

# RESSALVA

Atendendo solicitação do autor ,  
o texto completo desta tese será  
disponibilizado somente a partir de  
01/06/2019.

**MARIA DOLORES DOS SANTOS BARZOTTO RIBEIRO**

**DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA DE PLANTIOS FLORESTAIS DE  
*Eucalyptus* spp.: ASSOCIAÇÕES COM VARIÁVEIS DO SÍTIO E DO PLANTIO  
E ESTIMATIVAS COM REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS**

**Botucatu**

**2018**

**MARIA DOLORES DOS SANTOS BARZOTTO RIBEIRO**

**DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA DE PLANTIOS FLORESTAIS DE  
*Eucalyptus* spp.: ASSOCIAÇÕES COM VARIÁVEIS DO SÍTIO E DO PLANTIO  
E ESTIMATIVAS COM REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS**

Tese apresentada à Faculdade de Ciências Agronômicas da Unesp Câmpus de Botucatu, para obtenção do título de Doutor em Agronomia - Energia na Agricultura.

Orientador: Prof. Dr. Adriano W. Ballarin

Coorientador: Prof. Dr. Hélio Garcia Leite

**Botucatu**

**2018**

## FICHA CATALOGRÁFICA

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

R484d Ribeiro, Maria Dolores dos Santos Barzotto, 1986-  
Densidade básica da madeira de plantios florestais de Eucalyptus spp.: associações com variáveis do sítio e do plântio e estimativas com redes neurais artificiais / Maria Dolores dos Santos Barzotto Ribeiro. - Botucatu: [s.n.], 2018  
110 f.: grafs. color., ils. color., tabs.

Tese (Doutorado) - Universidade Estadual Paulista Faculdade de Ciências Agrônômicas, Botucatu, 2018  
Orientador: Adriano W. Ballarin  
Coorientador: Hélio Garcia Leite  
Inclui bibliografia

1. Eucalipto. 2. Madeira - Densidade. 3. Redes neurais (Computação). 4. Mudanças climáticas. I. Ballarin, Adriano W. II. Leite, Hélio Garcia. III. Universidade Estadual Paulista "Júlio de Mesquita Filho" (Câmpus de Botucatu). Faculdade de Ciências Agrônômicas. IV. Título.

Elaborada por Ana Lucia G. Kempinas - CRB-8:7310

"Permitida a cópia total ou parcial deste documento, desde que citada a fonte"

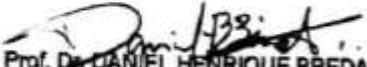
CERTIFICADO DE APROVAÇÃO

TÍTULO: "DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA DE PLANTIOS FLORESTAIS DE *Eucalyptus* spp: ASSOCIAÇÕES COM VARIÁVEIS DO SÍTIO E DO PLANTIO E ESTIMATIVAS COM REDES NEURAIS ARTIFICIAIS."

AUTORA: MARIA DOLORES DOS SANTOS BARZOTTO RIBEIRO  
ORIENTADOR: ADRIANO WAGNER BALLARIN  
COORIENTADOR: HÉLIO GARCIA LEITE

Aprovada como parte das exigências para obtenção do Título de Doutora em AGRONOMIA (ENERGIA NA AGRICULTURA), pela Comissão Examinadora:

  
Prof. Dr. ADRIANO WAGNER BALLARIN  
Depto de Engenharia Rural / Faculdade de Ciências Agrômicas de Botucatu

  
Prof. Dr. DANIEL HENRIQUE BREDÁ BRINOTI  
Depto de Engenharia Florestal / Universidade Federal de Viçosa

  
Prof. Dr. OSVALDO CESAR PINHEIRO DE ALMEIDA  
/ Faculdade de Tecnologia de Botucatu

  
Prof. Dr. SAULO PHILIPÉ SEBASTIÃO GUERRA  
Dep de Economia, Sociologia e Tecnologia / Faculdade de Ciências Agrômicas de Botucatu

  
Prof. Dr. SÉRGIO AUGUSTO RODRIGUES  
Departamento de Bioprocessos e Biotecnologia / Faculdade de Ciências Agrômicas de Botucatu/ FCA/ UNESP

Botucatu, 01 de dezembro de 2017.

À minha família,  
Dedico

## AGRADECIMENTOS

À Mãe Rainha e Vencedora Três Vezes Admirável de Schoenstatt.

Ao meu esposo Adisnei pelo apoio e compreensão em toda nossa caminhada.

A nossa amada Melissa, que acompanhou este trabalho desde o início, ainda dentro da barriga no processamento dos dados e durante a redação final, me enchendo de carinho. Aos meus pais Luiz Alberto e Maria Cristina, pelo apoio incondicional em todas as etapas deste projeto. Aos meus irmãos, Junior e André, pelo exemplo de dedicação em tudo o que fazem.

Ao Prof. Adriano Wagner Ballarin, pela amizade e incentivo em todos os momentos, pelos exemplos de conduta e pela orientação durante o mestrado e agora no doutorado, sendo uma valiosa contribuição acadêmica e profissional.

Ao Prof. Hélio Garcia Leite, pela amizade, apoio e oportunidade de co-orientação que tanto enriqueceu este trabalho.

Ao Prof. Daniel Henrique Breda Binoti, que a qualquer hora e qualquer dia sempre esteve ajudando. Pelos ensinamentos, paciência e amizade.

Aos membros da banca da qualificação, Prof. Cesar e Prof. Saulo, que tanto contribuíram nas discussões e estruturação do trabalho.

À Klabin Florestal Santa Catarina pelo apoio nos momentos de ausência da empresa para resolver questões da tese. Aos amigos que conquistei na Unidade de Otacílio Costa, uma ajuda valiosa no desenvolvimento deste trabalho, em especial Marcos Antonio Guimarães, João Paulo Czarnecki de Liz e Arthur Bratti Schmidt.

À Duratex Florestal por ter fornecido os dados, em especial a José Ricardo Paraíso Ferraz, Valerio Cosme Sales Tiburcio, Anderson Lins, Anderson Luiz Wantroba e Rodrigo Ribeiro de Castro. À Edson Dionízio, Fernando Cagnoni da Silva, Messias Dias dos Santos Filho e Lucas Machado Rodrigues, por todo apoio no desenvolvimento final desse trabalho.

Ao CNPq – Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico, pela bolsa de estudos concedida.

## RESUMO

A densidade básica da madeira é uma das mais importantes propriedades que afetam o processo produtivo na indústria de base florestal. Sendo a madeira o resultado da combinação da quantidade e da distribuição dos diferentes elementos anatômicos e suas inter-relações com os fatores externos que tangem sobre ela, estudar a associação destas variáveis na formação da madeira, isoladamente, permite tomar decisões mais assertivas quanto ao manejo integrado do sítio, proporcionando ganhos em produtividade e qualidade. As taxas de crescimento de um povoamento florestal e a densidade da madeira são influenciadas pelas variáveis de sítio e de plantio de forma distinta, com tendência ora positiva, ora negativa. A inclusão dessas variáveis em um modelo de estimativa de densidade básica, apesar de possibilitar um maior realismo biológico, traz complexidades à modelagem e à quantificação destas influências. Além disso, alguns componentes qualitativos – variáveis categóricas - como a classificação do tipo de solo e material genético geram dificuldades de modelagem ao serem integrados em equações matemáticas. Assim, em muitos casos, devido às complexidades de ajuste, os modelos estatísticos tornam-se limitados na solução problemas estruturados da gestão de recursos florestais. A técnica de Redes Neurais Artificiais é alternativa para modelagem linear e não linear, estimando a densidade básica a partir de bases de dados históricos para um cadastro de informações semelhantes pelo método de generalização. Neste trabalho, a partir dos dados históricos de 25 materiais genéticos de *Eucalyptus* spp. - 14 clonais e 11 seminais - em primeira e segunda rotação, com idades variando de 4 a 11 anos e cultivados em cinco regiões edafoclimáticas distintas, foi estudada a densidade básica da madeira com e sem casca de 1.217 árvores. Primeiramente, foram estabelecidas as correlações canônicas entre as variáveis do sítio, do plantio e a densidade básica da madeira, com e sem casca. Foram avaliadas duas funções, sendo ambas significativas a 1% de probabilidade. Apenas a primeira função canônica apresentou alto coeficiente de determinação canônico (0,762). Esses resultados preliminares mostram que as correlações canônicas são eficientes para explicar as correlações existentes entre as variáveis do sítio e do povoamento com a formação da madeira e sua densidade básica. Posteriormente, a técnica de Redes Neurais Artificiais foi empregada na

estimativa da densidade básica da madeira utilizando variáveis ambientais e do plantio, sendo esta última dividida em dois bancos de dados, consultando a informações do inventário florestal pré-corte e também, avaliando as redes permanentes de parcelas do inventário florestal contínuo. A técnica de Redes Neurais Artificiais proporcionou estimativas satisfatórias da densidade básica da madeira, com raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) de 1,92% para densidade com casca e 2,01% para sem casca para dados do inventário florestal pré-corte e RMSE de 1,97% para densidade com casca e 2,06% para sem casca com dados do inventário florestal contínuo, mostrando-se, assim, ferramenta rápida e eficaz. Além do potencial estatístico, a técnica proporciona redução de custo operacional, por utilizar bases de dados de séries históricas para o ajuste das estimativas, reduzindo a necessidade de novas amostragens.

**Palavras-chave:** Funções canônicas; Variáveis climáticas; Redes Neurais Artificiais; Inventário florestal; *Eucalyptus* spp.

## ABSTRACT

The wood basic specific gravity is one of the most important characteristics affecting the productive process in the forest-based industry. Since wood is the result of the combination of the quantity and distribution of the different anatomical elements and their interrelations with the external factors that affect them, studying the association of these variables in the formation of wood alone allows us to make more assertive decisions regarding the management of the site, providing gains in productivity and quality. The growth rates of a forest stand and the wood specific gravity are influenced by the edaphoclimatic variables in a distinct way, with a positive and sometimes negative trend. The inclusion of these variables in a basic specific gravity estimation model, in spite of allowing a greater biological realism, brings complexity to the modeling and quantification of these influences. In addition, some qualitative components - categorical variables - such as soil type classification and genetic material cannot be integrated into mathematical equations. Thus, in many cases, statistical models cannot be used more broadly to solve structured problems of forest resource management. The Artificial Neural Networks technique is an alternative for linear and nonlinear modeling, estimating the basic specific gravity from historical databases for a whole register of similar information by the generalization method. In this work, from the historical data of 25 genetic material of *Eucalyptus* spp. - 14 clonal and 11 seminal - in first and second rotation, with ages varying from 4 to 11 years and cultivated in five distinct edaphoclimatic regions, the wood basic specific gravity of 1,217 trees was studied. Firstly, the canonical correlations were established between site variables, planting density and wood basic specific gravity (evaluated in disks with and without bark). Two functions were evaluated, both of which were significant at 1% probability. Only the first canonical function had a high coefficient of canonical determination (0.762). These preliminary results show that the canonical correlations are efficient to explain the correlations between site and settlement variables with the formation of wood and its basic specific gravity. Subsequently, the Artificial Neural Networks technique was used to estimate the wood basic specific gravity using environmental and planting variables, the latter being divided into two databases, referring to information from the pre-cut forest inventory and also evaluating the permanent networks of parcels of the continuous

forest inventory. The Artificial Neural Networks technique provided satisfactory estimates of the wood basic specific gravity using data from pre-cut forest inventory, with root mean square error (RMSE) of 1.92% for analysis with full disks (wood+bark) and 2.01% for analysis considering disks without bark; RMSE was 1.97% and 2.06%, respectively, using data from the continuous forest inventory, thus showing a fast and efficient tool. In addition to statistical potential, the technique provides operational cost reduction using historical series databases to adjust estimates, reducing the need for new samplings.

