea courbaril* L.) COM REDES NEURAIS  
ARTIFICIAIS**

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

São Paulo  
2003

**MADELEINE LITA BARRIGA PUENTE DE LA VEGA**

**FITOMONITORAÇÃO E MODELAGEM DE FOTOSSÍNTESE EM  
JATOBÁ (*Hymenaea courbaril* L.) COM REDES NEURAIAS  
ARTIFICIAIS**

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  
2003

## FICHA CATALOGRÁFICA

**Puente de la Vega, Madeleine Lita Barriga**  
**Fitomonitoração e modelagem de fotossíntese em jatobá**  
**(*Hymenaea courbaril* L.) com redes neurais artificiais /**  
**Madeleine Lita Barriga Puente de la Vega. -- São Paulo, 2003.**  
**188 p.**

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

**1. Fitomonitoração 2. Modelagem 3. Redes neurais 4. Jatobá**  
**5. Fotossíntese 6. Seqüestro de carbono 7. Efeito estufa I.**  
**Universidade de São Paulo. Escola Politécnica. Departamento**  
**de Engenharia de Computação e Sistemas Digitais II. t.**

*Con todo mi afecto a la memoria de mi mamá Rosa,  
a mi papá Victor, a mis hermanos Yulian y Roxana, y  
a mi sobrina, "la pequeña" Carmen Rosa.*

## AGRADECIMENTOS

A Deus pela presença na minha vida, por todas suas bençãos.

Ao meu orientador Prof. Dr. Antonio Mauro Saraiva, pelas diretrizes, apoio e incentivo constante na realização deste trabalho. Por sua amizade, confiança, carinho, conselhos e paciência.

Ao Prof. Dr. Marcos Silveira Buckeridge, do Instituto de Botânica, pela co-orientação na parte da fisiologia vegetal, pelo apoio, colaboração e atenção. O Dr. Marcos colocou a disposição desta pesquisa todos os instrumentos de fitomonitoração, e as instalações do local da experimentação.

Ao Prof. Dr. Hernán Prieto Schmidt, do Departamento de Energia e Automação Elétrica (PEA), pela “co-orientação” na parte de redes neurais artificiais, pelo apoio e a sua gentileza. O Prof. Hernán disponibilizou para este trabalho o programa MLP1.

Ao Prof. Dr. Carlos Alberto Labate, da Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz” (ESALQ). O Prof. Carlos sugeriu a idéia de quantificar CO<sub>2</sub> nas plantas. Com ele começou a proposta de fitomonitoração e modelagem de fotossíntese na escala de um estande de eucaliptos, mas por ser um projeto a longo prazo não se concretizou essa pesquisa.

Ao Dr. Henrique Pessoa dos Santos, ex-pesquisador do Instituto de Botânica e atual pesquisador da Embrapa Uva e Vinho, por todo o apoio na parte experimental deste trabalho, que ele ajudou a definir. Sou grata ao Henrique por todas as atenções, por explicar-me as dúvidas na parte de fisiologia e pela sua amizade.

À técnica Ana Maria Baroni. Ela me ensinou a realizar medidas com os instrumentos, sempre esteve atenta a qualquer dificuldade que estes apresentavam, e

substituía-me em eventuais ausências. Agradeço à Ana Maria por toda a colaboração e a sua amizade.

Ao Sergio Miranda pela gentileza de fazer as correções do texto da minha tese e pelas sugestões.

À minha amiga Lourdes, doutoranda do Instituto de Botânica por suas explicações sobre o processo de fotossíntese, e pelo seu carinho.

Ao meu ex-orientador Prof. Dr Javier Ramírez-Fernández por permitir-me mudar de área de pesquisa e pela sua amizade. À sua esposa Nadejda por seus conselhos e carinho.

À minha amiga Nathalia por estar sempre comigo nas situações boas e nas dificuldades; com ela aprendi muitas coisas. Aos seus pais, Estanislau e Glória, e ao seu irmão Guilherme pelo carinho e amizade.

Aos meus amigos Gabriela, German, Hilda, Leoncio, Marco, Nair, Vaidya e Yolanda, por todo seu apoio e colaboração.