**Keywords:** Canonical functions; Climatic variables; Site; Forest Inventory; *Eucalyptus* spp.

## LISTA DE TABELAS

	Página
<b>CAPÍTULO 1 – CORRELAÇÕES CANÔNICAS ENTRE AS VARIÁVEIS DO SÍTIO E DO PLANTIO E A DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i> spp.</b> .....	35
Tabela 1.1 – Características edafoclimáticas das cinco regiões de estudo.....	40
Tabela 1.2 – Valores médios das variáveis analisadas por região edafoclimática ...	42
Tabela 1.3 – Coeficientes das funções canônicas, correlação canônica entre as variáveis de perfil ( $u_t$ ), densidade ( $v_t$ ), autovalor e resultado do teste estatístico de significância da correlação.....	44
Tabela 1.4 – Cargas canônicas e cargas canônicas cruzadas do primeiro par de variáveis ( $u_1, v_1$ ) .....	45
<b>CAPÍTULO 2 – EMPREGO DE REDES NEURAS ARTIFICIAIS NA ESTIMATIVA DA DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA COM DADOS DO INVENTÁRIO PRÉ-CORTE</b> .....	55
Tabela 2.1 – Características edafoclimáticas das cinco regiões de estudo.....	60
Tabela 2.2 – Valores mínimo, médios, máximos e o desvio padrão das variáveis analisadas.....	62
Tabela 2.3 – Valores médios das variáveis analisadas por região edafoclimática ...	64
Tabela 2.4 – Valores médios da amostragem de densidade básica da madeira com e sem casca por material genético. ....	65
Tabela 2.5 – Características e estatísticas da RNA selecionada para estimar a densidade básica da madeira. ....	67
<b>CAPÍTULO 3 - EFICIÊNCIA DE REDES NEURAS ARTIFICIAIS NA ESTIMATIVA DA DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA COM DADOS DO INVENTÁRIO FLORESTAL CONTÍNUO</b> .....	78
Tabela 3.1 – Características edafoclimáticas dos municípios nas cinco regiões do estudo.....	85
Tabela 3.2 – Dados dos plantios e das densidades básicas com e sem casca.....	86
Tabela 3.3 – Análise descritiva das mensurações de densidade básica com e sem casca .....	89

Tabela 3.4 – Estimativas de densidade básica com e sem casca geradas pela RNA para os materiais genéticos.....	90
Tabela 3.5 – Características e precisão da RNA selecionada para estimar a densidade básica da madeira.....	91

## LISTA DE FIGURAS

	<b>Página</b>
<b>INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	19
Figura 1 – Modelo genérico de arquitetura de RNA, com uma camada de entrada, uma camada oculta e duas camadas de saída .....	32
<b>CAPÍTULO 1 – CORRELAÇÕES CANÔNICAS ENTRE AS VARIÁVEIS DO SÍTIO E DO PLANTIO E A DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA DE EUCALYPTUS</b> .....	35
Figura 1.1 – Mapa das regiões climáticas (Köppen) brasileiras e regiões de coleta dos dados: MG1, SP1, SP2, SP3 e SP4. ....	39
Figura 1.2 – Associação entre densidade básica da madeira sem casca - $D_{bsc}$ , textura do solo e área vital ( $m^2 \cdot \text{árvore}^{-1}$ ) para os dados analisados. ...	43
Figura 1.3 – Associação entre densidade básica da madeira sem casca - $D_{bsc}$ ( $kg \cdot m^{-3}$ ), área vital ( $m^2 \cdot \text{árvore}^{-1}$ ) e área basal ( $m^2 \cdot ha^{-1}$ ) para os dados analisados. ....	43
Figura 1.4 – Gráfico de dispersão dos escores padronizados de cada par de variáveis canônicas. ....	45
<b>CAPÍTULO 2 – EMPREGO DE REDES NEURAS ARTIFICIAIS NA ESTIMATIVA DA DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA COM DADOS DO INVENTÁRIO PRÉ-CORTE</b> .....	55
Figura 2.1 – Municípios de coleta dos dados divididos em cinco zonas edafoclimáticas: MG1, SP1, SP2, SP3 e SP4. ....	59
Figura 2.2 – Índices de precipitação de 2006-2013 para as cinco regiões edafoclimáticas .....	61
Figura 2.3 – Variação da densidade básica sem casca ( $kg \cdot m^{-3}$ ) com a produtividade ( $m^3 \cdot ha^{-1} \cdot ano^{-1}$ ) e a precipitação anual acumulada (mm). ....	66
Figura 2.4 – (A) Relação entre valores observados e estimados para a densidade básica; (B) Dispersão dos resíduos - erros percentuais - nas estimativas em função dos valores observados de densidade básica; (C) Histograma dos erros nas estimativas pelas RNA. ....	68

**CAPÍTULO 3 – EFICIÊNCIA DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS NA ESTIMATIVA DA DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA COM DADOS DO INVENTÁRIO FLORESTAL CONTÍNUO ..... 78**

Figura 3.1 – Regiões de coleta dos dados envolvendo cinco zonas edafoclimáticas: MG1, SP1, SP2, SP3 e SP4. ....82

Figura 3.2 - Índices de precipitação das cinco regiões edafoclimáticas no período de 2006-2013. ....84

Figura 3.3 - Índices de temperatura média das cinco regiões edafoclimáticas no período de 2006-2013. ....84

Figura 3.4 – (A) Relação entre valores observados e estimados para a densidade básica; (B) Dispersão dos resíduos - erros percentuais - nas estimativas em função dos valores observados de densidade básica; (C) Histograma dos erros nas estimativas pelas RNA. ....93

## SUMÁRIO

### Página

<b>INTRODUÇÃO GERAL</b> .....	19
REVISÃO DE LITERATURA .....	21
Produtividade e qualidade silvicultural em plantios de <i>Eucalyptus</i> .....	21
Efeitos do sítio na produtividade e na densidade básica da madeira .....	23
Efeito do manejo florestal na produtividade e na densidade básica da madeira ...	25
Correlações entre variáveis do sítio e do plantio na densidade básica da	27
Monitoramento do estoque de madeira no setor florestal .....	28
Redes Neurais Artificiais - aplicação potencial na estimativa da densidade	30
Arquitetura e aprendizagem das Redes Neurais Artificiais .....	31
Aplicação das Redes Neurais Artificiais na área florestal .....	34
<b>CAPÍTULO 1 – CORRELAÇÕES CANÔNICAS ENTRE AS VARIÁVEIS DO SÍTIO E DO PLANTIO E A DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA DE <i>Eucalyptus</i> spp.</b> .....	35
1.1 INTRODUÇÃO .....	37
1.2 MATERIAL E MÉTODOS .....	38
1.2.1 Material experimental .....	38
1.2.2 Características analisadas do sítio e do plantio .....	39
1.2.3 Correlações canônicas .....	41
1.3 RESULTADOS .....	41
1.3.1 Características analisadas .....	41
1.3.2 Correlações canônicas .....	44
1.4 DISCUSSÃO .....	46
1.4.1 Características analisadas .....	46
1.4.2 Correlações canônicas .....	48
1.5 CONCLUSÃO .....	49
REFERÊNCIAS .....	50
<b>CAPÍTULO 2 – EMPREGO DE REDES NEURAS ARTIFICIAIS NA ESTIMATIVA DA DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA COM DADOS DO INVENTÁRIO PRÉ-CORTE</b> .....	55
2.1 INTRODUÇÃO .....	56
2.2 MATERIAL E MÉTODOS .....	58
2.2.1 Local dos plantios e características edafoclimáticas das regiões .....	58

2.2.2	Dados do povoamento .....	62
2.2.3	Redes Neurais Artificiais – treinamento e generalização .....	62
2.3	RESULTADOS .....	64
2.3.1	Densidade básica da madeira .....	64
2.3.2	Processamento das Redes Neurais Artificiais .....	66
2.4	DISCUSSÃO .....	69
2.4.1	Densidade básica da madeira .....	69
2.4.2	Estimativas da densidade básica da madeira pelas RNA .....	71
2.5	CONCLUSÃO .....	72
	REFERÊNCIAS .....	73
	<b>CAPÍTULO 3 – EFICIÊNCIA DE REDES NEURAS ARTIFICIAIS NA ESTIMATIVA DA DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA COM DADOS DO INVENTÁRIO FLORESTAL CONTÍNUO .....</b>	<b>78</b>
3.1	INTRODUÇÃO .....	79
3.2	MATERIAL E MÉTODOS .....	82
3.2.1	Material experimental .....	82
3.2.2	Redes Neurais Artificiais – treinamento e generalização .....	87
3.3	RESULTADOS .....	89
3.3.1	Variações na densidade básica da madeira amostrada e estimada .....	89
3.3.2	Característica e precisão das Redes Neurais Artificiais .....	91
3.4	DISCUSSÃO .....	94
3.4.1	Densidade básica da madeira .....	94
3.4.2	Estimativa da densidade básica da madeira pelas RNA .....	95
3.5	CONCLUSÃO .....	96
	REFERÊNCIAS .....	96
	<b>CONSIDERAÇÕES FINAIS .....</b>	<b>100</b>
	REFERÊNCIAS .....	102

# CAPÍTULO 1

## CORRELAÇÕES CANÔNICAS ENTRE AS VARIÁVEIS DO SÍTIO E DO PLANTIO E A DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA DE *Eucalyptus* spp.

Maria Dolores dos Santos Barzotto Ribeiro <sup>a</sup>; Sergio Augusto Rodrigues <sup>b</sup>;  
Adriano Wagner Ballarin <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Engenharia Rural, Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual de São Paulo, Botucatu.

<sup>b</sup> Departamento de Bioprocessos e Biotecnologia, Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual de São Paulo, Botucatu.

### RESUMO

A análise de correlação canônica é um procedimento estatístico multivariado que mede a existência e a intensidade da associação entre dois grupos de variáveis. Neste capítulo, objetivou-se realizar a análise de correlação canônica para verificar as associações existentes entre o grupo formado pelas densidades básicas da madeira (determinadas com e sem casca) com o grupo formado pelos fatores edafoclimáticos que caracterizam os respectivos sítios: precipitação, temperatura e textura do solo e variáveis do povoamento: idade, material genético, rotação, diâmetro, altura, produtividade, área basal, área vital e as relações entre diâmetro-altura e área basal-número de fustes por hectare. Os dados do estudo são provenientes de uma empresa florestal com plantios de *Eucalyptus* spp. nos estados de São Paulo e Minas Gerais. Foram analisadas as densidades básicas com e sem casca de 1.217 árvores - 21 materiais genéticos - em primeira e segunda rotação, com idade variando de 4 a 11 anos em cinco regiões edafoclimáticas distintas. As variáveis de sítio foram provenientes de medições obtidas por meio do inventário florestal. Para análise entre os grupos, foram avaliadas duas funções, sendo ambas significativas a 1% de probabilidade. Apenas a primeira função canônica apresentou alto R<sup>2</sup> canônico (0,762). Altas cargas canônicas e cargas canônicas cruzadas positivas (associadas com maiores densidades básicas) foram obtidas para material genético, área vital, temperatura, e textura do solo. Tendência contrária (associada a menores densidades) foi observada para as variáveis: produtividade, área basal, rotação e precipitação. Os resultados mostraram a eficiência das correlações

canônicas na quantificação da associação entre esses grupos de variáveis, mas sobretudo na diferenciação dos efeitos das variáveis originais (sítio e manejo do plantio) na densidade básica da madeira.

**Palavras-chave:** análise multivariada; análise de correlações canônicas, variáveis climáticas; *Eucalyptus* spp.

## **CANONICAL CORRELATIONS BETWEEN SITE AND PLANT VARIABLES AND THE WOOD BASIC SPECIFIC GRAVITY OF *Eucalyptus* spp.**

### **ABSTRACT**

The canonical correlation analysis is a multivariate statistical procedure that measures the existence and intensity of the association between two groups of variables. In this chapter, we performed the canonical correlation analysis to verify the associations between the group formed by the wood basic specific gravity and the group formed by the edaphoclimatic factors that characterize the respective sites: precipitation, temperature and soil texture and population variables: age, genetic material, rotation, diameter, height, productivity, basal area, vital area and the relationships between diameter-height and basal area - number of stems per hectare. The data from the study come from a forest company with plantations of *Eucalyptus* spp. in the states of São Paulo and Minas Gerais. The basic specific gravities (evaluated in disks with and without bark) of 1,217 trees - 21 genetic materials - were analyzed in first and second rotation, with ages varying from 4 to 11 years in five distinct edaphoclimatic regions. The site variables were derived from measurements obtained through the forest inventory. For analysis between groups, two functions were tested, both of which were significant at 1% probability. Only the first canonical function showed a high canonical  $R^2$  (0.762). High canonical loads and positive canonical cross loads (associated with higher basic densities) were obtained for genetic material, vital area, temperature, and soil texture. Contrary tendency (associated with lower densities) was observed for the variables: productivity, basal area, rotation and precipitation. The results showed the efficiency of the canonical correlations in the quantification of the association between these groups of

encontrados por Berger (2000) avaliando o efeito do espaçamento e da fertilização na densidade básica de *Eucalyptus saligna* e por Ribeiro et al. (2017) estudando a densidade básica em clones de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, em que maiores espaçamentos de plantio proporcionam a formação de madeira de densidade básica mais elevada. Contrariamente, as que se associaram a menores densidades básicas foram, em ordem decrescente de importância, produtividade, área basal, rotação e precipitação anual acumulada (precip-media). Ressalta-se que, novamente aqui, mesmo com cômputo de plantios clonais híbridos, a produtividade compromete a densidade básica. Estes resultados estão de acordo com a literatura, onde os índices de precipitação e produtividade mais elevados são características dos sítios com características edafoclimáticas favoráveis, proporcionam a formação de madeira com densidade básica mais baixa (SEGHATOLESLAMI et al., 2008; SETTE Jr. et al., 2010).

O índice de redundância (Tabela 1.4) indicou que 73,1% da variabilidade das densidades básicas com e sem casca é explicada pela função canônica  $u_1$ . Quanto ao índice de variância compartilhada, 96% da variabilidade das densidades básicas é explicada por  $v_1$ . Pode se afirmar, assim, que as variáveis originais da função canônica ( $u_1$ ) conseguiram expressar, com seus valores, boa parte da variância observada para a densidade básica.

## 1.5 CONCLUSÃO

As variáveis originais que apresentaram as maiores cargas canônicas e cargas canônicas cruzadas – estando assim associadas às maiores densidades básicas com e sem casca - foram material genético, área vital, temperatura média anual e textura do solo. Inversamente, as menores densidades básicas com e sem casca apresentaram-se associadas às menores cargas canônicas e cargas canônicas cruzadas, que foram atribuídas às variáveis produtividade, área basal, rotação e precipitação anual acumulada.

Os resultados obtidos demonstram a possibilidade de utilização dessa técnica de análise multivariada para realizar inferências a respeito de variáveis dendrométricas do plantio e do sítio na densidade básica da madeira de *Eucalyptus*

eucalipto em uma topossequência no campus da UFRRJ, Seropédica-RJ. *Ciência Florestal*; 17(1): 43-51.

COSTA, V. E., DE REZENDE, M. A., HORMAZA, J. M. 2007. Variation study on wood density of hybrid eucalyptus clones through gamma-ray attenuation technique of  $^{241}\text{Am}$ . In: International Nuclear Atlantic Conference - INAC 2007. Santos, SP, Brasil. Anais... Santos.

CRUZ, C.D.; REGAZZI, A.J. 1997. Modelos biométricos aplicados ao melhoramento genético. 2.ed. Viçosa: UFV. 390p.

FERNANDES, D. E.; GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L.; FERREIRA, M. Z. 2011. Influence of eucalypt hybrids clones productivity on wood basic density and kraft pulping yield. *Scientia Forestalis*, 39, 143-150.

FERREIRA, M. Z. 2009. Modelagem da influência de variáveis ambientais no crescimento e produção de *Eucalyptus* sp. (Tese). Lavras: Universidade Federal de Lavras.

GONÇALVES, J. D. M., MELLO, S. D. M., 2000. O sistema radicular das árvores. *Nutrição e fertilização florestal. IPEF, Brazil*, 219-267.

GOUVEA, A. G., GOMES, C. M., MATOS, L. M., SOUZA, T. A., KUMABE, F. J. B., BENITES, P. K. R. M., 2012. Efeito do sítio nas características tecnológicas da madeira de *Eucalyptus* para produção de celulose kraft. *Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)*, 3(2), 10-12953.

HAIR JUNIOR, J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. 2005. Análise multivariada de dados. Porto Alegre: Bookman. 593 p.

IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. Relatório Anual IBÁ 2017. São Paulo, 2017. 80 p.

JOHNSON, R. A. WICHERN, D. W. 2007. Applied multivariate statistical analysis, 6.ed. New Jersey: Prentice-Hall. 800 p.

LEAL, S., PEREIRA, H., GRABNER, M., WIMMER, R., 2004. Clonal and site variation of vessels in 7 year old *Eucalyptus globulus*. *IAWA Journal*, Leiden, v.24, n.2, p.185-195.

LEITE, F.P., BARROS, N.F., NOVAIS, R.F., SANS, L.M.A., FABRES, A.S., 1997. Crescimento de *E. grandis* em diferentes densidades populacionais. *Rev. Árvore* 2, 313–321.

LELES, P.S.S., REIS, G.G., REIS, M.G.F., MORAIS, E.J., 2001. Crescimento, produção e alocação de matéria seca de *Eucalyptus camaldulensis* e *E. pellita* sob diferentes espaçamentos na região de cerrado, MG. *Sci. For.* 59, 77–87.

- LITTLE, K. M.; VAN STADEN, J.; CLARKE, G. P. Y. 2003. *Eucalyptus grandis* x *E. camaldulensis* variability and intra-genotypic competition as a function of different vegetation management treatments. *New Forests*, Amsterdam, v. 25, n. 3, p. 227-242.
- MALAN, F. S., 1991. Variation, association and inheritance of juvenile wood properties of *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden with special reference to the effect of rate of growth. *South African Forestry Journal*, 157,16-23.
- MENESES, V.A., 2013. Efeito da idade e sítio na densidade básica e produção de massa seca de madeira em clone do *Eucalyptus urophylla*. (Dissertação). UFV Universidade Federal de Lavras, Lavras, 110 pp.
- MEURER, E. J. 2007. Fatores que influenciam o crescimento e o desenvolvimento de plantas. In: NOVAIS, R. F.; VENEGAS, V. H. A.; BARROS, N. F.; FONTES, R. L. F.; CANTARUTTI, R. B.; NEVES, J. C. L. (Ed.). *Fertilidade do solo*. Viçosa: SBCS. p. 65–90.
- MULLER-LANDAU, H. C., 2004. Interspecific and Inter-site Variation in Wood Specific Gravity of Tropical Trees 1. *Biotropica*, 36(1), 20-32.
- NYLAND, R. D. 2007. *Silviculture: concepts and applications*. 2.ed. Long Grove: Waveland press. 682 p.
- NILSSON, U.; ALBAUGH, T.; ALLEN, H. L. 2002. Development of size hierarchies prior to the onset of density-dependent mortality in irrigated and fertilized loblolly pine stands. *Canadian Journal of Forest Research*, Ottawa, v. 32, n. 6, p. 989-996.
- NILSSON, U.; ALLEN, H. L. 2003. Short-and long-term effects of site preparation, fertilization and vegetation control on growth and stand development of planted loblolly pine. *Forest Ecology and Management*, 175(1), 367-377.
- OBERHUBER, W.; GRUBER, A.; KOFLER, W.; SWIDRAK, I. 2014. Radial stem growth in response to microclimate and soil moisture in a drought-prone mixed coniferous forest at an inner Alpine site. *European journal of forest research*, 133(3), 467-479.
- OLIVEIRA, J. D., ROSSI, M. N., M CALDERANO FILHO, B. 1999. Mapa pedológico do Estado de São Paulo: legenda expandida (No. 631.498161 M297). Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Campinas, SP (Brasil). Centro Nacional de Pesquisa de Solos Instituto Agronômico, Campinas, SP (Brasil).
- ORLANDER, G.; NORDBORG, G.; GEMMEL, 2002. P. Effects of complete deep-soil cultivation on initial forest stand development. *Studia Forestalia Suecica*, Upsala, n. 213, p. 1-20.
- PANSHIN, A. J.; ZEEUW, C. 1980. Text Book of Wood Technology volume I. New York:McGraw Hill Book Company.

R CORE TEAM R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Áustria. Disponível em: <<http://cran.r-project.org/>>. Acesso em: 20 ago. 2017.

REIS, G. G., REIS, M. G. F., FONTAN, I. C. I.; MONTE, M. C.; OLIVEIRA, C. H. R. 2006. Crescimento de raízes e da parte aérea de clones de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e de *Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus* spp submetidos a dois regimes de irrigação no campo. *Revista Árvore*, 30(6): 921-931.

RIBEIRO, F. A.; ZANI FILHO, J. 1993. Variação da densidade básica da madeira em espécies / procedências de *Eucalyptus* spp. IPEF. 46, 76-85.

RIBEIRO, M. D. D. S. B., JORGE, L. A. B., MISCHAN, M. M., SANTOS, A. L., BALLARIN, A. W. 2017. Avaliação da produção de biomassa do fuste de um clone híbrido de eucalipto sob diferentes espaçamentos. *Ciência Florestal*, 27(1), 31-45.

RIGATTO, P. A.; DEDECEK, R. A.; MONTEIRO DE MATOS, J. L., 2004. Influência dos atributos do solo sobre a qualidade da madeira de *Pinus taeda* para produção de celulose Kraft. *Revista árvore*, 28, 267-273.

ROSADO, A. M., ROSADO, T. B., ALVES, A. A., LAVIOLA, B. G., BHERING, L. L. 2012. Simultaneous selection of eucalyptus clones based on yield, stability and adaptability. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 47(7), 964-971.

SEGHATOLESLAMI, M. J.; KAFI, M.; MAJIDI, E. 2008. Effect of drought stress at different growth stages on yield and water use efficiency of five proso millet (*Panicum miliaceum* L.) genotypes. *Pakistan Journal of Botany*, Karachi, v. 40, n. 4, p. 1427-1432.

SETTE JR, C. R., TOMAZELLO FILHO, M., DIAS, C. T. D. S., LACLAU, J. P., 2010. Crescimento em diâmetro do tronco das árvores de *Eucalyptus grandis* W. Hill. Ex. Maiden e relação com as variáveis climáticas e fertilização mineral. *Revista árvore*, 34(6), 979-990.

SILVA, C. R. 2006. *Efeito do espaçamento e do arranjo de plantio na produtividade e uniformidade de clones de Eucalyptus na região Nordeste do Estado de São Paulo*. 2006. 51 p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais). Escola Superior de Agricultura "Luiz de Queiroz", Universidade de São Paulo, Piracicaba.

SILVA, J. W.; SOARES, L., FERREIRA, P. V., DA SILVA, P. P., DA SILVA, M. J. C. 2007. Correlações canônicas de características agroindustriais em cana-de-açúcar- DOI: 10.4025/actasciagron. v29i3. 279. *Acta Scientiarum. Agronomy*, 29(3), 345-349.

SOUZA, R. F., FAQUIN, V., ROGÉRIO, P., TORRES, F., BALIZA, D. P., 2006. Calagem e adubação orgânica: influência na adsorção de fósforo em solos. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, 30(6), 975-983.

TROVATI, L. R., FERRAZ, E. S., 1984. Influência da precipitação e da temperatura na densidade dos anéis de crescimento de *Pinus oocarpa*. IPEF, 26, 31-36.

TRUGILHO, P.F. 2003. Correlação canônica das características químicas e físicas da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus saligna*. *Cerne*, v.9, n.1, p.66-80.

WOOLLONS, R. C.; SNOWDON, P.; MITCHELL, N. C. 1997. Augmenting empirical stans projections with edaphic and climatic variable. *Forest Ecology and Management*, Amsterdã, v.98, n.3, p.267-275.

YEH, H. Y.; WENSEL, L. C.; TURNBLOM, E. C. 2000. An objective approach for classifying precipitation patterns to study climatic effects on tree growth. *Forest Ecology and Management*, Amsterdã, v.139, n.1, p.41-50.

## CAPÍTULO 2

### EMPREGO DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS NA ESTIMATIVA DA DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA COM USO DO INVENTÁRIO FLORESTAL PRÉ-CORTE

Maria Dolores dos Santos Barzotto Ribeiro <sup>a</sup>, Daniel Henrique Breda Binoti <sup>b</sup>,  
Helio Garcia Leite <sup>c</sup>, Osvaldo Cesar Pinheiro de Almeida <sup>d</sup>; Adriano Wagner Ballarin <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Engenharia Rural, Faculdade de Ciências Agronômicas, Universidade Estadual de São Paulo, Botucatu.

<sup>b</sup> Departamento de Engenharia Florestal e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro.

<sup>c</sup> Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa 36570-000.

<sup>d</sup> Faculdade de Tecnologia de Botucatu, Botucatu.

#### RESUMO

O manejo florestal sustentável requer estimativas precisas do estoque de crescimento. Geralmente quando se pretende quantificar a produção florestal em termos de tonelada ( $\text{ton}\cdot\text{ha}^{-1}$ ), é necessário estimar a densidade básica da madeira a partir de modelos matemáticos complexos, que dependem da constante amostragem destrutiva de árvores para seu ajuste e atualização. Apesar de cada vez mais as técnicas de amostragem não destrutiva estarem sendo empregadas para minimizar o custo relativamente alto do abate das árvores, elas não conseguem explicar a contento a variabilidade na densidade básica da madeira. Neste aspecto, a técnica de Redes Neurais Artificiais foi utilizada como alternativa para modelagem não linear, estimando a densidade básica a partir de bases de dados do inventário florestal pré-corte. O conhecimento adquirido pela rede foi aplicado a um cadastro de informações semelhantes, usando o método de generalização. Usando dados de uma empresa florestal, que engloba 2.988 ha distribuídos em cinco regiões edafoclimáticas, com 21 materiais genéticos com amplitude de idade variando de 4 a 11 anos, foram geradas as estimativas de densidade básica da madeira de forma rápida e eficaz, com raiz quadrada do erro quadrático médio de 1,92% para densidade com casca e 2,01% para sem casca.

**Palavras-chave:** Inventário florestal pré-corte; Redes Neurais Artificiais; Variáveis climáticas; *Eucalyptus* spp.

# APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS IN THE ESTIMATION OF THE WOOD BASIC SPECIFIC GRAVITY WITH THE USE OF PRE-CUTTING FOREST INVENTORY

## ABSTRACT

Sustainable forest management requires accurate estimates of the growth stock. Generally when it is desired to quantify the forest production in terms of tonne (ton.ha<sup>-1</sup>), it is necessary to estimate the basic specific gravity of the wood from complex mathematical models, which depend on the constant destructive sampling of trees for their adjustment and updating. Although non-destructive sampling techniques are increasingly being employed to minimize the relatively high cost of accurate sampling, they are unable to explain satisfactorily the variability in the wood basic specific gravity. With this aim, the Artificial Neural Networks technique was used as an alternative for non-linear modeling, estimating the wood basic specific gravity from the pre-cut forest inventory databases. The knowledge acquired by the network was applied to a register of similar information, using the generalization method. Using data from a forest company, which includes 2,988 ha distributed in five edaphoclimatic regions, with 21 genetic materials with age ranging from 4 to 11 years, wood basic specific gravity estimates were generated in a fast and efficient way, with root mean square error of 1.92% for analysis with full disks (wood+bark) and 2.01% for analysis considering disks without bark.

**Keywords:** Pre-cutting forest inventory; ANN – artificial neural network, climate variables; *Eucalyptus* spp.

## 2.1 INTRODUÇÃO

Nos empreendimentos florestais dedicados ao abastecimento de processos fabris - painéis, celulose e carvão - é mais efetiva a quantificação do estoque de madeira dos povoamentos em tonelada por hectare (ton.ha<sup>-1</sup>) do que em volume por hectare (m<sup>3</sup>.ha<sup>-1</sup>). Para isso, a estimativa da densidade básica da madeira torna-se procedimento imprescindível no processo de inventário florestal (CAMPOS; LEITE, 2013). As combinações de informações gerais do inventário e densidade básica

Vários estudos baseados em modelos de regressão relataram valores de coeficiente de determinação próximos de 85% quando utilizados em conjunto com as medições de penetração da agulha Pilodyn e de 65% a 74% quando combinados com resultados de resistência e perfuração coletados usando Resistograph (KAHL et al., 2009, WU et al., 2010). Couto et al. (2013) estudaram métodos não destrutivos para estimativa de densidade em *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* e coeficientes de determinação observados de moderada (82%) a baixa (32%), respectivamente os valores registrados usando métodos de Resistograph e Pilodyn não conseguiram explicar suficientemente a variabilidade na densidade básica. Assim, a precisão da RNA gerada neste estudo foi 9% maior do que as estimativas geradas por modelos matemáticos complexos para estimação da densidade básica.

Além das melhorias estatísticas, uma das principais vantagens do uso de RNA é o potencial de utilizar os resultados obtidos das redes para estimar dados desconhecidos, incluindo análises da variabilidade intrínseca do local, do material genético e da idade da floresta.

## 2.5 CONCLUSÃO

As regiões amostradas tiveram comportamento da densidade básica dentro do padrão clássico de normalidade, comprovado pela variação de seus valores com fatores influentes, como precipitação, temperatura, textura do solo e área vital. Regiões com condições de sítio favoráveis - maior disponibilidade hídrica – proporcionaram maior produtividade ao povoamento, ou seja, as árvores apresentaram maior crescimento volumétrico e madeira de menor densidade básica.

O melhoramento genético proporcionou maior uniformidade entre os indivíduos nos padrões de densidade básica da madeira, com e sem casca, independentemente do sítio. Os padrões de uniformidade forem crescentes à medida que o grau de melhoramento genético era aumentado, partindo dos plantios seminais de *Eucalyptus grandis*, para os híbridos de *Eucalyptus* spp. e por último, os híbridos entre *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*.

As redes neurais artificiais podem ser utilizadas na estimativa da densidade básica da madeira para as unidades de manejo. Fornecem resultados estatísticos melhorados - em relação aos modelos de regressão – e os coeficientes de correlação obtidos foram da ordem de 93%. A técnica não requer grandes

investimentos anuais na amostragem de densidade para identificar variações de sítio, idade e floresta. Além disso, a inclusão das variáveis qualitativas, - material genético e textura de solo – e variáveis ambientais, foi uma estratégia apropriada de modelagem por tratar áreas com dados limitados, pois a densidade básica foi fortemente influenciada por elas.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, A.C., LANDSBERG, J.J., SANDS, P.J., AMBROGI, M.S., FONSECA, S., BARDDAL, S.M., BERTOLUCCI, F.L., 2004. Needs and opportunities for using a process-based productivity model as a practical tool in *Eucalyptus* plantations. *Forest Ecology and Management*. 193 (1), 167–177.
- BAKER, T. R.; PHILLIPS, O. L.; MALHI, Y.; ALMEIDA, S.; ARROYO, L.; DI FIORE, A.; KILLEEN, T. J.; LAURANCE, S. G.; LAURANCE, W. F.; LEWIS, S. L.; LLOYD, J.; MONTEAGUDO, A.; NEILL, D. A.; PATIÑO, S.; PITMAN, N. C. A.; SILVA, N.; MARTÍNEZ, R. V. 2004. Variation in wood density determines spatial patterns in Amazonian forest biomass. *Global Change Biology*, Oxford, v. 10, n. 5, p. 545- 562.
- BERGÈS, L.; NEPVEU, G.; FRANC, A., 2008. Effects of ecological factors on radial growth and wood density components of sessile oak (*Quercus petraea* Liebl.) in Northern France. *Forest Ecology and Management*, Amsterdam, 255 (3/4), 567-579.
- BINOTI, M. L. M. S., 2010. Redes neurais artificiais para prognose da produção de povoamentos não desbastados de eucalipto. 54f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2010.
- BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M. S.; LEITE, H. G. 2014. Configuração de Redes Neurais Artificiais para estimação do volume de árvores. *Ciência da Madeira*, Pelotas, Maio 58-67.
- BOWYER, J. L.; HAYGREEN, J. G.; SCHMULSKY, R. 2003. *Forest Products and Wood Science: An Introduction*. Fourth Edition. Iowa State Press.
- BRAGA, A. DE P.; CARVALHO, A. P. DE L. F. DE; LUDEMIR, T. B., 2000. *Redes Neurais Artificiais: teoria e aplicações*. 262p.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G., 2013. *Mensuração florestal: Perguntas e respostas*. Universidade Federal de Viçosa, 605p.
- CALDEIRA, M. V. W.; RONDON NETO, R. M.; SCHUMACHER, M. V. 2002. Avaliação da eficiência nutricional de três procedências australianas de acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.). *Revista Árvore*, v. 26, n. 5, p. 615-620.
- CASTELLANOS, A.; BLANCO, A. M.; PALENCIA, V., 2007. Applications of radial basis neural networks for area forest. *International Journal Information Theories and Applications*, v.14, p.218-222.

CASTRO, R.V.O. 2011. Modelagem do crescimento em nível de árvores individuais utilizando redes neurais e autômatos celulares. 80p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

CASTRO, R. V. O.; SOARES, C. P. B., MARTINS, F. B., LEITE, H. G. 2013. Crescimento e produção de plantios comerciais de eucalipto estimados por duas categorias de modelos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, 48(3), 287-295.

CHAVES, R., 2012. Relatório: Desenvolvimento Silvicultural - MDS. (Arquivos Internos) Duratex Florestal.

CPTEC, 2016. Monitoramento e previsão do fenômeno *El-Niño* e *La-Niña*. Disponível em: [www.cptec.inpe.br/enos](http://www.cptec.inpe.br/enos). Acesso em: 17 de fev. 2016.

COUTO, A. M., TRUGILHO, P. F., NEVES, T. A., PROTÁSIO, T. D. P., SÁ, V. A. D., 2013. Modeling of basic density of wood from *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus urophylla* using nondestructive methods. *Cerne*, 19(1), 27-34.

DIAMANTOPOULOU, M. J. 2005. Artificial neural networks as an alternative tool in pine bark volume estimation. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 48, n.3, p. 235-244.

DIAMANTOPOULOU, M. J. 2012. Assessing a reliable modeling approach of features of trees through neural network models for sustainable forests. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 2(4), 190-197.

DOWNES, G.M.; HUDSON, I.L.; RAYMOND, C.A.; DEAN, G.H.; MICHELL, A.J.; SCHIMLECK, R.; EVANS, R.; MUNERI, A., 1997. Sampling plantation eucalypts for wood and fiber properties. Melbourne: CSIRO. 126p.

FOELKEL, C., 2009. Papermaking properties of eucalyptus trees, woods and pulp fibers. *Eucalyptus Online Book Newsletter*.

GONÇALVES, J. L. M., ALVARES, C. A., HIGA, A. R., SILVA, L. D., ALFENAS, A. C., STAHL, J., ... BOUILLET, J. P. D. 2013. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. *Forest Ecology and Management*, 301, 6-27.

GÖRGENS, E. B., LEITE, H. G., GLERIANI, J. M., SOARES, C. P. B., CEOLIN, A. 2014. Influência da arquitetura na estimativa de volume de árvores individuais por meio de redes neurais artificiais. *Revista Árvore*, 38(2).

GOUVEA, A. G., GOMES, C. M., MATOS, L. M., SOUZA, T. A., KUMABE, F. J. B., BENITES, P. K. R. M., 2012. Efeito do sítio nas características tecnológicas da madeira de *Eucalyptus* para produção de celulose kraft. *Revista Ciência da Madeira (Brazilian Journal of Wood Science)*, 3(2), 10-12953.

HAYKIN, S., 2001. Redes neurais: princípios e prática. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 900 p.

HEATON, J. 2011. *Programming Neural Networks with Encog3 in Java*. 2.ed. Heaton Research, Incorporated. 240 p.

HUDSON, I., WILSON, L., VAN BEVEREN, K. 1998. Vessel and fibre property variation in *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens*: some preliminary results. *IAWA Journal*, 19(2), 111-130.

IMADA, 2014. A Literature review: forest management with neural network and artificial intelligence. In: *Neural Networks and Artificial Intelligence: 8th International Conference ... 2014, Belarus. Proceedings...* Brest State Technical University, p.9-21.

KAHL, T.; WIRTH, C.; MUND, M.; BOHNISCH, G.; SCHULZE, E. D., 2009. Using drill resistance to quantify the density in coarse woody debris of Norway spruce. *European Journal of Forestry Research*, London, v. 128, p. 467-473.

LARSON, P. R. 1963. Evaluating the environment for studies of the inheritance of wood properties. In: *WORLD CONSULTATION ON FOREST GENETICS AND TREE IMPROVEMENT*, Stockholm, Proceedings. Rome: FAO. v.2, 10p.

LEITE, H. G., BINOTI, D. H. B., OLIVEIRA NETO, R. R. D., LOPES, P. F., CASTRO, R. R. D., PAULINO, E. J., ... COLODETTE, J. L. 2016. Redes Neurais Artificiais para a estimação da densidade básica da madeira. *Sci. For.*, Piracicaba, v. 44, n. 109, p. 149-154, mar.

MARTINS, E.R.; BINOTI, M.L.M.S.; LEITE, H.G.; BINOTI, D.H.B.; DUTRA, G.C. 2016. Configuração de redes neurais artificiais para estimação da altura total de árvores de eucalipto. *Agrária*, v.11, n.2, p.117-123.

MCKENZIE, H. M.; SHELBOURNE, C. J. A.; KIMBERLEY, M. O.; MCKINLEY, R. B.; BRITTON, R. A. J. 2003. Processing young plantation-grown *Eucalyptus nitens* for solid-wood products: 2., predicting product quality from tree, increment core, disc and 1-m billet properties. *New Zealand Journal of Forestry Science*, Rotorua, v. 33, n. 1, p. 79-113, Feb.

MEHTÄTALO, L.; MALTAMO, M.; KANGAS, A., 2006. The use of quantile trees in the prediction of the diameter distribution of a stand. *Silva Fennica*, v. 40, n. 3, p. 501-516.

MENESES, V.A., 2013. *Efeito da idade e sítio na densidade básica e produção de massa seca de madeira em clone do Eucalyptus urophylla*. (Dissertação). UFV Universidade Federal de Lavras, Lavras, 110 p.

MORA, A.L. GARCIA, C.H. 2000. *A cultura do Eucalipto no Brasil*. São Paulo: SBS.

MORONI, M. T.; NORLEDGE, D.; BEADLE, C. L., 2003. Root distribution of *Eucalyptus nitens* and *E. globules* in irrigated and droughted soil. *Forest Ecology and Management*, v. 177, p. 399-407.

- MULLER-LANDAU, H. C., 2004. Interspecific and Inter-site Variation in Wood Specific Gravity of Tropical Trees 1. *Biotropica*, 36(1), 20-32.
- OLIVEIRA, J. D., ROSSI, M. N., M CALDERANO FILHO, B. 1999. *Mapa pedológico do Estado de São Paulo: legenda expandida* (No. 631.498161 M297). Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Campinas, SP (Brasil). Centro Nacional de Pesquisa de Solos Instituto Agronômico, Campinas, SP (Brasil).
- OLIVEIRA, B.R.U., DE FIGUEIREDO LATORRACA, J.V., TOMAZELLO FILHO, M., GARCIA, R.A., DE CARVALHO, A.M., 2011. Correlações dendroclimatológicas do *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden na região de Rio Claro, RJ. *Ciência Florestal*, 21(3), 499-508.
- OLIVEIRA, G. M. V.; MELLO, J. M. DE; TRUGILHO, P. F.; SCOLFORO, J. R. S.; ALTOÉ, T. F.; SILVA NETO, A. J. DE; OLIVEIRA, A. D. de. 2012. Efeito do ambiente sobre a densidade da madeira em diferentes fitofisionomias do Estado de Minas Gerais. *Cerne*, Lavras, v. 18, n. 2, p. 345-352, abr./jun.
- ROQUE, R., TOMAZELLO FILHO, M. 2009. Variação radial da estrutura anatômica do lenho de árvores de *Gmelina arborea* em diferentes condições de clima e de manejo na Costa Rica. Radial variation of the wood anatomical structure of *Gmelina arborea* trees from different climatic and management conditions in Costa Rica. *Scientia*, 37(83), 273-285.
- SILVA, M.L.M. DA; BINOTI, D.H.B.; GLERIANI, J.M.; LEITE, H.G. 2009. Ajuste do modelo de *Schumacher e Hall* e aplicação de redes neurais artificiais para estimar volume de árvores de eucalipto. *Revista Árvore*, v.33, p.1133-1139.
- SOARES, C. P. B.; PAULA NETO, F.; SOUZA, A. L. 2011. *Dendrometria e inventário florestal*. 2 ed. Viçosa: UFV.
- THIERSCH, C. R., SCOLFORO, J. R., DE OLIVEIRA, A. D., REZENDE, G. D. S. P., MAESTRI, R., 2006. O uso de modelos matemáticos na estimativa da densidade básica da madeira em plantios de clones de *Eucalyptus* sp. *Cerne*, 12(3), 264-278.
- TONELLO, K. C.; TEIXEIRA FILHO, J. 2011. Efeito das variáveis ambientais no comportamento ecofisiológico de dois clones de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*: condições de campo. *Scientia Forestalis*, v.39, n. 92, p. 419-431.
- TRENBERTH, K. E., 1991. General characteristics of El Niño-Southern Oscillation, *Teleconnections Linking Worldwide Climate Anomalies* MH Glantz, RW Katz, N. Nicholls, 13–42.
- VAN LAAR, A., AKCA, A. (Eds.), 2007. *Forest mensuration*. Springer Science Business Media. Vol. 13
- WIMMER, R.; DOWNES, G.M.; EVANS, R., 2002. Temporal variation of microfibril angle in *Eucalyptus nitens* grown in different irrigation regimes. *Tree Physiology*, 22:449-457.

WU, S., XU, J., LI, G., RISTO, V., LU, Z., LI, B., WANG, W. 2010. Use of the pilodyn for assessing wood properties in standing trees of *Eucalyptus* clones. *Journal of Forestry Research*, London, v. 21, n. 1, p. 68-72.

### CAPÍTULO 3

## EFICIÊNCIA DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS NA ESTIMATIVA DA DENSIDADE BÁSICA DA MADEIRA A PARTIR DE DADOS DE INVENTÁRIO FLORESTAL CONTÍNUO

Maria Dolores dos Santos Barzotto Ribeiro <sup>a</sup>, Daniel Henrique Breda Binoti <sup>b</sup>, Helio Garcia Leite <sup>c</sup>, Osvaldo Cesar Pinheiro de Almeida <sup>d</sup>; Adriano Wagner Ballarin <sup>a</sup>

<sup>a</sup> Departamento de Engenharia Rural, Faculdade de Ciências Agrônômicas, Universidade Estadual de São Paulo, Botucatu.

<sup>b</sup> Departamento de Engenharia Florestal e da Madeira da Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro.

<sup>c</sup> Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

<sup>d</sup> Faculdade de Tecnologia de Botucatu, Botucatu.

### RESUMO

Na indústria de base florestal a densidade básica é um dos mais importantes parâmetros de qualidade da madeira. O conhecimento prévio da densidade básica da madeira com e sem casca de *Eucalyptus* spp. permite a redução no consumo de madeira e a homogeneização do processo fabril, gerando ganhos tanto para a área florestal quanto para a área industrial. As técnicas usualmente utilizadas na estimativa da densidade básica por unidade de manejo dependem de uma ampla amostragem de campo para geração das bases de dados de processamento, que implica em custos adicionais ao inventário florestal. Com esse intento, a técnica de Redes Neurais Artificiais foi utilizada como alternativa para modelagem não linear, estimando a densidade básica a partir de bases de dados históricas e aplicando o conhecimento adquirido pela rede a todo um cadastro de informações semelhantes pelo método de generalização. A partir dos dados de cinco regiões edafoclimáticas e de suas características quantitativas e qualitativas do sítio, foram geradas estimativas de forma rápida e eficaz, com raiz quadrada do erro quadrático médio de 1,97% para densidade com casca e 2,06% para sem casca. Além do potencial estatístico, o método em si proporciona ganhos em custo operacional por utilizar bases de dados de séries históricas para o ajuste das estimativas, reduzindo a necessidade de novas amostragens.

**Palavras-chave:** Inventário florestal contínuo, Redes Neurais Artificiais; *Multilayer Perceptron*, *Eucalyptus* spp.

## EFFICIENCY OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS IN THE ESTIMATION OF WOOD BASIC SPECIFIC GRAVITY FROM CONTINUOUS FOREST INVENTORY

### ABSTRACT

In the manufacturing process, basic specific gravity is one of the most important characteristics of wood that affect the productive process in the forest-based industry. Knowing in advance the specific gravity of *Eucalyptus* spp. allows the reduction in wood consumption and the homogenization of the process, which generates gains, both for the forest area and for the industrial area. The techniques usually used to estimate the specific gravity per unit of management depend on a wide field sampling for generation of the processing databases, which implies additional costs to the forest inventory. With this intent, the technique of Artificial Neural Networks was used as an alternative for nonlinear modeling, estimating the specific gravity from historical databases and applying the knowledge acquired by the network to a whole register of similar information by the generalization method. From the data of five edaphoclimatic regions and quantitative and qualitative characteristics of the site, estimates of the basic specific gravity were generated quickly and efficiently, with root mean square error of 1.97% for analysis with full disks (wood+bark) and 2.06% for analysis considering disks without bark. In addition to the statistical potential, the method itself provides gains in operating cost by using historical series databases for the adjustment of estimates, reducing the need for new samplings.

**Keywords:** Forest inventory; ANN – Artificial Neural Network; Multilayer perceptron; *Eucalyptus* spp.

### 3.1 INTRODUÇÃO

Na indústria de base florestal, os principais aspectos considerados nas linhas de produção são a produtividade e a qualidade do produto. Os produtos de madeira têm exigências cada vez maiores de qualidade, por parte do mercado consumidor. O controle da qualidade é complexo, mesmo nos processos industriais, visto que são vários os fatores intervenientes e suas possíveis interações. A variabilidade natural

usualmente obtidas em modelos de regressão calibrados com dados de amostragem não destrutiva. Segundo Thiersch et al. (2006) e Lima et al. (2007), modelos complexos usados para estimativa da densidade, como os construídos através do método Stepwise e que agregam variáveis de povoamento (dap, altura média das árvores e índice de sítio) apresentam valores de coeficiente de determinação próximos a 85% (quando utilizado em conjunto com as medidas de penetração da agulha do Pilodyn) e de 65% a 74% (quando utilizadas em conjunto com as medidas de resistência a perfuração por Resistógrafo).

### 3.5 CONCLUSÃO

As RNA demonstraram ser uma poderosa ferramenta para o manejo florestal. Representam uma abordagem alternativa confiável, precisa e eficiente para a estimativa da densidade básica da madeira com e sem casca utilizando dados do inventário florestal contínuo e parâmetros de manejo e edafoclimáticos do sítio. A capacidade de aprendizado da rede, por meio das bases de dados históricas de densidade básica e utilizando informações do IFC, possibilita que o conhecimento adquirido seja generalizado para outras bases de dados com informações semelhantes, sem que haja necessidade de sucessivas amostragens destrutivas.

A partir de estimativas precisas para a densidade básica da madeira, é possível prever, com antecedência, múltiplos cenários de abastecimento industrial no longo, médio e curto prazos, garantindo a sustentabilidade do manejo da floresta com foco na homogeneização do processamento da madeira, proporcionando ganhos diretos e indiretos no processo industrial.

### REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A., STAPE, J. L., SENTELHAS, P. C., DE MORAES, G., LEONARDO, J., SPAROVEK, G. 2013. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorologische Zeitschrift*, 22(6), 711-728.
- ALEKSANDER I., MORTON H., 1990. *An introduction to neural computing*. Chapman Hall, London.
- ARBIB, M.A., 2003. *The handbook of brain theory and neural networks*. MIT press.

BOWYER, J. L.; HAYGREEN, J. G.; SCHMULSKY, R. 2003. Forest Products and Wood Science: An Introduction. *Fourth Edition*. Iowa State Press.

BRAGA, A.P., CARVALHO, A.P.L.F., LUDEMIR, T.B., 2000. *Redes neurais artificiais: Teoria e aplicações*. Rio de Janeiro: Livros Técnicos e Científicos. 262 p.

BULLINARIA, J. A. 2004. Introduction to neural networks. Lectures. University of Birmingham, UK. <<http://www.cs.bham.ac.uk/~jxb/inn.html>> (accessed 25.08.14).

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G., 2013. *Mensuração florestal: Perguntas e respostas*. Universidade Federal de Viçosa, 605p.

CASTELLANOS, A.; BLANCO, A. M.; PALENCIA, V. 2007. Applications of radial basis neural networks for area forest. *International Journal Information Theories and Applications*, v.14, p.218-222.

CHAUHAN, B.R.S., BIST, J.P.S., 1987. Hardboard from Unbarked *Eucalyptus* Hybrid. *Indian Forester*, 113(3), 185-190.

CIAGRO, 2016. Centro integrado de informações agrometeorológicas, Campinas, SP. Disponível em: <http://www.ciiagro.sp.gov.br/ciiagroonline/Quadros/QTmedPeriodo.asp>. Acesso em: 20.10.2016.

DE ASSIS, T.F. 2001. Melhoramento para produtividade e qualidade de celulose de fibra curta. In: Resende, M.DV. (Ed.) Workshop sobre Melhoramento de Espécies Florestais e Palmáceas no Brasil. Curitiba: Embrapa Florestas. p.193-214.

DE ASSIS, T. F.; ABAD, J. I. M.; AGUIAR, A. M. 2016. Melhoramento genético do eucalipto. In: Silvicultura do Eucalipto no Brasil. Disponível em: <https://www.researchgate.net/publication/281408099>. Acesso em: 01/10/17.

DIAMANTOPOULOU, M. J., 2005. Artificial neural networks as an alternative tool in pine bark volume estimation. *Computers and Electronics in Agriculture*. 48, 235-244.

FERNANDES, D. E.; GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L.; FERREIRA, M. Z. 2011. Influence of eucalypt hybrids clones productivity on wood basic density and kraft pulping yield. *Scientia Forestalis*, 39, 143-150.

FOELKEL, C., 2009. Papermaking properties of *eucalyptus* trees, woods and pulp fibers. *Eucalyptus Online Book Newsletter*.

HEATON, J. *Programming Neural Networks with Encog3 in Java*. 2.ed. Heaton Research, Incorporated, 2011. 240 p.

HAYKIN, S., 2001. *Redes neurais: princípios e prática*. 2. ed. Porto Alegre: Bookman. 900 p.

HAYKIN, S., 1999. *Neural Networks: a comprehensive foundation*. McMaster University Hamilton, Ontario, Canada, Pearson Education, 823p.

IMADA, A., 2014. A literature review: forest management with neural network and artificial intelligence. In *Neural Networks and Artificial Intelligence* (pp. 9-21). *Springer International Publishing*.

IPMet, 2016. Estação Meteorológica Automática IPMet, Bauru, SP. Disponível em: [https://www.ipmet.unesp.br/index2.php?menu\\_esq1=&abre=ipmet\\_html/estacao/historico.php](https://www.ipmet.unesp.br/index2.php?menu_esq1=&abre=ipmet_html/estacao/historico.php). Acesso em: 20.10.2016.

KOURTZ, P., 1990. Artificial intelligence: a new tool for forest management. *Forestry Canada*, 20: 428-437.

KRZYSIK, A.M., YOUNGQUIST, J.A., MUEHL, J.H., FRANCA, F.E., 2001. Medium density fiberboards from plantation grown *Eucalyptus saligna*. *Forest Products Journal*, Madison, 51, 47-50.

LEITE, H. G., BINOTI, D. H. B., OLIVEIRA NETO, R. R. D., LOPES, P. F., CASTRO, R. R. D., PAULINO, E. J., ... COLODETTE, J. L. 2016. Redes Neurais Artificiais para a estimação da densidade básica da madeira. *Sci. For.*, Piracicaba, v. 44, n. 109, p. 149-154, mar.

LEK, S., DELACOSTE, M., BARAN, P., DIMOPOULOS, I., LAUGA, J., AULAGNIER, S., 1996. Application of neural networks to modelling nonlinear relationships in ecology. *Ecological modelling*, 90(1), 39-52.

LIMA, J. T., SARTORIO, R. C., TRUGILHO, P. F., CRUZ, C. R., VIEIRA, R. S., 2007. Uso do resistógrafo para estimar a densidade básica ea resistência à perfuração da madeira de *Eucalyptus*. *Scientia Forestalis*, 75, 85-93.

MALAN, F. S., 1991. Variation, association and inheritance of juvenile wood properties of *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden with special reference to the effect of rate of growth. *South African Forestry Journal*, 157,16-23.

MENESES, V.A., 2013. *Efeito da idade e sítio na densidade básica e produção de massa seca de madeira em clone do Eucalyptus urophylla*. (Dissertação). UFV Universidade Federal de Lavras, Lavras, 110 pp.

MEHTÄTALO, L., MALTAMO, M., KANGAS, A., 2006. The use of quantile trees in the prediction of the diameter distribution of a stand. *Silva Fennica*, 40 (3), 501-516.

OLIVEIRA, J. D., ROSSI, M. N., M CALDERANO FILHO, B. 1999. Mapa pedológico do Estado de São Paulo: legenda expandida (No. 631.498161 M297). Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Campinas, SP (Brasil). Centro Nacional de Pesquisa de Solos Instituto Agronômico, Campinas, SP (Brasil).

ÖZÇELİK, R., DIAMANTOUPOULOU, M.J., BROOKS, J.R.; WIAN T JR., H.V., 2010. Estimating tree bole volume using artificial neural network models for four species in Turkey. *Journal of Environmental Management* 91, 742-753.

PANSHIN, A. J.; ZEEUW, C. 1980. *Text Book of Wood Technology* volume I. New York:McGraw Hill Book Company.

PENG, C.; WEN, X., 1999. Recent applications of artificial neural networks in forest resource management: an overview. In: AMERICAN ASSOCIATION FOR ARTIFICIAL INTELLIGENCE WORKSHOP. <[http://www.aaai.org/Library/Workshops/1999/ws\\_99-07-003.php](http://www.aaai.org/Library/Workshops/1999/ws_99-07-003.php)>. (accessed 25.08.14).

PIMENTEL-GOMES. 1985. *Curso de estatística experimental*. Piracicaba-SP. ESALQ/USP.

RIEDMILLER, M.; BRAUN, H., 1993. A direct adaptive method for faster backpropagation learning: the RPROP algorithm, In: PROCEEDINGS OF THE IEEE, INTERNATIONAL CONFERENCE ON NEURAL NETWORKS, IEEE. *Anais...* Press, New York, 586-591.

RIBEIRO, F. A.; ZANI FILHO, J. 1993. Variação da densidade básica da madeira em espécies / procedências de *Eucalyptus* spp. *IPEF*. 46, 76-85.

RODRIGUES, L. A.; CARVALHO, D. A.; OLIVEIRA FILHO, A. T.; BOTREL, R. T.; SILVA, E. A. 2003. Florística e estrutura da comunidade arbórea de um fragmento florestal em Luminárias, MG. *Acta Botanica Brasilica*, Porto Alegre, v. 17, p. 71-97.

SILVA, M. L. M. DA; BINOTI, D. H. B.; GLERIANI, J. M.; LEITE, H. G. Ajuste do modelo de *Schumacher e Hall* e aplicação de redes neurais artificiais para estimar volume de árvores de eucalipto. *Revista Árvore*, v.33, p.1133-1139, 2009.

THIERSCH, C.R., SCOLFORO, J.R., DE OLIVEIRA, A.D., REZENDE, G.D.S.P., MAESTRI, R., 2006. O uso de modelos matemáticos na estimativa da densidade básica da madeira em plantios de clones de *Eucalyptus* sp. *Cerne*, 12(3), 264-278.

## CONSIDERAÇÕES FINAIS

A densidade básica é uma das mais importantes características da madeira que afetam o processo produtivo na indústria de base florestal. Sua mensuração normalmente é conduzida nos plantios florestais por amostragem destrutiva de árvores, tarefa trabalhosa e de custo elevado.

Por conta disso, as empresas florestais recorrem normalmente a modelos estatísticos empíricos que, em muitas situações não conseguem explicar a contento a variabilidade na densidade básica da madeira devido à complexidade do problema e a limitação nos modelos utilizados. De fato, sendo a madeira o resultado da combinação da quantidade e da distribuição dos diferentes elementos anatômicos e suas inter-relações com as variáveis do sítio e do plantio, muitas deles expressas por parâmetros qualitativos (não quantitativos) – tipo de solo e sua textura, clima e material genético, por exemplo - estudar as associações destas variáveis com a densidade básica sem a incorporação dessas últimas afasta o modelo do necessário realismo biológico.

Neste trabalho foram estudadas as variações na densidade básica da madeira de uma grande área de plantios florestais de *Eucalyptus* spp. de um empresa florestal com as variáveis do sítio e do plantio. Foram utilizadas duas abordagens distintas e complementares: análise de correlações canônicas – para interpretação, na medida do possível, da influência relativa de cada uma das variáveis intervenientes no problema – e redes neurais artificiais – adequadas para encaminhamento de problemas complexos, onde existe disponibilidade de grande quantidade de dados, para estimativa da densidade básica da madeira.

No Capítulo 1, utilizando a análise de correlações canônicas, foi possível diferenciar os efeitos das variáveis originais – do sítio e do plantio – na densidade básica da madeira, observando-se variáveis com maior e menor associação com a densidade básica da madeira. As variáveis originais associadas a altas densidades básicas da madeira possuíam maiores cargas canônicas e cargas canônicas cruzadas e foram material genético, área vital, temperatura anual média e textura do solo; inversamente, as menores cargas canônicas e cargas canônicas cruzadas foram atribuídas às variáveis originais: produtividade, área basal, rotação e precipitação anual acumulada.

No Capítulo 2, redes neurais artificiais foram geradas para estimar a densidade básica da madeira a partir de dados de inventário florestal pré-corte (IPC), variáveis do sítio e do plantio. Foram geradas estimativas de densidade básica da madeira de forma rápida e eficaz, com raiz quadrada do erro quadrático médio (RMSE) de 1,92% para a densidade básica com casca e de 2,01% para densidade básica sem casca e os coeficientes de correlação obtidos foram da ordem de 93%.

No Capítulo 3, redes neurais artificiais foram geradas para estimar a densidade básica da madeira a partir de dados de inventário florestal contínuo (IFC), variáveis do sítio e do plantio. Foram geradas estimativas de densidade básica da madeira de forma rápida e eficaz, com RMSE de 1,97% para a densidade básica com casca e de 2,06% para densidade básica sem casca e os coeficientes de correlação obtidos foram da ordem de 94%.

Nas duas situações estudadas com redes neurais – com base de dados do IPC e do IFC – os resultados estatísticos foram precisos, com erros muito pequenos e forte associação entre valores observados e estimados. Esta abordagem possibilita estimar a densidade básica de forma rápida e eficiente a partir de bases de dados históricas e aplicar o conhecimento adquirido pela rede a todo um cadastro de informações semelhantes pelo método de generalização.

Considerando-se a equivalência das respostas nas duas situações, o critério utilizado para seleção da base mais adequada foi os custos envolvidos na realização do inventário. O IFC que requer uma menor intensidade amostral na rede de parcelas e, portanto, menores custos, foi o recomendado.

Novos estudos poderão ser conduzidos em regiões distintas, para confirmar os principais resultados aqui obtidos e ampliar o uso de variáveis com alto grau de associação, na busca do treinamento e generalização de redes neurais cada vez mais eficientes na estimativa da densidade básica da madeira. Dessa forma, os dados de densidade básica poderão ser incorporados como importante restrição espacial no planejamento florestal tático das empresas florestais com uso industrial dessa madeira.

## REFERÊNCIAS

- ABRAF – Associação Brasileira de Produtores de Florestas Plantadas. 2013. *Anuário Estatístico da ABRAF: ano base 2012*. Brasília. 148 p.
- ALMEIDA, A.C., LANDSBERG, J.J., SANDS, P.J., AMBROGI, M.S., FONSECA, S., BARDDAI, S.M., BERTOLUCCI, F.L., 2004. Needs and opportunities for using a process-based productivity model as a practical tool in *Eucalyptus* plantations. *Forest Ecology and Management*. 193 (1), 167–177.
- BALIEIRO, F. C.; OLIVEIRA, W. C.; PEREIRA, M. G.; ANJOS, L. H. C., PICCOLO, M. C.; JACCOUD, C. F. 2008. Fertilidade e carbono do solo e uso da água pelo eucalipto numa topossequência em Seropédica, RJ. *Revista Árvore*; 32(1): 153-162.
- BAKER, T. R.; PHILLIPS, O. L.; MALHI, Y.; ALMEIDA, S.; ARROYO, L.; DI FIORE, A.; KILLEEN, T. J.; LAURANCE, S. G.; LAURANCE, W. F.; LEWIS, S. L.; LLOYD, J.; MONTEAGUDO, A.; NEILL, D. A.; PATIÑO, S.; PITMAN, N. C. A.; SILVA, N.; MARTÍNEZ, R. V. 2004. Variation in wood density determines spatial patterns in Amazonian forest biomass. *Global Change Biology*, Oxford, v. 10, n. 5, p. 545- 562.
- BASSA, A. G. M. C.; SILVA JUNIOR; F. G.; SACON, V. M. 2007. Misturas de madeira de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e *Pinus taeda* para produção de celulose kraft através do Processo Lo-Solids. *Scientia Florestalis*, v. 51, n. 75, p. 19 - 29.
- BELINI, U. L., TOMAZELLO FILHO, M., PEREZ CHAGAS, M., TARCÍSIO DA SILVA OLIVEIRA, J. 2008. Alterações na estrutura anatômica da madeira de cavacos de *Eucalyptus grandis* em três condições de desfibramento para a confecção de painéis MDF. *Revista Árvore*, 32(3).
- BERNARD, M., 2003. *Eucalyptus: a strategic species for forests*. Rev. For. Fr. 55 (2), 141–154.
- BERGÈS, L.; NEPVEU, G.; FRANC, A., 2008. Effects of ecological factors on radial growth and wood density components of sessile oak (*Quercus petraea* Liebl.) in Northern France. *Forest Ecology and Management*, Amsterdam, 255 (3/4), 567-579.
- BINOTI, M. L. M. S.; BINOTI, D. H. B.; GLERIANI, J. M.; LEITE, H. G. 2009. Ajuste do modelo de Schumacher e Hall e aplicação de Redes Neurais Artificiais para estimar volume de árvores de Eucalipto. *Revista Árvore*, Viçosa-MG, v.33, n.6, p.1133-1139.
- BINOTI, M. L. M. S., 2010. *Redes neurais artificiais para prognose da produção de povoamentos não desbastados de eucalipto*. 54f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2010.
- BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. DA S.; LEITE, H. G. 2014 (a). Configuração de redes neurais artificiais para estimação do volume de árvores. *Ciência da Madeira*, v.5, n.1, p.58-67.

BINOTI, M. L. M. S., BINOTI, D. H. B., LEITE, H. G., SILVA, A. A. L., PONTES, C. 2014 (b). Utilização de redes neurais artificiais para a projeção da distribuição diamétrica de povoamento equiâneos. *Revista Árvore*, 38(4).

BINKLEY, D., STAPE, J. L., BAUERLE, W. L., RYAN, M. G. 2010. Explaining growth of trees and stands: changes in efficiency of light use through a rotation of *Eucalyptus* at four sites in Brazil. *Forest Ecology and Management*, Amsterdam, v. 259, n. 9, p.1704-1713.

BOWERSOX, T.W. WARD, W.W., 1972. Prediction of oak site index in the ridge and valley region of Pennsylvania. *Forest science*, Washington, 18(3): 192-5

BOURIAUD, O., BRÉDA, N., LE MOGUEDEC, G., NEPVEU, G. 2004. Modelling variability of wood density in beech as affected by ring age, radial growth and climate. *Trees*, 18(3), 264-276.

BRAGA, F.D.A., VALE, F., MUNIZ, J., 1995. Movimentação de nutrientes no solo, crescimento e nutrição mineral do eucalipto, em função de doses de gesso e níveis de irrigação. *Bras. Ci. Solo*, 19, 69-77.

BRAGA, A. DE P.; CARVALHO, A. P. de L. F. DE; LUDEMIR, T. B., 2000. *Redes Neurais Artificiais: teoria e aplicações*. 262p.

CAMPOE, O. C., MUNHOZ, J. S., ALVARES, C. A., CARNEIRO, R. L., DE MATTOS, E. M., FERREZ, A. P. C., STAPE, J. L. 2016. Meteorological seasonality affecting individual tree growth in forest plantations in Brazil. *Forest Ecology and Management*, 380, 149-160.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G., 2013. *Mensuração florestal: Perguntas e respostas*. Universidade Federal de Viçosa, 605p.

CAMPINHOS JR., E., 1999. Sustainable plantations of high-yield *Eucalyptus* trees for production of fiber: the Aracruz case. *New Forest*. 17, 129–143.

CARRERO, O.; STAPE, J. L.; ALLEN, L.; ARREVILLAGA, M.; LADEIRA, M. 2011. Monitoring silvicultural and genetic improvements of *Eucalyptus* plantation using inventory data. In: IUFRO CONFERENCE ON IMPROVEMENT AND CULTURE OF *EUCALYPTUS*, 1., 2011, Porto Seguro. *Proceedings...* Piracicaba: ESALQ. p.167-170.

CASTELLANOS, A., BLANCO, A.M., PALENCIA, V., 2007. Applications of radial basis neural networks for area forest. *International Journal Information Theories and Applications*, v.14, p.218-222.

CASTRO, R.V.O. Modelagem do crescimento em nível de árvores individuais utilizando redes neurais e autômatos celulares. 2011. 80p. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa.

CASTRO, V. R., SURDI, P. G., JUNIOR, C. R. S., TOMAZELLO FILHO, M., CHAIX, G., LACLAU, J. P. 2017. Efeito da aplicação do potássio, do sódio e da

disponibilidade hídrica na densidade aparente a 12% de umidade do lenho juvenil de árvores de *Eucalyptus grandis*. *Ciência Florestal*, 27(3), 1017-1027.

CERALDI, C.; MORMONE, V.; RUSSO ERMOLLI, E. 2001. Resistographic inspection of ancient timber structures for the evaluation of mechanical characteristics. *Materials and structures*, 34(1), 59-64.

COUTO, A. M., TRUGILHO, P. F., NEVES, T. A., PROTÁSIO, T. D. P.; SÁ, V. A. D. 2013. Modeling of basic density of wood from *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus urophylla* using nondestructive methods. *Cerne*, 19(1), 27-34.

CORRÊA NETO, T. A., ANJOS, L. H. C., PEREIRA, M. G., AMORIM, H. B., JACCOUD, C. F. S. 2007. Atributos edafoambientais e parâmetros dendrométricos de plantios de eucalipto em uma topossequência no campus da UFRRJ, Seropédica-RJ. *Ciência Florestal*; 17(1): 43-51.

COSTA, A. C. S., LEAL, C. S., SANTOS, L. C., CARVALHO, A. M. M. L., OLIVEIRA, A. C., PEREIRA, B. L. C. 2017. Propriedades da madeira de cerne e alborno de *Eucalyptus camaldulensis*. *Revista Ciência da Madeira* 8 (1).

DEBELL, D. S., KEYES, C. R., GARTNER, B. L. 2001. Wood density of *Eucalyptus saligna* grown in Hawaiian plantations: effects of silvicultural practices and relation to growth rate. *Australian Forestry*, 64(2), 106-110.

DIAMANTOPOULOU, M. J. 2005. Artificial neural networks as an alternative tool in pine bark volume estimation. *Computers and Electronics in Agriculture*, v. 48, n.3, p. 235-244.

DIAMANTOPOULOU, M. J. 2012. Assessing a reliable modeling approach of features of trees through neural network models for sustainable forests. *Sustainable Computing: Informatics and Systems*, 2(4), 190-197.

DOWNES, G.M.; HUDSON, I.L.; RAYMOND, C.A.; DEAN, G.H.; MICHELL, A.J.; SCHIMLECK, R.; EVANS, R.; MUNERI, A., 1997. Sampling plantation eucalypts for wood and fiber properties. Melbourne: CSIRO. 126p

FERREIRA, J. M. A.; STAPE, J. L. 2009. Productivity gains by fertilization in *Eucalyptus urophylla* clonal plantations across gradients in site and stand conditions. *Southern Forests: a Journal of Forest Science*, Menlo Park, v. 71, n. 4, p. 253-258.

FRITTS, H.C. *Tree Rings and Climate*. London: Academic Press, 1976. 567 p.

GANTZ, C.H. 2002. *Evaluating the efficiency of the Resistograph to estimate genetic parameters for wood density in two softwood and two hardwood species*. 2002. 78p. Dissertação (Mestrado) – North Carolina State University, Raleigh.

GAVA, J. L., GONÇALVES, J. L. D. M. 2008. Soil attributes and wood quality for pulp production in plantations of *Eucalyptus grandis* clone. *Scientia Agricola*, 65(3), 306-313.

GONÇALVES, J.L.M., BARROS, N.F., 1999. Improvement of site productivity for shortrotation plantations in Brazil. *Bosque* 20, 89–106.

GONÇALVES, J. D. M., MELLO, S. D. M., 2000. O sistema radicular das árvores. *Nutrição e fertilização florestal. IPEF, Brazil*, 219-267.

GONÇALVES, J.L.M., STAPE, J.L., LACLAU, J.P., SMETHURST, P., GAVA, J.L., 2004. Silvicultural effects on the productivity and wood quality of eucalypt plantations. *For. Ecol. Manage.* 193, 45–61.

GONÇALVES, J.L.M., STAPE, J.L., LACLAU, J.-P., BOUILLET, J.-P., RANGER, J., 2008. Assessing the effects of early silvicultural management on long-term site productivity of fastgrowing eucalypt plantations: the Brazilian experience. *Southern Forests* 70, 105–118.

GONÇALVES, J. L. M., ALVARES, C. A., HIGA, A. R., SILVA, L. D., ALFENAS, A. C., STAHL, J., ... BOUILLET, J. P. D. 2013. Integrating genetic and silvicultural strategies to minimize abiotic and biotic constraints in Brazilian eucalypt plantations. *Forest Ecology and Management*, 301, 6-27.

GÖRGENS, E. B., LEITE, H. G., GLERIANI, J. M., SOARES, C. P. B., CEOLIN, A. 2014. Influência da arquitetura na estimativa de volume de árvores individuais por meio de redes neurais artificiais. *Revista Árvore*, 38(2).

HAIR JUNIOR, J. F.; ANDERSON, R. E.; TATHAM, R. L.; BLACK, W. C. 2005. *Análise multivariada de dados*. Porto Alegre: Bookman. 593 p.

HAYKIN, S., 2001. *Redes neurais: princípios e prática*. 2. ed. Porto Alegre: Bookman, 900 p.

HAKAMADA, R.E.; LEMOS, C.C.Z. 2010. Evolução da produtividade da IP: Influência de manejo e do melhoramento genético. In: WORKSHOP DE MELHORAMENTO, 6., REUNIÃO TÉCNICO-CIENTÍFICA DO PTSM, 61. Botucatu. *Anais...* Botucatu,

HAKAMADA, R. E. 2012. *Uso do inventário florestal como ferramenta de monitoramento da qualidade silvicultura em povoamentos clonais de Eucalyptus* (Dissertação), Universidade de São Paulo. Piracicaba

HAKAMADA, R. E., STAPE, J. L., LEMOS, C. C. Z. D., EMANUEL, A., ALMEIDA, A., SILVA, L. F. 2015. Uso do inventário florestal e da uniformidade entre árvores como ferramenta de monitoramento da qualidade silvicultural em plantios clonais de eucalipto. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, v. 43, n.105, p. 27-36.

IBÁ - INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. Relatório Anual IBÁ 2017. São Paulo, 2017. 80 p.

JACOBY, G. C. 1989. Overview of tree-ring analysis in tropical regions. *IAWA Bulletin NS*, Utrecht, v. 10, n. 2, p. 99-108.

KAGEYAMA, P. Y.; VENCOSKY, R. 1983. Variação genética em progênes de uma população de *E. grandis*. *IPEF*, Piracicaba, n. 24, p. 9-26.

LANDSBERG, J., SANDS, P. 2011. Physiological ecology of forest production: principles, processes, and models. Amsterdam: *Elsevier Academic Press*, ed. 1, v. 4, 331 p.

LARCHER, W. *Ecofisiologia vegetal*. São Carlos: RIMA, 2000.

LEITE, H. G.; GUIMARÃES, D. P.; CAMPOS, J. C. C. 1995. Descrição e emprego de um modelo para estimar múltiplos volumes de árvores. *Revista Árvore*, v.19, n.1, p.1-21.

LEITE, F.P., BARROS, N.F., NOVAIS, R.F., SANS, L.M.A., FABRES, A.S., 1997. Crescimento de *E. grandis* em diferentes densidades populacionais. *Rev. Árvore* 2, 313–321.

LEITE, H. G.; ANDRADE, V. D., 2002. Um método para condução de inventários florestais sem o uso de equações volumétricas. *Revista Árvore*, 26(3), 321-328.

LEITE, H. G.; BINOTI, D. H. B.; GUIMARÃES, D. P.; SILVA, M. L. M.; GARCIA, S. L. R. 2010. Avaliação do ajuste das funções Weibull e hiperbólica a dados de povoamentos de eucalipto submetidos a desbaste. *Revista Árvore*, v.34, n.2, p.305-311.

LIMA, J. T., SARTORIO, R. C., TRUGILHO, P. F., DA CRUZ, C. R., VIEIRA, R. D. S. 2007. Use of the resistograph for *Eucalyptus* wood basic density and perforation resistance estimative. *Scientia Forestalis*, 35(75), 85-93.

Leles, P.S.S., Reis, G.G., Reis, M.G.F., Morais, E.J., 2001. Crescimento, produção e alocação de matéria seca de *Eucalyptus camaldulensis* e *E. pellita* sob diferentes espaçamentos na região de cerrado, MG. *Sci. For.* 59, 77–87.

LEMOS, C.C.Z., 2012. Improvements, Test and Use of the 3-PG Model in *Eucalyptus* Clonal Plantation In Northeast of Sao Paulo State (Tese). Universidade de São Paulo, Piracicaba, Brasil, p. 171.

LOBÃO MS, LÚCIA RMD, MOREIRA MSS; GOMES A. 2004. Caracterização das propriedades físico-mecânicas da madeira de eucalipto com diferentes densidades. *Revista Árvore*. 28(6): 889-894.

MANLY, B. F. J. 2004. *Multivariate statistical methods: a primer*. 3rd ed. London: Chapman & Hall/CRC. 214 p.

MARCATTI, G. E.; RESENDE, R. T.; RESENDE, M. D. V.; RIBEIRO, C. A. A.; DOS SANTOS, A. R.; DA CRUZ, J. P.; LEITE, H. G. 2017. GIS-based approach applied to optimizing recommendations of *Eucalyptus* genotypes. *Forest Ecology and Management*, v.392, 144- 153.

- MAURI, R., DA SILVA OLIVEIRA, J. T., TOMAZELLO FILHO, M., ROSADO, A. M., PAES, J. B., CALEGARIO, N. 2015. Wood density of clones of *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* in different conditions of growth. *Floresta*, 45(1), 193-202.
- MELLO, J. M., DINIZ, F. S., DE OLIVEIRA, A. D., SCOLFORO, J. R. S., JÚNIOR, F. W. A., THIERSCH, C. R. 2009. Métodos de amostragem e geoestatística para estimativa do número de fustes e volume em plantios de *Eucalyptus grandis*. *Floresta*, v. 39, n. 1.
- McKENZIE, H. M.; SHELBOURNE, C. J. A.; KIMBERLEY, M. O.; McKINLEY, R. B.; BRITTON, R. A. J. 2003. Processing young plantation-grown *Eucalyptus nitens* for solid-wood products: 2., predicting product quality from tree, increment core, disc and 1-m billet properties. *New Zealand Journal of Forestry Science*, Rotorua, v. 33, n. 1, p. 79-113, Feb.
- MOULIN, J. C., ROCHA, M. F. V., ARANTES, M. D. C., BOSCHETTI, W. T. N., DE JESUS, M. S., TRUGILHO, P. F. 2017. Influência do espaçamento de plantio e irrigação na densidade e na massa seca em espécies de *Eucalyptus*. *Nativa*, 5(5), 367-371.
- MUNERI, A.; RAYMOND, C.A. 2000. Genetic parameters and genotype-by-environment interactions for basic density, pilodyn penetration and stem diameter in *Eucalyptus globulus*, *Forest Genetics* 7(4): p. 317-328.
- MYBURG, A.A., GRATTAPAGLIA, D., TUSKAN, G.A., HELLSTEN, U., HAYES, R.D., et al., 2014. The genome of *Eucalyptus grandis*. *Nature* 510, 356–362.
- NASCIMENTO, T. M., MONTEIRO, T. C., Ricardo, P., HEIN, G.... 2015. Efeito do espaçamento na densidade e retratibilidade de *Eucalyptus*. In: II Congresso Brasileiro de Ciência e Tecnologia da Madeira. *Anais...* Belo Horizonte.
- NYLAND, R. D. 2007. *Silviculture: concepts and applications*. 2.ed. Long Grove: Waveland press. 682 p.
- NILSSON, U., ALLEN, H. L. 2003. Short-and long-term effects of site preparation, fertilization and vegetation control on growth and stand development of planted loblolly pine. *Forest Ecology and Management*, 175(1), 367-377.
- OLIVEIRA, G. M. V.; MELLO, J. M. DE; TRUGILHO, P. F.; SCOLFORO, J. R. S.; ALTOÉ, T. F.; SILVA NETO, A. J. DE; OLIVEIRA, A. D. de. 2012. Efeito do ambiente sobre a densidade da madeira em diferentes fitofisionomias do Estado de Minas Gerais. *Cerne*, Lavras, v. 18, n. 2, p. 345-352, abr./jun.
- OLIVEIRA, Y. M. M. et al. 2016. Plantações florestais: geração de benefícios com baixo impacto ambiental. *Embrapa Florestas-Livro científico*.
- OTEGBEYE, G. O., KELLISON, R. C.. 1980. Genetics of wood and bark characteristics of *Eucalyptus viminalis*. *Silvae Genetica*, v. 29, n. 1, p. 27-31.

ÖZÇELİK, R., DIAMANTOULOPOULOU, M. J., BROOKS, J. R.; WIANT Jr., H.V., 2010. Estimating tree bole volume using artificial neural network models for four species in Turkey. *Journal of Environmental Management* 91, 742-753.

PALLET, R., N.; SALE, G. 2004. The relative contributions of tree improvement and cultural practice toward productivity gains in *Eucalyptus* pulpwood stands. *Forest Ecology and Management*, v. 193, n. 1, p. 33-43.

PENG, C.; WEN, X., 1999. Recent applications of artificial neural networks in forest resource management: an overview. In: AMERICAN ASSOCIATION FOR ARTIFICIAL INTELLIGENCE WORKSHOP. Disponível em: <[http://www.aaai.org/Library/Workshops/1999/ws\\_99-07-003.php](http://www.aaai.org/Library/Workshops/1999/ws_99-07-003.php)>. Acesso em: 25.08.14.

QUEIROZ, S. C. S.; GOMIDE, J. L.; COLODETTE, J. L.; OLIVEIRA, R. C. 2004. Influência da densidade básica da madeira na qualidade da polpa kraft de clones híbridos de *Eucalyptus grandis* w. Hill ex Maiden x *Eucalyptus urophylla* s. T. Blake. *Revista Árvore*, Viçosa, v. 28, n. 6, p. 901-909.

RALSTON, C.W., 1964. Evaluation of forest site productivity. In: INTERNATIONAL REVIEW OF FOREST RESEARCH, New York, 1964. Proceedings. New York, Academic Press, v.1, p.171-201.

RALSTON, C.W., 1967. Recognition and mapping of site types for afforestation. In: FAO WORLD SYMPOSIUM ON MAN-MADE FOREST AND THEIR INDUSTRIAL IMPORTANCE, Canberra, 1967. Proceedings. Canberra, v.1, p.172-87.

RAYMOND, C. A.; MACDONALD, A. C. 1998. Where to shoot your pilodyn: within three variation in basic density in plantation *Eucalyptus globulus* and *E. nitens* in Tasmania. *New Forests*, Dordrecht, v. 15, n. 3, p. 205-221.

RATUR, A., KOTHIYAL, V., UNIYAL, K. K., SEMALTY, P. D. 2012. Development and evaluation of models for specific gravity of *Eucalyptus tereticornis* wood by fourier transformed near infrared spectroscopy and partial least squares regression analysis. *Journal of the Indian Academy of Wood Science*, 9(1), 40-45.

REIS, G. G., REIS, M. D. G. F., FONTAN, I. D. C. I., MONTE, M. A., GOMES, A. N., DE OLIVEIRA, C. H. R., 2006. Crescimento de raízes e da parte aérea de clones de híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla* e de *Eucalyptus camaldulensis* x *Eucalyptus* spp submetidos a dois regimes de irrigação no campo. *Revista Árvore*, 30(6), 921-931.

RIBEIRO, F.A.; ZANI FILHO, J., 1993. Variação da densidade básica da madeira em espécies / procedências de *Eucalyptus* spp. *IPEF*. 46, 76-85.

RIBEIRO, M. D. D. S. B., JORGE, L. A. B., MISCHAN, M. M., DOS SANTOS, A. L., BALLARIN, A. W. 2017. Avaliação da produção de biomassa do fuste de um clone híbrido de eucalipto sob diferentes espaçamentos. *Ciência Florestal*, 27(1), 31-45.

RIEDMILLER, M.; BRAUN, H. 1993. A direct adaptive method for faster back propagation learning: the rprop algorithm. *IEEE International Conference on Neural Networks*, v.1, p.586-591.

ROCHA, S. P., PREVEDELLO, J., REINERT, D. J., FLEIG, F. D., VOGELMANN, E. S., SOARES, J. C. W., HEINZ, B. B. 2015. Soil physical properties and *Eucalyptus* growth planted after different tillage methods. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, v. 43, n. 108, p. 965-977, dez.

ROQUE, R., TOMAZELLO FILHO, M. 2009. Variação radial da estrutura anatômica do lenho de árvores de *Gmelina arborea* em diferentes condições de clima e de manejo na Costa Rica. Radial variation of the wood anatomical structure of *Gmelina arborea* trees from different climatic and management conditions in Costa Rica. *Scientia*, 37(83), 273-285.

SANDERCOCK, C. F., SANDS R., RIDOUTT, B. G., WILSON, L. F., HUDSON, I. 1995. Factors determining wood microstructure in *Eucalypts*. In: Potts BM, BORRALHO, N. M. G., REID, J. B., CROMER, R. N., TIBBITS, W. N., RAYMOND, C. A. (EDS) *Eucalypt plantations: improving fibre yield, quality*. CRC-THF Hobart, Australia, pp 128–135

SANDO, T.; MUSSA, R.; SOBANJO, J.; SPAINHOUR, L., 2005. Advantages and disadvantages of different crash modeling techniques. *J. Saf. Res. Traffic Records Forum Proc.* 36, 485–487.

SEGHATOLESLAMI, M. J.; KAFI, M.; MAJIDI, E. 2008. Effect of drought stress at different growth stages on yield and water use efficiency of five proso millet (*Panicum miliaceum* L.) genotypes. *Pakistan Journal of Botany*, Karachi, v. 40, n. 4, p. 1427-1432.

DA SILVA, R. M. L., HAKAMADA, R. E., BAZANI, J. H., OTTO, M. S. G., STAPE, J. L. 2016. Fertilization Response, Light Use, and Growth Efficiency in *Eucalyptus* Plantations across Soil and Climate Gradients in Brazil. *Forests*, 7(6), 117.

SCHOENINGER, E. R.; KOEHLER, H. S.; WATZLAWICK, L. F.; DE OLIVEIRA FILHO, P. C. 2009. Uso de redes neurais artificiais como uma alternativa para mapeamento de biomassa e carbono orgânico no componente arbóreo de florestas naturais. *AMBIÊNCIA*, 4(3), 529-549.

SCOLFORO, H. F., SCOLFORO, J. R. S., STAPE, J. L., MCTAGUE, J. P., BURKHART, H., MCCARTER, J., ... SARTORIO, R. C. 2017. Incorporating rainfall data to better plan eucalyptus clones deployment in eastern Brazil. *Forest Ecology and Management*, 391, 145-153.

SILVA, M. L. M. DA; BINOTI, D. H. B.; GLERIANI, J. M.; LEITE, H. G. 2009. Ajuste do modelo de *Schumacher e Hall* e aplicação de redes neurais artificiais para estimar volume de árvores de eucalipto. *Revista Árvore*, v.33, p.1133-1139,

SOARES, C.P.B.; LEITE, H.G. Predição da produção de madeira de eucalipto em região com alta variabilidade pluviométrica. *Scientia Florestalis*, n.58, p.41-48, 2000.

- STAPE, J. L.; ROCHA, J. C.; DONATTI, Z. 2006 *Indicadores de qualidade silvicultural na Aracruz: 2000 a 2005*. 1.ed. Piracicaba: IPEF, 25p.
- STAPE, J. L., BINKLEY, D., RYAN, M. G., FONSECA, S., LOOS, R. A., TAKAHASHI, E. N., ... LIMA, A. M. 2010. The Brazil Eucalyptus Potential Productivity Project: Influence of water, nutrients and stand uniformity on wood production. *Forest Ecology and Management*, 259(9), 1684-1694.
- THIERSCH, C. R., SCOLFORO, J. R., DE OLIVEIRA, A. D., REZENDE, G. D. S. P., MAESTRI, R., 2006. O uso de modelos matemáticos na estimativa da densidade básica da madeira em plantios de clones de *Eucalyptus* sp. *Cerne*, 12(3), 264-278.
- TOMAZELLO FILHO, M. 2006. *Efeito da irrigação e fertilização nas propriedades do lenhoff de árvores de Eucalyptus grandis x urophylla*. 2006. 146 f, (Tese) Universidade de São Paulo. Piracicaba.
- TRUGILHO, P. F.; LIMA, J. T.; MORI, F. A. 2003. Correlação canônica das características químicas e físicas da madeira de clones de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*. *Cerne*, Lavras, v. 9, n. 1, p. 66-80.
- VELLASCO, M. M. B. R. Redes Neurais Artificiais. 2007. Pontifica Universidade Católica do Rio de Janeiro. Disponível em: <http://www2.ica.ele.puc-rio.br/Downloads/33/ICA-introdu%C3%A7%C3%A3o%20RNs.pdf> . Acesso em: 23 de abril de 2017.
- WU, S. J.; XU, J. M.; Li, G. Y.; RISTO, V.; LU, Z. H.; LI, B. Q.; WANG, W. 2010. Use of the pilodyn for assessing wood properties in standing trees of *Eucalyptus* clones. *Journal of Forestry Research*, 21(1), p. 68-72.
- YURTSEVEN, I., ZENGİN, M., 2013. Neural network modelling of rainfall interception in four different forest stands. *Annals of Forest Research* 56(2): 351-362.