Aos colegas e amigos do LAA Alerso, Antonio, Augusto, Cristian, Daniel, Etienne, Fábio, Isis, Leonardo, Jacinto, Marcio, Miguel, Rafael e Renato

Aos amigos do Instituto de Botânica, Seção de Fisiologia e Bioquímica de Plantas.

Para finalizar agradeço à FAPESP por financiar este trabalho através do projeto Auxílio à Pesquisa “Fitomonitoração e modelagem de fotossíntese em *Hymenaea courbaril* L. (jatobá)”. À CAPES por conceder-me a bolsa de doutorado.

# SUMÁRIO

## LISTA DE FIGURAS

## LISTA DE TABELAS

## LISTA DE ABREVIATURAS

## RESUMO

## ABSTRACT

<b>1</b>	<b>INTRODUÇÃO .....</b>	<b>1</b>
1.1	MOTIVAÇÃO .....	1
1.2	OBJETIVOS .....	6
1.3	ORGANIZAÇÃO DA TESE.....	7
<b>2</b>	<b>SEQÜESTRO DE CARBONO E MODELOS DE FLUXO E TROCA DE CO<sub>2</sub>.....</b>	<b>8</b>
2.1	SEQÜESTRO DE CARBONO .....	8
2.1.1	Sistema climático.....	8
2.1.2	Efeito estufa.....	9
2.1.3	Resposta dos ecossistemas às mudanças da concentração de CO <sub>2</sub> da atmosfera.....	10
2.1.4	Protocolo de Kyoto .....	12
2.1.5	Créditos de carbono .....	13
2.2	ESTADO DA ARTE DE MODELOS DE FLUXO E TROCA DE CO <sub>2</sub> .....	15
<b>3</b>	<b>FUNDAMENTO TEÓRICO.....</b>	<b>24</b>
3.1	CONCEITOS BÁSICOS DE ECOFISIOLOGIA VEGETAL.....	24
3.1.1	Troca de gás nas plantas.....	24
3.1.2	Estômato.....	25
3.1.2.1	<i>Fatores que afetam a abertura e o fechamento dos estômatos.....</i>	<i>26</i>
3.1.3	Transpiração .....	27
3.1.3.1	<i>Controle da transpiração.....</i>	<i>28</i>
3.1.3.2	<i>Fatores que afetam a taxa de transpiração .....</i>	<i>29</i>
3.1.4	Fotossíntese .....	29
3.1.4.1	<i>A luz como fonte primária de energia .....</i>	<i>30</i>
3.1.4.2	<i>Pigmentos fotossintéticos.....</i>	<i>31</i>
3.1.4.3	<i>Cloroplastos .....</i>	<i>32</i>
3.1.4.4	<i>Fatores que afetam a fotossíntese .....</i>	<i>33</i>
3.2	CONCEITOS BÁSICOS SOBRE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS (ANNs).....	36
3.2.1	Neurônio biológico .....	36
3.2.2	Neurônio artificial.....	37
3.2.3	Redes neurais artificiais .....	39
3.2.3.1	<i>Arquiteturas típicas de ANNs.....</i>	<i>40</i>
3.2.3.2	<i>Tipos de aprendizado (treinamento).....</i>	<i>41</i>
3.2.3.3	<i>Função de ativação (função de transferência) .....</i>	<i>42</i>
3.2.4	Redes MLP (Multilayer Perceptron).....	43

3.2.5	Aplicação das redes neurais artificiais .....	49
<b>4</b>	<b>MÉTODO PARA FITOMONITORAÇÃO E MODELAGEM DE FOTOSSÍNTESE BASEADO EM ANNs .....</b>	<b>50</b>
4.1	FITOMONITORAÇÃO.....	51
4.1.1	Variáveis fisiológicas e ambientais medidas.....	51
4.1.2	Local da experimentação.....	53
4.1.3	Sistema de fitomonitoração .....	55
4.1.4	Procedimento para a coleta de dados .....	57
4.1.5	Processamento dos dados coletados .....	61
4.1.6	Considerações finais .....	66
4.2	MODELAGEM DE FOTOSSÍNTESE COM REDES NEURAS ARTIFICIAIS .....	67
4.2.1	Preparo dos conjuntos de dados para o treinamento e o teste .....	68
4.2.2	Definição da arquitetura da rede e parâmetros de treinamento .....	70
4.2.3	Treinamento das ANNs.....	72
4.2.4	Teste (validação) das ANNs.....	74
<b>5</b>	<b>RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>75</b>
5.1	RESULTADOS E DISCUSSÃO DA FITOMONITORAÇÃO (COLETA DE DADOS) .....	75
5.1.1	Resultados e análise das variáveis fisiológicas .....	76
5.1.2	Resultados e análise das variáveis ambientais.....	84
5.1.3	Considerações finais .....	97
5.2	RESULTADOS E DISCUSSÃO DA MODELAGEM COM REDES NEURAS ARTIFICIAIS .....	99
5.2.1	Primeira fase: modelagem do ciclo diário de fotossíntese por estação	100
5.2.1.1	<i>Considerações iniciais</i> .....	100
5.2.1.2	<i>Resultados</i> .....	107
5.2.1.3	<i>Análise dos resultados</i> .....	117
5.2.1.4	<i>Considerações finais</i> .....	147
5.2.2	Segunda fase: modelagem do ciclo diário de fotossíntese por ano ....	150
5.2.2.1	<i>Considerações iniciais</i> .....	150
5.2.2.2	<i>Resultados</i> .....	152
5.2.2.3	<i>Análise dos resultados</i> .....	157
5.2.2.4	<i>Considerações finais</i> .....	171
<b>6</b>	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS.....</b>	<b>173</b>
6.1	CONCLUSÕES .....	173
6.1.1	Fitomonitoração.....	173
6.1.2	Modelagem de fotossíntese com redes neurais artificiais .....	175
6.2	CONTRIBUIÇÕES.....	179
6.3	PERSPECTIVAS .....	181
	<b>BIBLIOGRAFIA .....</b>	<b>183</b>
	<b>APÊNDICE A Resultados dos treinamentos da primeira fase da modelagem .....</b>	<b>i</b>
	<b>APÊNDICE B Resultados dos treinamentos da segunda fase da modelagem .....</b>	<b>xxvii</b>



## LISTA DE FIGURAS

Figura 3.1 Troca de gás na folha.	25
Figura 3.2 Representação esquemática do estômato, (a) estômato aberto (b) estômato fechado.	26
Figura 3.3 Fases da fotossíntese (LOUREIRO, et al., 2003).	30
Figura 3.4 Características das várias regiões de comprimento de onda da luz (LOUREIRO, et al., 2003).	31
Figura 3.5 Estrutura do cloroplasto (LOUREIRO, et al., 2003).	33
Figura 3.6 Resposta da fotossíntese a diferentes intensidades luminosas	34
Figura 3.7 Esquemas simplificado de um neurônio biológico.	37
Figura 3.8 Esquema de um neurônio artificial com função de ativação.	38
Figura 3.9 Ilustração de redes feedforward.	41
Figura 3.10 Funções de ativação (a) Função logistic (b) Função tangente hiperbólica.	43
Figura 3.11 Rede neural MLP com algoritmo de treinamento backpropagation.	44
Figura 4.1 Jatobá, <i>Hymenaea courbaril</i> , (LORENZI, 1992).	52
Figura 4.2 Plântulas de jatobá e sistema de medida portátil.	53
Figura 4.3 Casa de vegetação onde foram colocadas as plântulas de jatobá.	54
Figura 4.4 Estande, onde colocaram-se as plântulas, coberto com tela sombrite para reduzir a radiação.	54
Figura 4.5 Diagrama em blocos do sistema de fitomonitoração.	55
Figura 4.6 Instrumentos de medida utilizados para o sistema de monitoração, figuras adaptadas (LI-COR, 1999; LI-COR, 1998; OPTI-SCIENCES, 1998).	56
Figura 4.7 Estratificação do jatobá para a monitoração.	57
Figura 4.8 Vista de como se realizavam as medidas.	59
Figura 4.9 Vista em detalhe de como se realizavam as medidas.	60
Figura 4.10 Fluorômetro e os acessórios para realizar medidas de fluorescência (OPTI-SCIENCES, 1998).	61
Figura 4.11 Estrutura de rede MLP utilizada para modelar fotossíntese.	71
Figura 5.1 Medidas de fotossíntese líquida das quatro estações.	77
Figura 5.2 Medidas da condutância estomática das quatro estações.	79
Figura 5.3 Medidas da taxa de transpiração das quatro estações.	80
Figura 5.4 Medidas de fluorescência de três estações.	82
Figura 5.5 Medidas da temperatura da folha das quatro estações.	83
Figura 5.6 Medidas da temperatura do ar das quatro estações.	85
Figura 5.7 Medidas da concentração de CO <sub>2</sub> do ar das quatro estações.	86
Figura 5.8 Medidas da umidade relativa do ar das quatro estações.	88
Figura 5.9 Medidas da radiação fotossintética ativa, dentro da câmara, (PAR <sub>i</sub> ) das quatro estações.	89
Figura 5.10 Medidas da concentração de CO <sub>2</sub> na câmara da folha das quatro estações.	92
Figura 5.11 Medidas da umidade relativa na câmara da folha das quatro estações.	94
Figura 5.12 Medidas da radiação fotossintética ativa, fora da câmara, (PAR <sub>o</sub> ) das quatro estações.	96

Figura 5.13	Fotossíntese (a) valores calculados pela ANN e valores medidos (b) Oscilações das medidas de fotossíntese na faixa de -0,099 a 0,099.	104
Figura 5.14	Resultados da modelagem do ciclo diário de fotossíntese para a combinação 1 (6 variáveis de entrada).	112
Figura 5.15	Resultados da modelagem do ciclo diário de fotossíntese para a combinação 6 (7 variáveis de entrada).	113
Figura 5.16	Resultados da modelagem do ciclo diário de fotossíntese para a combinação 11 (8 variáveis de entrada).	114
Figura 5.17	Resultados dos treinamentos, das 18 combinações de variáveis de entrada, do primeiro conjunto de treinamento.	119
Figura 5.18	Resultados dos treinamentos, das 18 combinações de variáveis de entrada, segundo conjunto de treinamento.	120
Figura 5.19	Resultados do primeiro e segundo conjunto de treinamento, para as estações do outono e do inverno.	126
Figura 5.20	Resultados do primeiro e segundo conjunto de treinamento, para as estações da primavera e do verão.	127
Figura 5.21	Resultados dos treinamentos, das 4 estações, do primeiro conjunto.	130
Figura 5.22	Resultados dos treinamentos, das 4 estações, do segundo conjunto.	131
Figura 5.23	Resultados do treino e do teste das ANNs, das estações do outono e do inverno, primeiro conjunto de treinamento (com todos os dados).	135
Figura 5.24	Resultados do treino e do teste das ANNs, das estações da primavera e do verão, primeiro conjunto de treinamento (com todos os dados).	136
Figura 5.25	Diferença do erro relativo médio, entre o teste e o treino das ANNs, dos 3 níveis, para as 4 estações, primeiro conjunto de treinamento.	138
Figura 5.26	Erro relativo médio, do treino e do teste das ANNs, das estações do outono e do inverno, segundo conjunto de treinamento (com dados filtrados).	139
Figura 5.27	Erro relativo médio, do treino e do teste das ANNs, das estações da primavera e do verão, segundo conjunto de treinamento (com dados filtrados).	140
Figura 5.28	Diferença do erro relativo médio, entre o teste e o treino das ANNs, dos 3 níveis, para as 4 estações, segundo conjunto de treinamento.	141
Figura 5.29	Convergência do treinamento das ANNs, primeiro conjunto.	144
Figura 5.30	Convergência do treinamento das ANNs, segundo conjunto.	145
Figura 5.31	Resultados da modelagem do ciclo diário de fotossíntese para a combinação 1.	154
Figura 5.32	Resultados da modelagem do ciclo diário de fotossíntese para a combinação 5.	155
Figura 5.33	Resultados da modelagem do ciclo diário de fotossíntese para a combinação 7.	156
Figura 5.34	Resultados dos treinamentos, das 10 combinações de variáveis de entrada.	158
Figura 5.35	Resultados do primeiro e segundo conjunto de treinamento.	161
Figura 5.36	Resultados do treino e do teste das ANNs	164
Figura 5.37	Diferença do erro relativo médio, entre o teste e o treino das ANNs, dos três níveis.	165
Figura 5.38	Convergência do treinamento das ANNs, primeiro conjunto.	168
Figura 5.39	Convergência do treinamento das ANNs, segundo conjunto.	169

## 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:

