

UNIVERSIDADE ESTADUAL DO SUDOESTE DA BAHIA  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**USO DE REDES NEURAS ARTIFICIAIS DE MÚLTIPLAS CAMADAS  
PARA CLASSIFICAÇÃO DE SÍTIOS FLORESTAIS**

**MARCOS VINICIUS SANTANA LEITE**

VITÓRIA DA CONQUISTA  
BAHIA - BRASIL  
JULHO - 2016

**MARCOS VINICIUS SANTANA LEITE**

**USO DE REDES NEURAS ARTIFICIAIS DE MÚLTIPLAS CAMADAS  
PARA CLASSIFICAÇÃO DE SÍTIOS FLORESTAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, para a obtenção do título de Mestre.

**Orientador: Prof. Dr. Christian Dias Cabacinha (UFMG)**

VITÓRIA DA CONQUISTA

BAHIA - BRASIL

JULHO - 2016

**MARCOS VINICIUS SANTANA LEITE**

**USO DE REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS DE MÚLTIPLAS CAMADAS  
PARA CLASSIFICAÇÃO DE SÍTIOS FLORESTAIS**

Dissertação apresentada à Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, para a obtenção do título de Mestre.

Aprovada em 28 de julho de 2016.

Comissão Examinadora:

---

Prof.<sup>a</sup> Patrícia Anjos Bittencourt Barreto-Garcia (D.Sc., Produção Vegetal) – UESB

---

Prof. Alessandro de Paula (D.Sc., Ecologia e Recursos Naturais) – UESB

---

Prof.<sup>a</sup> Adriana Leandra de Assis (D.Sc., Florestas de Produção) – UFMG

Coorientadora

---

Prof. Christian Dias Cabacinha (D.Sc., Ciências Ambientais) – UFMG

Orientador

*Aos meus pais, Neuza Santana e Altamiro Leite  
Às minhas irmãs, Sarah e Mayra*

*Dedico.*

*“Pouco conhecimento faz com que as pessoas se sintam orgulhosas. Muito conhecimento, que se sintam humildes. É assim que as espigas sem grãos erguem desdenhosamente a cabeça para o Céu, enquanto que as cheias as baixam para a terra, sua mãe.”*

*Leonardo da Vinci*

## **AGRADECIMENTOS**

Agradeço primeiramente a Deus, pelo dom da vida e por gozar de plena saúde para desfrutar das minhas conquistas e almejar ainda mais vitórias.

Agradeço aos meus pais, Neuza e Altamiro, pelo apoio às minhas decisões e por sempre acreditarem nos meus objetivos. Sem vocês nada disso seria possível.

Às minhas irmãs, Sarah e Mayra, por compartilharem dos meus ideais e acompanharem a minha luta e crescimento, sempre me apoiando.

À Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, pela oportunidade de cursar o mestrado e a aquisição do título de Mestre em Ciências Florestais.

Ao Professor Dr. Christian Dias Cabacinha, pelos anos de orientação e trabalho conjunto, apoio, ensinamento, amizade e por confiar em mim e no meu trabalho.

À Professora Dr.<sup>a</sup> Adriana Leandra de Assis pela coorientação ao longo dos anos, apoio e confiança no meu trabalho. Sem vocês nada disso seria possível.

Também aos membros da banca, Professora Dr.<sup>a</sup> Patrícia Anjos Bittencourt Barreto-Garcia e o Prof. Dr. Alessandro de Paula, que além de contribuírem no aperfeiçoamento deste trabalho, compartilharam dos seus conhecimentos ao longo da minha formação com as disciplinas cursadas.

À Empresa que disponibilizou os dados que permitiram a realização deste estudo e pela disponibilidade em contribuir da maneira que lhes foi possível.

À Fundação de Amparo ao Pesquisador do Estado da Bahia – FAPESB, pela concessão de bolsa de estudos.

À Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais – FAPEMIG, pelo financiamento do projeto.

Aos demais professores que ministraram disciplinas que tive oportunidade de cursar, contribuindo para a minha formação.

Aos meus amigos e colegas do curso, que me proporcionaram momentos de companheirismo, felicidade e aprendizado, em especial, Saad Miranda e Danúzia Fernandes, que me acompanharam desde o início.

Aos meus familiares e amigos, que mesmo de longe sempre torceram pelo meu sucesso e acompanharam toda esta caminhada.

Muito obrigado!

## BIOGRAFIA DO AUTOR

Marcos Vinicius Santana Leite, nascido em 22 de fevereiro de 1991, no município de Montes Claros, estado de Minas Gerais. Filho de Altamiro Leite de Souza e Neuza Antunes Santana Leite. Neto dos avós paternos Geraldo Soares de Souza e Geni Soares Leite e dos avós maternos Onofre Francisco Santana e Helena Antunes de Oliveira. Formou-se no colégio Unimax, na mesma cidade. Em 2009, ingressou no curso de Engenharia Florestal do Instituto de Ciências Agrárias da Universidade Federal de Minas Gerais (ICA/UFMG), *campus* Montes Claros. Mudou-se temporariamente para as cidades de Pirapora e Turmalina, no mesmo estado, onde estagiou por 7 meses na empresa TTG Brasil Investimentos Florestais LTDA.

Finalizou o curso de graduação em 2014 e imediatamente ingressou no Mestrado em Ciências Florestais, na Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, mudando-se para a cidade de Vitória da Conquista - BA. Em 2016 iniciou o curso de especialização MBA em Gestão Florestal pela Universidade Federal do Paraná.

## SUMÁRIO

<b>1. INTRODUÇÃO GERAL.....</b>	<b>1</b>
<b>2. REVISÃO DE LITERATURA.....</b>	<b>4</b>
<b>2.1. Sítios Florestais.....</b>	<b>4</b>
<b>2.1.1. Qualidade do Sítio .....</b>	<b>4</b>
<b>2.1.2. Índices de Sítio .....</b>	<b>6</b>
<b>2.1.2.1. Fonte de dados para curvas de sítio.....</b>	<b>6</b>
<b>2.1.2.2. Tipos de curvas de sítios .....</b>	<b>8</b>
<b>2.1.2.3. Métodos para construção dos Índices de sítio .....</b>	<b>9</b>
<b>2.1.2.3.1. Método da Curva Guia .....</b>	<b>9</b>
<b>2.1.2.3.2. Método da Diferença algébrica .....</b>	<b>10</b>
<b>2.1.2.3.3. Predição de Parâmetros.....</b>	<b>10</b>
<b>2.1.2.3.4. Método de Hammer.....</b>	<b>11</b>
<b>2.1.2.3.5. Método da atribuição preliminar de índices de local .....</b>	<b>11</b>
<b>2.1.3. Aplicações da Classificação de Sítios Florestais.....</b>	<b>12</b>
<b>2.2. Redes Neurais Artificiais (RNA).....</b>	<b>16</b>
<b>2.2.1. Redes neurais de múltiplas camadas (Multilayer Perceptron ou MLP)....</b>	<b>18</b>
<b>2.2.2. Aplicações de RNA na Engenharia Florestal .....</b>	<b>20</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>23</b>

### Capítulo 1:

<b>CLASSIFICAÇÃO DA CAPACIDADE PRODUTIVA DE EUCALIPTO UTILIZANDO CURVAS DE SÍTIO ANAMÓRFICAS E POLIMÓRFICAS PELO MÉTODO DA DIFERENÇA ALGÉBRICA .....</b>	<b>35</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>37</b>
<b>2. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>39</b>
<b>2.1. Caracterização dos dados .....</b>	<b>39</b>
<b>2.2. Teste de Anamorfismo.....</b>	<b>40</b>
<b>2.3. Geração das curvas de sítio pelo método da diferença algébrica .....</b>	<b>41</b>
<b>2.4. Estabilidade das curvas índice de sítio .....</b>	<b>43</b>
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>44</b>
<b>4. CONCLUSÃO .....</b>	<b>56</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>57</b>

## Capítulo 2:

<b>REDES NEURAIS ARTIFICIAIS PARA CLASSIFICAÇÃO DA CAPACIDADE PRODUTIVA DE FLORESTAS DE EUCALIPTO.....</b>	<b>61</b>
<b>1. INTRODUÇÃO .....</b>	<b>63</b>
<b>2. MATERIAL E MÉTODOS .....</b>	<b>66</b>
<b>2.1. Caracterização dos dados .....</b>	<b>66</b>
<b>2.2. Método para classificação da capacidade produtiva.....</b>	<b>67</b>
<b>2.3. Modelagem de curvas de sítio.....</b>	<b>67</b>
<b>2.3.1. Método Tradicional (Regressão não linear) .....</b>	<b>67</b>
<b>2.3.2. Redes Neurais Artificiais (RNA).....</b>	<b>68</b>
<b>2.4. Análise estatística .....</b>	<b>72</b>
<b>2.5. Estabilidade das curvas índice de sítio.....</b>	<b>72</b>
<b>3. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....</b>	<b>74</b>
<b>4. CONCLUSÃO .....</b>	<b>95</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>96</b>
<b>5. CONCLUSÕES GERAIS .....</b>	<b>100</b>

## RESUMO

LEITE, Marcos Vinicius Santana, M.Sc., Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, julho de 2016. **Uso de Redes Neurais Artificiais de Múltiplas Camadas para Classificação de Sítios Florestais.** Orientador: Christian Dias Cabacinha. Coorientadora: Adriana Leandra de Assis.

O objetivo geral deste trabalho foi identificar e testar o desempenho de modelos de Redes Neurais Artificiais (RNA), com o objetivo de estimar a altura dominante de árvores de Eucalipto, em diferentes idades, e aplicá-las na classificação de sítios florestais utilizando o método da curva guia como uma alternativa aos modelos de regressão não linear e comparar com a classificação tradicional de sítios pelo método da diferença algébrica. Os dados dendrométricos utilizados neste estudo totalizaram 28.150 registros provenientes de 8.819 parcelas permanentes oriundas de povoamentos clonais de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, de primeira rotação, localizados no extremo Sul da Bahia, em primeira rotação, com idades variando de 0,80 até 12,70 anos. Foram testados cinco modelos de regressão não linear, sendo eles: Chapman e Richards, Gompertz, Logístico, Weibull e Monomolecular, para gerar curvas de sítio pelo método da diferença algébrica, com curvas do tipo anamórficas e polimórficas e pelo método da curva guia. Foram treinadas Redes Neurais Artificiais de múltiplas camadas de dois tipos: *Cascade Forward Back propagation Network (CFBP)* e *Feed Forward Back Propagation Network (FFBP)*. RNA foram treinadas com as mesmas variáveis utilizadas nos modelos de regressão não linear. Outras 12 diferentes RNA dos tipos foram treinadas, com adição de mais variáveis de entrada, que são características do povoamento, dentre elas, variáveis dendrométricas: área basal e diâmetro médio quadrático, combinadas com a idade das parcelas, além de dados categóricos de solo e precipitação. Foi realizado o teste de anamorfismo para confirmar o padrão de crescimento da floresta a partir da análise de regressão linear entre o índice de sítio (IS) estimado, para confirmar que o IS não depende da idade, mas sim da capacidade produtiva do local. Os dados em estudo apresentam um padrão de crescimento polimórfico. Os modelos de regressão testados são capazes de classificar a capacidade produtiva do local de forma satisfatória, a partir de famílias de curvas dos dois tipos, exceto o modelo Logístico na sua formulação polimórfica,

que não se ajustou bem aos dados. O modelo de Chapman e Richards foi o selecionado pelo método da diferença algébrica, pois apresentou uma superioridade em relação aos demais, no que se refere às estatísticas de precisão e na estabilidade das parcelas, principalmente para uma família de curvas anamórficas. Embora os dados apresentem um padrão de crescimento polimórfico, o conjunto de curvas anamórficas geradas pelos modelos conseguiu produzir uma classificação de sítios florestais mais estável do que as curvas polimórficas. Pelo método da curva guia, o modelo Monomolecular se apresentou superior aos demais para as estatísticas de precisão, assim como na estabilidade das parcelas dentro das curvas de sítios geradas. As redes do tipo CFBP apresentaram uma leve superioridade em relação às redes do tipo FFBP, tanto para a estimativa de alturas dominantes como na estabilidade das curvas de sítio. As RNA treinadas com as mesmas variáveis utilizadas pelos modelos de regressão não linear apresentaram resultados semelhantes ao modelo de regressão não linear selecionado para a precisão estatística e estabilidade das parcelas, trazendo apenas um ganho de 105 parcelas estáveis com a aplicação de RNA do tipo CFBP. A aplicação de alturas dominantes estimadas pelas RNA que tiveram a adição de variáveis do povoamento durante o seu treinamento para a classificação de sítio pelo método da curva guia, melhorou a estabilidade em relação ao modelo de regressão selecionado, em 1.156 parcelas estáveis, o que corresponde a 13,4% do total. Isso mostra que a aplicação da técnica proposta neste trabalho proporcionou uma melhoria para a classificação de sítios e pode gerar benefícios para os manejadores florestais.

**Palavras-chave:** classificação de sítios, altura dominante, inteligência artificial, estabilidade.

## ABSTRACT

LEITE, Marcos Vinicius Santana, M.Sc., Universidade Estadual do Sudoeste da Bahia, julho de 2016. **Using Artificial Neural Networks Multilayer for Forest Sites Rating**. Adviser: Christian Dias Cabacinha. Co-Adviser: Adriana Leandra de Assis.

The general purpose of this study was to identify and test the performance models of Artificial Neural Networks (ANN) in order to estimate the dominant height of Eucalyptus trees at different ages, and apply them in forest sites classification using the method of guide curve, as an alternative to non-linear regression models and compare with the traditional sites classification by the method of the algebraic difference. The dendrometric data used in this study amounted to 28150 records from 8819 permanent plots derived from clonal stands of *Eucalyptus urophylla* and *Eucalyptus grandis*, in the first rotation, located in the extreme south of Bahia in the first rotation, with ages ranging from 0.80 to 12.70 years. Five non-linear regression models were tested, being them: Chapman and Richards, Gompertz, Logistic, Weibull and Monomolecular, site to generate curves by the method of algebraic difference with curves anamorphic and polymorphic type and the method of the guide curve. Were trained artificial neural networks of multiple layers of two types: Cascade Forward Back Propagation Network (CFBP) and Feed Forward Back Propagation Network (FFBP). ANN was trained with the same variables used in nonlinear regression. Other 12 different ANN types were treinandas, with the addition of more input variables that are stand characteristics, among them dendrometric variables: basal area and quadratic mean diameter, combined with the age of the plots, and categorical data of soil and rainfall. Anamorfismo the test was performed to confirm the pattern of forest growth from linear regression analysis between the site index (IS) estimated to confirm that the IS does not depend on age, but the production of local capacity. The data in the study show a pattern of polymorphic growth. The tested regression models are able to classify the productive capacity of the site satisfactorily, from families of curves of the two types, except the Logistic model in its polymorphic formulation that did not fit the data well. The model of Chapman and Richards was selected by the method of algebraic difference, it presented a superiority over the other for precision statistics and stability of the plots, especially for a family of anamorphic curves. Although the data show a polymorphic pattern of

growth, the set of curves generated by the anamorphic models can perform classification of forest sites higher polymorphic form curves. By the method of the guide curve, the Monomolecular model performed better than the others for the accuracy of statistics as well as the stability of the plots within the sites generated curves. The type Networks of CFBP showed a slight superiority over the networks of the type FFBP both estimated dominant heights as the stability of the site curves. The ANN trained with the same variables used by nonlinear regression models showed substantially similar results by non-linear regression model selected for statistical accuracy and stability of the parcels, bringing only a gain of 105 stable portions with application the ANN type CFBP. The application of dominant heights estimated by ANN that had adding stand variables during its training, to classify site by the guide curve method improved stability relative to the regression model selected in 1156 stable portions, corresponding to 13.4% of the total. This shows that the application of the proposed technique in this work provided an improvement to the classification of sites and can generate benefits for forest managers.

**Keywords:** classification of sites, dominant height, artificial intelligence, stability.

## LISTA DE FIGURAS

**Figura 1** – Exemplo de arquitetura de uma rede *perceptron* multicamadas (MLP) com duas camadas intermediárias.....20

### CAPÍTULO 1:

**Figura 1** – Gráfico de dispersão dos resíduos, em porcentagem, para os seguintes modelos e suas formulações algébricas: Chapman e Richards anamórficas (a) e polimórficas (b); Gompertz anamórficas (c) e polimórficas (d); Weibull anamórficas (e) e polimórficas (f), Monomolecular anamórficas (g) e polimórficas (h); Logístico anamórficas (i) e polimórficas (j); com o erro em porcentagem (y) em função da idade (x).....48

**Figura 2** – Curvas de sítios geradas pelo método da diferença algébrica para os modelos de Chapman e Richards com curvas anamórficas (a) e polimórficas (b); Gompertz com curvas anamórficas (c) e polimórficas (d); Weibull com curvas anamórficas (e) e polimórficas (f), Monomolecular com curvas anamórficas (g) e polimórficas (h), Logístico com curvas anamórficas (i); tendo a altura dominante (y) em função da idade (x).....49

### CAPÍTULO 2:

**Figura 1** – Exemplo de uma RNA de múltiplas camadas do tipo *Feed-Forward Back Propagation Network* (FFBP) com 3 camadas, como a utilizada neste estudo.....68

**Figura 2** – Exemplo de uma RNA de múltiplas camadas do tipo *Cascade Forward Back Propagation Network* (CFBP) com 3 camadas, como a utilizada neste estudo.....69

**Figura 3** – Gráfico de dispersão dos resíduos, em porcentagem, para os modelos de Chapman e Richards (a); Gompertz (b); Logístico (c); Weibull (d); Monomolecular (e), com os erros em porcentagem (x) em função da idade (y).....75

**Figura 4** – Curvas de sítios geradas pelo método da curva guia para os modelos de Chapman e Richards (a); Gompertz (b); Logístico (c); Weibull (d); Monomolecular (e), com as alturas dominantes observadas (x) em função da idade (y).....76

**Figura 5** – Gráfico de dispersão dos resíduos, em porcentagem, para as RNA do tipo FFBP (a) e CFBP (b) utilizando as mesmas variáveis dos modelos de regressão não linear testados, com o erro em porcentagem (x) em função da idade (y).....79

**Figura 6** – Curvas de sítio geradas com as alturas dominantes estimadas pelas RNA do tipo FFBP e CFBP, pelo método da curva guia, utilizando as mesmas variáveis dos modelos de regressão não linear testados, com as alturas dominantes observadas (x) em função da idade (y).....80

**Figura 7** – Dispersão dos resíduos, em porcentagem, em função da idade para as diferentes RNA do tipo *Feed Forward Back Propagation Network* (FFBP) treinadas para estimar altura dominante, com o erro em porcentagem (x) em função da idade (y).....84

**Figura 8** – Dispersão dos resíduos, em porcentagem, em função da idade, para as diferentes RNA do tipo *Cascade Forward Back propagation Network* (CFBP) treinadas para estimar altura dominante, com o erro em porcentagem (x) em função da idade (y).....86

**Figura 9** – Curvas de sítio geradas com as alturas dominantes estimadas pelas diferentes RNA do tipo *Feed Forward Back Propagation Network* (FFBP) pelo método da curva guia, com as alturas dominantes observadas (x) em função da idade (y).....88

**Figura 10** – Curvas de sítio geradas com as alturas dominantes estimadas pelas diferentes RNA do tipo *Cascade Forward Back propagation Network* (CFBP) pelo método da curva guia, com as alturas dominantes observadas (x) em função da idade (y).....89

## LISTA DE TABELAS

### CAPÍTULO 1:

**Tabela 1** – Valores mínimo, médios, máximos e o desvio padrão da Idade (anos), Área Basal ( $m^2/ha$ ), Diâmetro médio quadrático (cm), Precipitação (mm). Altura Dominante (m) dos dados do estudo.....39

**Tabela 2** – Modelos não lineares testados para estimativa da altura de árvores dominantes na sua formulação original.....41

**Tabela 3** – Modelos testados para gerar curvas de índice de sítios com a modificação algébrica para obtenção de curvas anamórficas e polimórficas.....42

**Tabela 4** – Resultados dos ajustes dos modelos lineares para índice de sítio (IS) e altura dominante (Hdom) do teste de anamorfismo.....44

**Tabela 5** – Estatísticas de exatidão dos diferentes modelos utilizados para estimativa da altura de árvores dominantes (Hdom) na sua forma original.....46

**Tabela 6** – Coeficientes ajustados e Estatísticas de exatidão dos diferentes modelos utilizados para estimativa da altura de árvores dominantes (Hdom) com a modificação algébrica para gerar curvas anamórficas e polimórficas.....47

**Tabela 7** – Teste de estabilidade para os diferentes modelos com as suas modificações algébricas, testados para a classificação de sítios florestais a partir de curvas anamórficas e polimórficas.....52

### CAPÍTULO 2:

**Tabela 1** – Valores mínimo, médios, máximos e o desvio padrão da Idade (anos), Área Basal ( $m^2/ha$ ), Diâmetro médio quadrático (cm), Precipitação (mm) e Altura Dominante (m) dos dados em estudo.....66

**Tabela 2** – Modelos não lineares testados para estimativa da altura de árvores dominantes na sua formulação original.....67

**Tabela 3** – Arquitetura e variáveis de entrada das RNA treinadas para estimar altura dominante (Hdom).....70

**Tabela 4** – Estatísticas de exatidão dos diferentes métodos utilizados para a estimativa da altura de árvores dominantes (Hdom).....74

**Tabela 5** – Estabilidade para os diferentes modelos testados para a classificação de sítios florestais.....77

**Tabela 6** – Estatísticas de exatidão e estabilidade para as diferentes RNA treinadas com variáveis semelhantes aos modelos de regressão não linear para estimativa da altura de árvores dominantes (Hdom).....78

**Tabela 7** – Arquitetura, variáveis de entrada e estatísticas de exatidão para as diferentes RNA treinadas para estimativa da altura de árvores dominantes (Hdom).....81

**Tabela 8** – Estabilidade das curvas de sítios geradas pelo método da curva guia a partir das estimativas de altura dominantes realizadas com RNA treinadas dos dois tipos.....92

## 1. INTRODUÇÃO GERAL

Embora evidenciem uma aparente homogeneidade, povoamentos florestais clonados geralmente apresentam variações significativas entre talhões e até mesmo dentro deles. Essas variações ocorrem por atuação de diversos fatores, dentre eles: tipo de solo, fertilidade, topografia, precipitação, variações na prática silvicultural e outros. Conhecer estas variações é um fator importante para o inventário e para o manejo florestal (MELLO et al., 2005).

Na ciência florestal é comum aplicar o termo “Sítio” para designar a influência do ambiente sobre a produção florestal (BATISTA & COUTO, 1986). Scolforo (2006) o definiu, para fim de manejo, como sendo o conjunto de fatores ecológicos (climáticos, edáficos e biológicos) que influem no desenvolvimento de povoamentos num determinado local.

O mapeamento de florestas, em termos de capacidade de produção, deve ser realizado de forma precisa, pois subsidia a tomada de decisão a respeito da definição de técnicas de manejo mais apropriadas, considerando os aspectos de sustentabilidade da produção e maximização da rentabilidade da atividade florestal, permitindo um planejamento a médio e longo prazo, além de uma melhor alocação dos recursos.

Essas informações são normalmente expressas em termos de curvas de índice de sítio, as quais se originam de meios tradicionais de classificação dos sítios florestais (SCHNEIDER & SCHNEIDER, 2008). Tais informações são principalmente utilizadas em qualquer sistema de predição da produção madeireira, contribuindo para a programação da colheita florestal, estimativas do rendimento e do período de rotação do povoamento, diagnóstico e prescrição do manejo do solo e apoio na escolha de espécies adequadas. Trata-se, portanto, de um recurso básico quando o objetivo é aplicar um sistema integrado de manejo visando à racionalização e otimização do uso dos recursos florestais (SILVA et al., 2013).

Devido a uma maior preocupação com o gerenciamento florestal nos últimos anos, pesquisas estão sendo direcionadas para o estudo de metodologias que estimem a produtividade das florestas de forma eficiente e com grau de exatidão satisfatório. Assim, novas ferramentas têm sido introduzidas na área florestal com

este intuito, dentre elas, destaca-se os modelos de Redes Neurais Artificiais - RNA (GÖRGENS et al., 2009; LEITE et al., 2011a).

As RNA são unidades de processamentos simples, conectadas entre si com a finalidade de executar uma tarefa específica. O funcionamento das RNA assemelha-se aos neurônios do cérebro humano, sendo capazes de adquirir e armazenar conhecimento a partir do ambiente no qual estão inseridas, através de um processo de aprendizagem (HAYKIN, 2001; BRAGA et al., 2007). Possuem a capacidade de modelar diversas variáveis, inclusive, qualitativas, e suas relações não lineares toleram falhas e ruídos, conseguem lidar com informações imprecisas e distorcidas, além da sua capacidade de generalização (BASHEER & HAJMEER, 2000).

Özçelik et al. (2010) destacaram que as RNA têm recebido uma atenção especial nas últimas décadas devido a esta metodologia ser passível de comparação com a modelagem estatística. Podem ser utilizadas como esforço complementar ou uma abordagem alternativa para a estimativa de dados complexos.

As RNA têm sido aplicadas com sucesso em diferentes áreas da Engenharia Florestal, apresentando resultados equivalentes ou superiores aos modelos usuais de regressão. Cosenza et al. (2015) utilizaram a técnica juntamente com a Máquina de Vetor de Suporte (MVS), como classificador da capacidade produtiva de povoamentos florestais. Alguns estudos também já foram realizados na estimativa de altura total de árvores a partir de RNA (XIAO et al., 1998; DIAMANTOPOULOU, 2012; BINOTI et al., 2013; ÖZÇELİK et al. 2013). Entretanto, a estimativa de árvores dominantes e a utilização das mesmas para a classificação de sítios florestais por meio do método da curva guia não foram realizadas.

Com isso, a estimativa da altura de árvores dominantes, a partir de RNA, pode ser uma alternativa eficaz e trazer ganhos de precisão na classificação da capacidade produtiva de florestas, se comparada aos métodos tradicionalmente utilizados, levando em consideração a capacidade desta técnica para a inclusão de variáveis ambientais e dendrométricas que expressem a densidade e produção dos povoamentos.

Neste sentido, o presente trabalho teve como objetivo testar o desempenho e selecionar um modelo de Rede Neural Artificial (RNA) que possa ser utilizado para estimar a altura média das árvores dominantes de Eucalipto, em diferentes idades, e aplicá-la na classificação de sítios florestais utilizando o método da curva guia, como

uma alternativa aos modelos de regressão não linear, além de comparar esse método com a classificação tradicional de sítios, pelo método da diferença algébrica, verificando se houve ganho de precisão e estabilidade.

Além disso, a inclusão de variáveis dendrométricas e ambientais (área basal, diâmetro médio quadrático, características de solo e precipitação) foi realizada durante o treinamento das RNA, na intenção de obter maior precisão nestas estimativas.

No desenvolvimento dessa dissertação, além da revisão bibliográfica de temas importantes sobre a classificação de sítios, foram elaborados dois capítulos: 1) Classificação da capacidade produtiva de eucalipto utilizando curvas de sítio anamórficas e polimórficas pelo método da diferença algébrica e 2) Redes Neurais Artificiais para classificação da capacidade produtiva de florestas de Eucalipto.

## **2. REVISÃO DE LITERATURA**

### **2.1. Sítios Florestais**

#### **2.1.1. Qualidade do Sítio**

A determinação da produtividade das áreas florestais é fator básico na condução de povoamentos e no planejamento da produção madeireira de uma empresa florestal (SELLE et al., 1994). Schneider e Schneider (2008) destacaram que a maioria das decisões dentro do manejo florestal ocorrem através da avaliação da capacidade produtiva de áreas florestais, que são ordenadas de acordo com a produtividade apresentada pelos chamados sítios florestais.

Com isso, desde o século XIX começaram a aparecer os primeiros conceitos de sítio, que foram desenvolvidos e aplicados na Alemanha. De acordo com Cajander (1926), citado por Jhones (1969), Huber utilizou o termo “índice de sítio” na Alemanha já no ano de 1824, e rapidamente o seu uso se espalhou para a Escandinávia (JONSON, 1914) e Estados Unidos (STERRETT, 1914), de modo que este conceito foi discutido em uma série de artigos do início do século XX (PARKER, 1916; ROTH, 1916, 1918; SPRING, 1917; WATSON, 1917; BATES, 1918; FROTHINGHAM, 1918).

Selle et al. (1994) citaram que, de acordo com Parviainen e Naumann (1986), o botânico, Engenheiro Florestal e político finlandês, Cajander, criou a teoria dos tipos florestais, na qual um sítio era classificado de acordo com a percentagem existente de cada espécie na vegetação ao nível do solo.

Jhones (1969) destacou em seu estudo, a real necessidade da utilização de dados do ambiente, da vegetação local, ou de ambos, para avaliar a produtividade de florestas, como foi observado nos trabalhos desenvolvidos por Kabzems (1951); Daubenmire (1952 e 1961); Shepherd (1959); Arnborg (1960); Van Arsdel (1961); Dietrichson (1964); Callaham (1965); Silen (1965); e Benson et al. (1967), principalmente no Canadá e Europa.

O autor ressaltou ainda que mesmo que estes métodos diretos possam gerar boas curvas de índice de local, eles possuem algumas limitações e são relativamente arbitrários.

Por outro lado, Selle et al. (1994) relataram que diversos autores, na mesma época, por exemplo, Spurr (1952); Vidal (1969); Schönau (1969); Burkhart e Tennent (1977); Fishwick (1977); Schneider e Silva (1980); e Van Laar (1981), já afirmavam que a altura das árvores dominantes é a melhor variável para ser utilizada na classificação de sítios florestais.

Portanto, na ciência florestal, o índice de sítio passou a ser o método mais praticado e difundido na determinação de classes de produtividade, através do uso da variável altura dominante, relacionada com a idade, pois este se apresenta como uma resposta a todos os fatores ambientais inter-relacionados, tendo correlação com a produção volumétrica, sem sofrer influência significativa, quando comparado a outras variáveis da árvore, dos tratamentos silviculturais e da competição entre espécies (TONINI et al., 2001).

Os sítios florestais podem ser vistos com duas diferentes abordagens, como destacou Scolforo (1993). Do ponto de vista ecológico, é caracterizado como uma região homogênea, determinada pela combinação entre fatores ambientais que influenciam no crescimento das árvores. No ponto de vista produtivo, é definido como a capacidade que o local apresenta para produzir madeira.

A classificação de uma floresta em relação à sua produtividade está relacionada às diferentes respostas de crescimento das espécies, que influem diretamente sobre a viabilidade de empreendimentos florestais (TONINI et al., 2002; LEITE et al., 2011b; CAMPOS & LEITE, 2013). Isso implica que sítios considerados bons para o desenvolvimento de uma determinada espécie florestal podem não apresentar essa mesma qualidade para outra espécie qualquer, o que aumenta a sua importância para os manejadores florestais (CLUTTER et al., 1983; CAMPOS & LEITE, 2013).

Desta forma, conhecer a área florestal em relação à sua produtividade é de grande importância, visto que permite estratificar o povoamento em áreas equiprodutivas, facilitando o regime de manejo, torna possível conhecer a dimensão dos produtos advindos da floresta, auxilia no planejamento da colheita e estudos de crescimento e produção, além de servir de referência como diagnóstico e determinação do manejo e conservação do solo, fundamentais para o planejamento de longo e médio prazos de empreendimentos florestais (SCOLFORO, 1993; DAVID, 2014).

### **2.1.2. Índices de Sítio**

Campos e Leite (2013) afirmaram que as curvas de índice de local constituem-se, atualmente, no método mais prático e difundido para classificar a produtividade florestal.

Scolforo (1993) dividiu os métodos para a determinação da qualidade de sítio em: diretos e indiretos. A classificação indireta é realizada por atributos relacionados ao solo, clima e vegetação; já a classificação direta baseia-se no registro histórico do uso da terra, do volume e área basal do povoamento e do acompanhamento do crescimento.

Contudo, ao longo dos anos, vários métodos de classificação foram discutidos, mas a altura dominante correlacionada com a idade tem sido considerado o método mais prático e usual (SELLE et al., 2008).

Tonini et al. (2001) destacaram que a relação entre essas variáveis é possível graças às técnicas matemáticas de análise de regressão, que visam caracterizar o desenvolvimento das árvores ao longo do tempo. O ajuste das alturas em função da idade é expresso por um grande número de modelos matemáticos, lineares e não lineares, bastante consagrados na ciência florestal, que permitem gerar curvas de crescimento.

Selle et al. (1994) relataram que as árvores apresentam taxas de crescimento diferenciadas ao longo do tempo, variando de acordo com o ambiente e intervenções humanas, portanto, não apresentam relações lineares no seu desenvolvimento. Com isso, Regazzi (2003) explicou que os modelos biológicos não lineares apresentam uma melhor flexibilidade em comparação aos lineares.

Diante disso, comumente são ajustados modelos não lineares para estimar curvas de altura dominante em função da idade para classificar sítios florestais.

#### **2.1.2.1. Fonte de dados para curvas de sítio**

Clutter *et al.* (1983) explicaram que o desenvolvimento de equações de índices de sítio pode ser proveniente de três fontes de dados: 1) mensuração das alturas em parcelas temporárias; 2) mensuração das alturas em parcelas permanentes e 3) reconstrução da relação altura/idade via análise completa de tronco (ANATRO), cabível em espécies com anéis de crescimento bem definidos.

Scolforo (2006) descreveu as fontes de dados da seguinte forma: as parcelas temporárias levam à construção de curvas de índice de sítio anamórficas e constituem uma base de dados importante e muito utilizada em locais onde não existem parcelas permanentes e/ou as árvores não apresentam nitidez nos anéis de crescimento. Sua vantagem é que podem ser informações advindas de inventários convencionais, que são obtidas num espaço de tempo relativamente curto e com menor custo.

As parcelas permanentes são a fonte de dados desejável para a construção das curvas de índice de sítio, pois, possibilitam o acompanhamento do desenvolvimento das árvores contidas na parcela e, conseqüentemente, o padrão de desenvolvimento em altura das árvores ao longo dos anos. Têm como vantagem o fato de poderem ser utilizadas para a construção de curvas anamórficas e, em especial, de curvas polimórficas, porém, são mais difíceis e onerosas de serem obtidas e estão sujeitas a sofrerem distúrbios, de modo que não poderão mais ser remediadas, e neste caso, devem ser eliminadas da classificação de sítios.

A análise de tronco é outra técnica que pode ser utilizada para fins de classificação de sítio, já que propicia a reconstituição da altura das árvores, entretanto, essa técnica só é possível em regiões onde as diferenças climáticas durante as estações do ano sejam bem definidas, já que há duas fases de crescimento bastante distintas ao longo do ano. Uma primeira fase corresponde ao pleno crescimento da árvore e ocorre naturalmente no período chuvoso e de altas temperaturas, e a segunda fase corresponde à redução do crescimento da árvore e ocorre naturalmente no período seco e frio.

Clutter et al. (1983) ressaltaram que apesar de serem mais dispendiosas, as parcelas permanentes fornecem parâmetros mais confiáveis para a classificação de sítios florestais, visto que, por meio de remedições, elas refletem fielmente o crescimento das árvores. Além disso, a existência de parcelas desde idades jovens até as mais avançadas proporciona ainda mais confiabilidade à classificação de povoamentos florestais.

### **2.1.2.2. Tipos de curvas de sítios**

Ainda que sejam definidas técnicas de manejo apropriadas para algumas espécies, o crescimento das florestas é dinâmico e varia, sobretudo, de acordo com as condições edafoclimáticas e as práticas de manejo (SCHNEIDER; SCHNEIDER, 2008).

Selle et al. (1994) destacaram que é de suma importância conhecer a forma de crescimento das árvores em seus locais, para identificar se elas se desenvolvem seguindo um mesmo padrão ou não. A ocorrência de diferenciação no crescimento da altura em diferentes sítios, para uma mesma espécie, é denominada polimorfismo, entre as formas de crescimento, mostrando a necessidade de ajustar funções individuais para estes locais, obtendo, com isso, maior precisão na descrição dos sítios.

O teste de anamorfismo, descrito por Scolforo (2006), é realizado nos dados de povoamentos florestais para confirmar a hipótese de que há forte relação linear entre as variáveis envolvidas, expressando que o índice de sítio não depende da idade, mas da capacidade produtiva do local.

Clutter et al. (1983) descreveram que uma família de curvas pode ser classificada como anamórfica, quando a altura de uma das curvas é sempre proporcional à altura das demais, numa mesma idade. Já as curvas do tipo polimórficas, podem ser divididas em descontínuas e não descontínuas. As polimórficas descontínuas ocorrem quando a proporcionalidade das alturas não se mantém e as curvas não se cruzam dentro do intervalo estabelecido. As polimórficas não descontínuas ocorrem quando a proporcionalidade das alturas não se mantém e as curvas se cruzam dentro de um intervalo de tempo estabelecido.

Scolforo (2006) destacou que as curvas anamórficas apresentam falha quando a proporcionalidade entre as curvas de índice de sítio mais produtivo tende a ter forma sigmoide mais pronunciada, ao passo que em sítios menos produtivos, o padrão de crescimento da altura tende a ser mais alisado, ou seja, o ponto de inflexão é atingido mais tarde que o dos sítios mais produtivos. Sendo assim, quando utilizada essa família de curvas, essas diferenças não podem ser notadas, pois elas apresentam o mesmo padrão de crescimento.

### **2.1.2.3. Métodos para construção dos Índices de sítio**

Existem vários métodos para se construir curvas de índices de local, sendo que a maioria é baseada nos métodos da curva guia, método da equação das diferenças e no método da predição de parâmetros (CLUTTER et al., 1983). Campos e Leite (2013) ressaltaram que, além desses três, existem também os métodos da atribuição preliminar de índices de local e o método de Hammer.

Entretanto, Cunha Neto et al. (1996) destacaram que estes métodos possuem algumas limitações, contudo, são os mais utilizados para a classificação de capacidade produtiva de sítios florestais. Segundo os autores, até que sejam desenvolvidos métodos que traduzam, de forma numérica compreensível aos usuários do setor, a relação existente entre uma diversidade de fatores ambientais, continuarão sendo a melhor alternativa.

Apesar da existência de todos estes métodos para a classificação de sítios florestais, há certa predominância na utilização do método da curva guia (DIAS et al., 2005) devido a sua maior facilidade de execução e ao fato de vir apresentando resultados satisfatórios como nos trabalhos realizados por Batista e Couto (1986); Machado et al. (1997); Bravo-Oviedo et al. (2004); Téó et al. (2011); Santos (2012); David et al. (2015).

#### **2.1.2.3.1. Método da Curva Guia**

Esta técnica passou a ser utilizada no final da década de 1930, com a introdução, no meio florestal, da técnica de regressão linear múltipla e não linear. A técnica consiste em estabelecer uma curva guia ou média, através dos dados de altura-idade, então, um conjunto de curvas anamórficas podem ser geradas, no qual todas as curvas são proporcionais a essa curva média (SCOLFORO, 1993).

Scolforo (2006) destacou que as curvas de índice de sítio podem ser estabelecidas de duas maneiras: (a) a partir dos fatores definidos pela razão entre o limite de cada classe de sítio e a altura média das árvores dominantes, estimada na idade de referência previamente definida. Multiplica-se, então, cada fator pelos valores de altura dominante que foram estimados pelo modelo selecionado e obtém-se os limites das classes de sítio; (b) a partir do rearranjo do modelo de sítio,

considerando que as curvas possuem um mesmo padrão de crescimento e são facilmente encontrados na literatura florestal.

Martins (2006) destacou que para a formação da família de curvas de crescimento em altura neste método, é necessário observar que, na idade base, a altura dominante corresponde ao índice de sítio. Além disso, este método é utilizado principalmente quando existem dados de parcelas temporárias ou quando se está trabalhando com espécie de curta rotação. Porém, qualquer fonte de dados é capaz de gerar curvas de sítios a partir deste método.

#### **2.1.2.3.2. Método da Diferença Algébrica**

O método da diferença algébrica pode ser aplicado a partir de qualquer modelo que representa a relação altura-idade, e tem como vantagem a produção de famílias de curvas anamórficas, como polimórficas, que independem da escolha na idade de referência (SCOLFORO, 2006).

Entretanto, torna-se necessário que os dados sejam provenientes de parcelas permanentes, de análise de tronco, ou ainda, de um grande número de parcelas temporárias (CUNHA NETO et al., 1996).

Scolforo (2006) descreveu as formulações matemáticas para o ajuste e construção de curvas de sítio pelo método da diferença algébrica, considerando-se curvas anamórficas e polimórficas, e possui a seguinte premissa: se a interseção do modelo (em geral conhecido como  $\beta_0$ ) é parâmetro específico do sítio, então a inclinação e inflexão ( $\beta_1$  e  $\beta_2$ ) são comuns para todos os sítios, tem-se, deste modo, um conjunto de curvas anamórficas. Já para a obtenção de curvas polimórficas, pressupõe-se que a inclinação ( $\beta_1$  ou  $\beta_2$ ) é o parâmetro específico do sítio, então, o intercepto e a inflexão ( $\beta_0$  e  $\beta_1$  ou  $\beta_2$ ) serão iguais para todos os sítios e para qualquer par de altura-idade.

#### **2.1.2.3.3. Predição de Parâmetros**

O método de predição de parâmetros consiste em adotar um modelo que relacione a altura dominante e idade para cada parcela permanente, e é utilizado para gerar curvas polimórficas disjuntas (CLUTTER et al., 1983; CAMPOS & LEITE, 2013).

Scolforo (2006) destacou os três passos principais que devem ser observados para confecção das curvas de índice de sítio a partir deste método:

1º - ajustar uma função altura-idade, linear ou não, para os dados de cada árvore ou parcela, obtendo-se tantas equações quanto forem o número destas árvores ou parcelas;

2º - utilizando cada curva ajustada, verificar o seu índice de sítio para definir a amplitude deste, de modo a estabelecer o intervalo e o número de classes de sítio;

3º - relacionar cada parâmetro das curvas ajustadas com o índice de sítio, através de regressão linear ou não linear, para ter um conjunto de coeficientes que possibilitem a obtenção das curvas de índice de sítio para a população e não ter apenas curvas de crescimento para as árvores individuais ou as parcelas.

#### **2.1.2.3.4. Método de Hammer**

Campos e Leite (2013) descreveram que o método de Hammer é uma adaptação do método da curva guia e consiste em fixar índices de sítio compatíveis com a variação da altura dominante ( $H_{dom}$ ) na idade-índice determinada. Em seguida, substituir estes índices na equação ajustada, no lugar da variável altura dominante, e a idade-índice, no lugar da variável idade  $e$ , com isso, obtendo-se um parâmetro  $\beta_0$  para cada índice de sítio (IS).

Com os pares de dados  $(\beta_0, S)$ , ajusta-se a regressão linear simples  $\beta_0 = \alpha_0 + \alpha_1 S + \varepsilon$  e substitui-se a equação ajustada, na equação inicial, obtendo-se uma nova expressão, que será utilizada para gerar as curvas de índice de sítio pelo método de Hammer.

#### **2.1.2.3.5. Método da atribuição preliminar de índices de local**

Campos e Leite (2013) destacaram que neste método, além da idade e da altura dominante, é necessário dispor de uma informação preliminar sobre o índice de sítio de cada parcela permanente para o seu desenvolvimento. Sendo assim, duas situações podem ocorrer: (a) parcelas com medição em uma idade coincidente com a idade-índice escolhida; (b) parcelas onde não há esta coincidência.

No primeiro caso, o índice de sítio preliminar é igual a altura dominante observada na idade-índice. Já no segundo, os índices de local são determinados por

meio de equações de regressão obtidas para cada parcela. Quando o número de medições por parcela for inferior a três, o índice preliminar é obtido por interpolação ou extrapolação.

### **2.1.3. Aplicações da Classificação de Sítios Florestais**

Inúmeros estudos já foram realizados sobre a classificação de sítios florestais. Porém, apesar da existência de vários métodos para classificação de sítios florestais, há certa predominância na utilização do método da curva guia, que gerando curvas anamórficas, conseguiu resultados satisfatórios para conhecer o potencial produtivo de florestas, principalmente dos gêneros *Pinus* e *Eucalyptus*, como descritos pelos autores: Batista e Couto (1986); Selle et al. (1994); Machado et al. (1997); Bravo-Oviedo et al. (2004); Oliveira et al. (2008); Téo et al. (2011); Santos (2012); David et al. (2015) e Castro et al. (2016).

O método da diferença algébrica também já foi abordado em alguns trabalhos conhecidos na literatura florestal, a vantagem que este possui em relação ao da curva guia é a possibilidade de obtenção de curvas do tipo anamórficas e polimórficas.

No Brasil, o emprego de curvas polimórficas teve início com o trabalho de Machado (1980), que utilizou dados de análise de tronco de 64 árvores de *Pinus taeda* na região central do Paraná. Posteriormente, outros trabalhos foram desenvolvidos, como o de Marcolin (1990), Scolforo (1992), Cunha Neto et al., (1996), Dias et al. (2005), Scavinski (2014), Castro et al. 2015 e Nascimento et al. (2015). Alguns trabalhos também foram realizados em outros países, como o de Carrero et al. (2008) e Diéguez-Aranda et al. (2005), para *Eucalyptus urophylla* variando entre 4 e 12 anos de idade, localizados na Venezuela e para povoamentos de *Pinus radiata* na região noroeste da Espanha, respectivamente.

Alguns estudos mais aprofundados sobre o assunto foram desenvolvidos ao longo dos anos por diversos autores, na proposta de novas técnicas e metodologias aplicadas na classificação da capacidade produtiva. Vários autores realizaram a associação das classes de sítios florestais com variáveis edafoclimáticas como serão relatadas a seguir.

Braga et al. (1999) estudaram as características ambientais determinantes da capacidade produtiva de sítios cultivados com Eucalipto na região do mar de morros,

no Médio Rio Doce (MG) e avaliaram informações relativas à fisiografia (altitude, pedoforma, radiação, declividade) e radiação solar, além das características químicas, físicas e de fertilidade do solo (relações Ca/bases trocáveis).

Os autores identificaram que as características ambientais mais importantes foram: altitude, pedoforma, declividade, radiação solar, floculação da argila (0-20 cm), relação silte/argila (40-60 cm) e relação cálcio/soma de bases trocáveis (0-20 e 40-60 cm). Além disso, as características fisiográficas destacaram-se representando, indiretamente, fatores de ação direta sobre o crescimento do povoamento, devendo ser observadas, prioritariamente, na seleção de áreas para a implantação e manutenção de florestas comerciais de eucalipto.

Bila et al. (2012) analisaram a classificação de sítios com base em fatores edáficos para *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, na região de Prata, no estado de Minas Gerais, a partir da correlação entre variáveis edáficas e variáveis dendrométricas, com base no método de *stepwise* e no método de componentes principais. Os resultados mostraram que as características químicas do solo, como variáveis, índice de SMP (método de análise e correção de acidez do solo),  $Al^{3+}$ ,  $H+Al$  e P (Mehlich<sup>-1</sup>), foram consideradas fatores limitantes no crescimento em altura da espécie estudada, e o método de *stepwise* foi o que apresentou a melhor capacidade de expressar a relação entre variáveis edáficas e características dendrométricas.

Ferraz Filho et al. (2011) testaram o efeito de variáveis ambientais introduzidas como modificadores da inclinação do modelo de Chapman-Richards, para a projeção de altura dominante, por ser esta variável chave em todo o sistema de prognose. As variáveis ambientais testadas foram: precipitação mensal média e radiação solar média, e a escolha se deu pelo método de construção de modelos *backward*. Segundo os autores, a inclusão das variáveis climáticas nas projeções da altura dominante gerou um ganho de 19,8 % em relação ao modelo sem variável ambiental. Além disso, a metodologia proposta no trabalho pode ter como vantagem a atualização de inventários com base no histórico climático e a estimativa da produtividade em locais sem histórico de plantios.

Leite et al. (2011b) testaram a utilização do diâmetro dominante para a classificação da capacidade produtiva de povoamentos de Eucalipto a partir do método da curva guia. Os autores concluíram que o emprego do diâmetro das árvores dominantes é eficiente para a classificação da capacidade produtiva, pois, a

classificação das unidades amostrais foi coerente com aquela obtida pelo método usual, em que se emprega a altura dominante. Sendo assim, seu uso pode ser substituído em modelos hipsométricos sem perda de precisão com esta variável alternativa. Porém, eles também concluíram que os índices de local definidos com base no diâmetro dominante não são mais correlacionados com a área basal e a produção em volume se comparados aos índices definidos com base na altura das árvores dominantes.

Gerhardt et al. (2001) analisaram a contribuição da análise multivariada na classificação de sítios em povoamentos de *Araucaria angustifolia* com 47 anos de idade, localizados na Floresta Nacional de Canela, Rio Grande do Sul, baseada nos fatores físicos e morfológicos do solo e no conteúdo de nutrientes da serapilheira. O povoamento estava distribuído proporcionalmente em três sítios naturais previamente classificados. A determinação do crescimento em altura para a obtenção da árvore de altura média dominante foi realizada através da análise de tronco.

Os autores comprovaram a eficiência dos agrupamentos e mostraram que as variáveis profundidade do solo, teores de argila, areia fina e silte, densidade do solo e incremento médio anual em altura, apresentaram maior poder de discriminação e separação das classes de sítios. Os resultados demonstraram grande aproximação da classificação de sítios feita com essa técnica de mapeamento baseada nas características físicas e morfológicas do solo, comprovando a viabilidade da análise multivariada para este fim.

Lima Júnior (2006) analisou técnicas multivariadas para conhecer as fases de crescimento da Leucena (*Leucaena leucocephala* (Lam.) de Wit.), localizada na Estação Experimental de Caruaru-PE. O autor concluiu que as plantas que receberam o composto orgânico tiveram as maiores alturas, em média, do que as que não receberam durante a implantação. Além disso, o estudo mostrou que o modelo fatorial com três fatores representou as três fases de crescimento da Leucena e a forma sigmoide nos gráficos de crescimento, podendo ser indicado para posteriores trabalhos.

BINOTI et al. (2012a) estudaram a eficiência da função hiperbólica para geração de curvas anamórficas e polimórficas de índices de local que foram construídas utilizando os métodos: da curva guia, da equação das diferenças, da predição de parâmetros, de Hammer e dos índices de local definidos

preliminarmente. Os autores confirmaram a eficiência da aplicação da função hiperbólica, sendo indicada para descrever tendências polimórficas e anamórficas, devido à sua flexibilidade e realismo biológico adequados, podendo ser utilizada para a classificação da capacidade produtiva de povoamentos equiâneos.

Höck et al. (1993) fizeram aplicações da Geoestatística para estimar índices de local de *Pinus radiata* na Nova Zelândia. Os autores concluíram que a combinação de um Sistema de Informação Geográfica (SIG) com técnicas estatísticas permitiu criar um mapa de distribuição do índice local de forma eficaz. Além disso, o armazenamento digital de informações permitirá um rápido e automatizado processo de atualização do mapa no futuro, assim que estiverem disponíveis novos dados.

Ortiz et al. (2006) empregaram técnicas de Geoprocessamento para estudar as relações entre o potencial produtivo, representado pelo Índice de Sítio (IS) de povoamentos florestais com clones de *Eucalyptus grandis* aos 6,3 anos de idade, em Paraibuna-SP, e atributos do solo (características físicas e químicas), e do relevo, levando em consideração a variabilidade espacial das variáveis envolvidas.

Os autores concluíram que os atributos físicos do solo, mais especificamente a estrutura, a textura, e a fisiografia, mostraram ser mais importantes na determinação do potencial produtivo do que os atributos químicos. Além disso, identificaram que os atributos que influenciaram no potencial produtivo do talhão eram principalmente cotas e alumínio, de forma indireta; e umidade, argila total, areia total, areia muito grossa, manganês e soma de bases, de forma direta.

David et al. (2016) verificaram o efeito da qualidade do sítio e do desbaste na relação hipsométrica de *Pinus taeda* a partir da análise de variância em blocos casualizados, em que os blocos corresponderam aos sítios e os tratamentos aos desbastes mistos. A relação hipsométrica foi modelada e depois foi aplicado o teste de identidade de modelos de Graybill, para reduzir o número de modelos similares selecionados no mesmo bloco. Os autores concluíram que havia diferença estatística entre as relações hipsométricas para os tratamentos e blocos, e que, a hipsometria variava pouco entre os tratamentos, mas reduzia sua inclinação quando piorava a qualidade do sítio.

## 2.2. Redes Neurais Artificiais (RNA)

Há décadas são realizados estudos para capacitar as máquinas de algum poder inteligente, quase sempre baseados no exemplo humano. Esses estudos, conhecidos como Inteligência Artificial (IA), resultaram em diversas técnicas que pelo menos em parte, conseguem imitar a inteligência humana, mesmo assim, respeitando as devidas proporções. Dentre as técnicas, são bons exemplos as Redes Neurais Artificiais (RNA) (ALMEIDA NETO, 2003).

Redes Neurais Artificiais são sistemas que possuem semelhanças com o cérebro humano, como a aprendizagem e a generalização de informações, devido ao processamento paralelo e em razão da massiva conectividade dos elementos de processamento (“neurônios”) dispostos em uma ou mais camadas (BRAGA et al., 2007). Dângelo et al. (2011) destacaram que o neurônio artificial trabalha de forma similar ao neurônio biológico, recebendo sinais de entrada e distribuindo-os para a saída ou para os outros neurônios da camada seguinte. O sinal de entrada é então multiplicado pelos pesos sinápticos, gerando um somatório de todas as entradas ponderadas. Esse somatório é considerado a função de ativação para que possa transmitir o sinal para outros neurônios ou para a saída.

Bullinaria (2010) caracterizou Redes Neurais Artificiais (RNA) como sistemas computacionais paralelos (camadas), constituídos de várias unidades de processamento simples (neurônios artificiais), conectadas entre si de uma maneira específica para executar uma determinada tarefa. Braga et al. (2007) relataram sua capacidade em calcular determinadas funções matemáticas, por possuírem conexões que estão associadas a pesos que armazenam o conhecimento representado no modelo e ponderam a entrada recebida por cada neurônio da rede.

Como principais características das RNA, estão: mapeamento de entrada e saída, tolerância a falhas e ruídos, adaptabilidade dos pesos das conexões às modificações do ambiente, ou seja, uma rede treinada pode ser retreinada ou uma rede pode ser projetada para modificar seus pesos em tempo real (ambiente não estacionário), capacidade de informar a confiança de uma decisão tomada, aprendizagem a partir de exemplos, generalização para dados desconhecidos e analogia neurobiológica (HAYKIN, 2001; BRAGA et al., 2007; BULLINARIA, 2010).

Devido à sua estrutura maciça e paralelamente distribuída em camadas, as RNA conseguem modelar diversas variáveis e suas relações não lineares

possibilitam a modelagem com variáveis categóricas (qualitativas), além das numéricas (quantitativas), tornando-as capazes de resolver problemas complexos, por isso, têm apresentado desempenho superior aos modelos de regressão comumente utilizados (HAYKIN, 2001).

O desenvolvimento de uma RNA consiste em determinar sua arquitetura, isto é, os números de camadas e de neurônios em cada uma delas, bem como ajustar os seus parâmetros  $w$ 's (pesos) e  $b$ 's (bias), que variam de acordo com a complexidade do problema. Durante o processo de seu desenvolvimento, é necessário ter coletado uma amostra da população, dividindo-a em duas partes: uma para treinamento e a outra para teste, em que se avalia o erro de classificação da RNA (KHOURY JÚNIOR et al., 2006).

O procedimento utilizado na solução de problemas pelas RNA é iniciado com uma fase de aprendizagem ou treinamento, onde um conjunto de exemplos é apresentado à rede, para que ela possa retirar características necessárias para representar a informação fornecida, que serão utilizadas, em seguida, para gerar respostas para o problema (BRAGA et al., 2007).

O treinamento de uma Rede Neural Artificial consiste no ajuste iterativo dos parâmetros da rede (pesos e bias) através de um algoritmo de aprendizagem (MAEDA et al., 2009). Neste processo, os dados de treinamento (conjunto de exemplos) são apresentados a uma arquitetura preestabelecida, ou seja, um determinado número de arranjos de neurônios em camadas, e o algoritmo de treinamento extraem características a fim de representar a informação fornecida e desempenhar uma determinada tarefa (FERREIRA et al., 2014).

Soares e Silva (2011) destacaram que esta etapa de aprendizado pode ser considerada como uma adaptação da RNA às características intrínsecas de um problema, onde se procura cobrir um grande espectro de valores associados às variáveis pertinentes.

Os mesmos autores explicam que isso é feito para que a RNA adquira, através de uma melhora gradativa, uma boa capacidade de resposta para o maior número de situações possíveis. Por sua vez, a generalização de uma RNA está associada à sua capacidade de dar respostas coerentes para dados não apresentados a ela durante o treinamento. Espera-se que uma RNA treinada tenha uma boa capacidade de generalização, independentemente de ter sido utilizado o aprendizado supervisionado ou não supervisionado durante o treinamento.

Haykin (2001) destacou que apesar de existirem diversos métodos para o treinamento de redes neurais, esses podem ser agrupados em dois paradigmas principais: os aprendizados supervisionados e os não supervisionados. Braga et al. (2007) destacaram que o método de aprendizado supervisionado é o mais usado em RNA, quer de neurônios com pesos, quer de neurônio sem pesos, e possui este nome em função de que tanto as entradas quanto as saídas desejadas são fornecidas à rede durante o processo de treinamento.

Por fim, Özçelik et al. (2010) relataram em seu estudo que as RNA têm recebido uma atenção especial nas últimas décadas, devido a esta metodologia ser passível de comparação com a modelagem estatística, e podem ser utilizadas como esforço complementar (sem a suposição restritiva de um modelo estatístico em particular) ou uma abordagem alternativa para estimativa de dados complexos. Com isso, a RNA, através da sua capacidade potencial com base em algum aprendizado supervisionado e treinamento, pode oferecer soluções ótimas para os problemas de manejo de recursos florestais (SOARES, 2012).

### **2.2.1. Redes Neurais de Múltiplas Camadas (*Multilayer Perceptron* ou MLP)**

Segundo Thomé (2005), existem várias arquiteturas e várias técnicas de treinamento de rede neural propostas na literatura. Cada uma com vantagens e desvantagens, dependendo do problema e da aplicação específica a que se destinam.

Em 1959, Frank Rosenblatt criou o *Perceptron*, no qual foram acrescentadas de ligações ajustáveis. As RNA poderiam ser treinadas para classificar certos tipos de padrões, propondo ainda um algoritmo para treinar a rede e executar determinados tipos de funções, o que posteriormente deu origem aos modelos denominados de MLP (ROSENBLATT, 1959). Alguns outros modelos similares ao *Perceptron* foram também desenvolvidos nesta época, como é o caso do *Adaline (Adaptive Linear Element)*, criado por Bernard Widrow, em 1962 (WIDROW, 1962).

Porém, Minsky e Papert (1969) chamaram a atenção para algumas tarefas que os atuais modelos de redes baseados no *Perceptron* (redes de um só nível, que eram disponíveis na época) não eram capazes de aprender, por exemplo, funções simples do tipo “ou-exclusivo”, já que só resolviam problemas linearmente separáveis.

Osório e Bittencourt (2000) relataram que o impacto da publicação deste livro abalou profundamente as pesquisas realizadas nesta área de estudos. Somente na década de 1980, surgiram novos modelos de redes baseadas em *Perceptrons*, que a deixaram marcada pelo renascimento das redes neurais. Isto se deveu ao desenvolvimento dos computadores, que eram mais velozes e permitiam realizar melhores simulações das redes neurais, bem como o desenvolvimento de modelos matemáticos que permitiram a solução do problema apontado por Minsky e Papert (1969).

Os autores ainda citaram que o modelo que permitiu o ressurgimento das redes baseadas em *Perceptrons* foi o das redes em multicamadas, as conhecidas *Multilayer Perceptron* ou MLP. Além disso, um novo algoritmo de aprendizado chamado *Back-Propagation*, que permite realizar o aprendizado por correção de erros em uma rede com múltiplas camadas resolveria o problema citado por Minsky e Papert (1969). Este modelo foi desenvolvido por diferentes pesquisadores quase ao mesmo tempo, como Parker (1982); Rumelhart (1985) e Rumelhart et al. (1986).

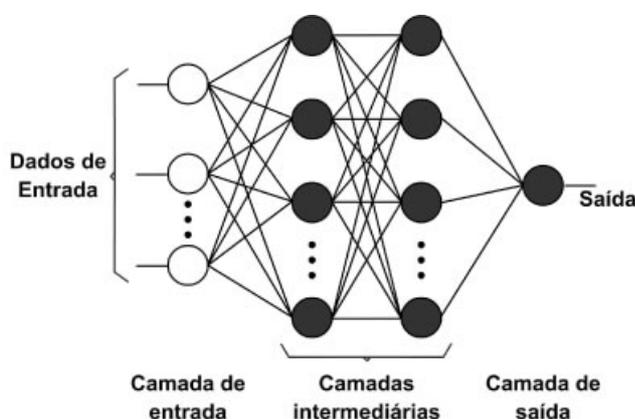
Neste sentido, a rede neural *Perceptron Multi-Camadas*, do inglês, *Multilayer Perceptron* (MLP), tornou-se uma das mais conhecidas e aplicadas arquiteturas de redes neurais, representando uma generalização do *Perceptron* proposto por Roseblatt (BALLINI et al., 2003).

Atualmente, dentre as arquiteturas mais comuns e utilizadas de RNA, encontram-se as redes de base radial (*Radial Basis Function* ou RBF) e as de múltiplas camadas (*Multilayer Perceptron* ou MLP). As redes do tipo RBF normalmente apresentam algumas vantagens em relação a outros tipos de RNA, incluindo estruturas mais simples, algoritmos de aprendizado rápido e melhor capacidade de aproximação (BRAGA et al., 2007; COELHO et al., 2007). Entretanto, as MLP, por sua vez, constroem aproximadores globais e são recomendadas para a resolução de problemas mais complexos (BRAGA et al., 2007).

A arquitetura MLP consiste de uma camada de entrada, uma ou mais camadas intermediárias e uma camada de saída. A camada de entrada propaga os valores de entrada para as camadas seguintes sem modificação. Nas camadas intermediárias, as informações são transmitidas por meio das conexões entre as camadas de entrada e saída, nesta camada os neurônios são denominados unidades ocultas. Finalmente, a camada de saída transmite a resposta da rede

neural à entrada aplicada na camada de entrada (SOARES, 2012), conforme mostra a Figura 1.

O mesmo autor ainda retrata que a arquitetura da rede neural MLP apresenta três características distintas: variações quanto ao número de camadas e neurônios intermediários da rede, tipo de conexão determinada pelas sinapses e função de ativação. Além disso, o modelo MLP apresenta um treinamento supervisionado, ou seja, é necessário um “instrutor” para indicar a resposta desejada para um padrão de entrada apresentado pela rede durante a fase de aprendizagem. Assim, a rede é adaptada ou treinada por um processo iterativo de ajustes sucessivos dos pesos, este sendo chamado de método de aprendizagem.



**Figura 1** – Exemplo de arquitetura de uma rede *perceptron* multicamadas (MLP) com duas camadas intermediárias.

Fonte: Fiorin et al. (2011).

### 2.2.2. Aplicações de RNA na Engenharia Florestal

Os estudos na área das Ciências Florestais com a utilização das RNA se justificam por diversas propriedades úteis desta ferramenta computacional. Sua utilização pode facilitar, aprimorar ou apenas servir como mais uma alternativa às técnicas já existentes, trazendo benefícios tanto à redução de custos quanto ao ganho de precisão aos manejadores florestais.

Com isso, diversos estudos já foram realizados nesta área. As RNA foram utilizadas para modelar a sobrevivência de árvores (GUAN & GERTNER, 1991a, 1991b, 1995). No estudo do volume de fustes, diversos autores já identificaram a superioridade das redes neurais (DIAMANTOPOULOU, 2005; GÖRGENS, 2006;

BALEEIRO, 2007; GÖRGENS et al., 2009; SILVA et al., 2009; BINOTI et al., 2009; DIAMANTOPOULOU, 2010; ÖZÇELIK et al., 2010; SOARES et al., 2011; BARROS, 2014).

Foi testada também na estimativa de volume em um plantio de eucalipto em função de fotografias hemisféricas e número de árvores (LEAL et al. 2015). Lacerda et al. (2014) estimaram o volume de espécies de cerrado *stricto sensu* com redes neurais artificiais. Araújo (2015) utilizou RNA ajustadas por algoritmos genéticos (NEAT e *Skyp Layer connections*), na estimativa do volume de 11 tipologias florestais ocorrentes no estado de Minas Gerais. Silva et al. (2014) utilizaram redes neuro-fuzzy para estimar volume de madeira de espécies do cerrado *stricto sensu*.

Redes neurais também foram utilizadas na modelagem do afilamento do fuste de árvores (SILVA et al., 2008; SOARES et al., 2011; LEITE et al., 2011a; SOARES et al., 2012;). Estudos de crescimento e produção de florestas também já foram realizados com a aplicação da técnica (GARBER & MAGUIRE, 2003; BINOTI, 2010; CASTRO, 2011). Além disso, é possível observar registros da utilização de RNA na modelagem em nível de povoamento e por classe de diâmetro (BINOTI, 2010; BINOTI et al., 2012b).

A estimativa da altura de árvores foi realizada por diferentes tipos de RNA (XIAO et al., 1998; BRANDÃO, 2007; DIAMANTOPOULOU, 2012; BINOTI et al., 2013; FERREIRA et al., 2014).

As redes também já foram utilizadas para a previsão dos preços de madeira (COELHO et al., 2007), bem como para fornecer estimativas acerca da eficiência nutricional, área foliar, clorofila e produtividade de plantações de eucalipto (LAFETÁ, 2012; LAFETÁ et al., 2012). Estimação de biomassa e de carbono (SCHOENINGER et al., 2008; FERRAZ, 2012) e densidade básica da madeira por diferentes algoritmos (LEITE et al., 2016). Souza et al. (2014) estimaram peso seco de espécies do cerrado *stricto sensu* com RNA.

Alguns trabalhos recentes estão sendo desenvolvidos para testar diferentes arquiteturas e algoritmos das RNA para estimativas de variáveis na área florestal (GÖRGENS et al., 2014; ARAÚJO, 2015; LEITE et al., 2016).

Para a classificação da capacidade produtiva de povoamentos florestais, Cosenza et al. (2015) fizeram a aplicação de RNA juntamente com outra técnica conhecida como Máquina de Vetor de Suporte (MVS), com a inclusão de variáveis

edáficas, de manejo e do povoamento, comparando os seus resultados com os obtidos pelo método da curva guia.

O que difere deste trabalho é que, apesar de também testar a adição de variáveis edáficas, do manejo e do povoamento, a saída para treinamento das RNA era justamente a classe de sítio que foi obtida pelo método da curva guia. Neste estudo, as RNA serão utilizadas para realizar a estimativa da altura dominante. Posteriormente, serão aplicadas no método semelhante ao da curva guia, na intenção de que, com estimativas mais precisas dessa altura dominante, seja possível gerar uma classificação mais estável ao longo das remedições do povoamento nas diferentes idades, trazendo um ganho de precisão para a técnica.

## REFERÊNCIAS

ALMEIDA NETO, A. **Aplicação de múltiplas redes neurais em sistemas mecatrônicos**. 2003. 155 p. Tese (Doutorado em Sistemas Aeroespaciais e Mecatrônicas) – Divisão de Pós-Graduação do Instituto Tecnológico de Aeronáutica, Instituto Tecnológico de Aeronáutica, São José dos Campos-SP, 2003.

ARAÚJO, A. C. S. C. **Redes neurais artificiais para quantificação volumétrica de florestas nativas no Estado de Minas Gerais**. 2015. 73 p. (Dissertação – Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina-MG, 2015.

ARNBORG, T. Can we find a common platform for the different schools of forest type classification? In Symposium on forest types and forest ecosystems. **Silva Fenn.** v. 105, p. 13-15.

BALEEIRO, G. B. **Modelagem Neuro-Fuzzy na Estimativa de Volume de Eucalyptus sp**. 2007. 31 p. Monografia (Graduação em Ciência da Computação) – Universidade Federal de Lavras, Lavras - MG, 2007.

BALLINI, R.; SOARES, S.; ANDRADE, M. G. Previsão de vazões médias mensais usando redes neurais nebulosas. **SBA Controle e Automação**, Campinas-SP, v. 14, n. 3, 2003.

BARROS, V. A. **Estimação de variáveis dendrométricas em povoamentos adensados de eucalipto utilizando redes neurais artificiais**. 2014. 38 p. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) – Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2014.

BASHEER, I. A.; HAJMEER, M. Artificial neural networks: fundamentals, computing, design, and application. **Journal of Microbiological Methods**, v. 43, p. 3–31, 2000.

BATES, C. G. Concerning site. **J. Forest.** v. 16, p. 383-388. 1918.

BATISTA, J. L. F., COUTO, H. T. Z. Escolha de modelos matemáticos para a construção de curvas de índice de sítio para florestas implantadas de *Eucalyptus sp* no Estado de São Paulo. **Instituto de Pesquisas e Estudos Florestais**, São Paulo, v. 1, n. 32, p. 32-41, 1986.

BENSON, L. P.; EDWIN, A.; WILDER, P. A. Evolutionary sorting of characters in a hybrid swarm. I: Direction of slope. **Amer. J. Bot.** v. 54, p. 1017-1026, 1967.

BILA, J. M.; SANQUETTA, C. R.; MACHADO, S. A. Classificação de sítios com base em fatores edáficos para *Pinus caribaea* var. *hondurensis* na região de Prata, Minas Gerais. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 42, n. 3, p. 465-474, 2012.

BINOTI, M. L. M. S. **Redes neurais artificiais para prognose da produção de povoamentos não desbastados de eucalipto**. 2010. 54 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2010.

BINOTI, M. L. M. S.; 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, n. 6, p. 1133-1139, 2009.

BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M. S.; LEITE, H. G. Aplicação da função hiperbólica na construção de curvas de índice de local. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 36, n. 4, p. 741-746, 2012a.

BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M. S.; LEITE, H. G. Redução dos custos em inventário de povoamentos equiâneos utilizando redes neurais artificiais. **Agrária**, v. 8, p. 125-129, 2012b.

BINOTI, M. L. M. S.; BINOTI, D. H. B.; LEITE, H. G. Aplicação de redes neurais artificiais para estimação da altura de povoamentos equiâneos de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 37, n. 4, p. 639-645, 2013.

BRAGA, F. A.; BARROS, N. F.; SOUZA, A. L.; COSTA, L. M. Características ambientais determinantes da capacidade produtiva de sítios cultivados com eucalipto. **R. Bras. Ci. Solo**, v. 23, p. 291-298, 1999.

BRAGA, A. de P.; CARVALHO, A. P. de L. F. de; LUDEMIR, T. B. **Redes Neurais Artificiais: Teoria e Aplicações**. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007, 248 p.

BRANDÃO, F. G. **Estimativa da altura total de EUCALYPTUS sp. utilizando lógica fuzzy e neuro fuzzy**. 2007. 62 p. Monografia (Graduação em Ciência da Computação) – Universidade Federal de Lavras, Lavras-MG, 2007.

BRAVO-OVIEDO, A.; DEL RIO, M.; MONTEIRO, G. Site index curves and growth model for mediterranean maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) in Spain. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, n. 201, p. 187-197, 2004.

BULLINARIA, J. A. **Introduction to Neural Computation**. Notas de aula. Disponível em: <<http://www.cs.bham.ac.uk/~jxb/inc.html>> 2010. Acesso em: 20 Maio 2015.

BURKHART, H. E., TENNENT, R. B. Site index equations for radiata pine in New Zealand. **New Zealand J. For. Sci.**, New Zealand, v. 3, p. 408-416, 1977.

CAJANDER, A. K. **The theory of forest types.** *Acta Forest. Fenn.* 29, 1926, 108 p.

CALLAHAM, R. Z. **Seed production areas and seed orchards in California**, p. 45-52. In 12th Northeastern Forest Tree Improvement Conf., niv. Park, Pa. Aug. 25-Sept. 1, 1964. 1965.

CAMPOS, J. C. C., LEITE, H. G. **Mensuração Florestal: perguntas e respostas.** 4. ed. Viçosa: Editora UFV, 2013, 605 p.

CARRERO, O.; JEREZ, M.; MACCHIAVELLI, R.; ORLANDONI, G.; STOCK, J. Ajuste de curvas de índice de sitio mediante modelos mixtos para plantaciones de *Eucalyptus urophylla* en Venezuela. **APR**, v. 33, n. 4, p. 265-272, 2008.

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

CASTRO, R. V. O.; CUNHA, A. B.; SILVA, L. V. da; LEITE, H. G.; SILVA, A. A. L. da. Modelagem do crescimento e produção para um povoamento de *Eucalyptus* utilizando dois métodos para quantificação de índice de local. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 105, p. 83-90, 2015.

CASTRO, R. V. O.; ARAÚJO, R. A. A.; LEITE, H. G.; CASTRO, A. F. N. M.; SILVA, A.; PEREIRA, R. S.; LEAL, F. A. Modelagem do crescimento e da produção de povoamentos de *Eucalyptus* em nível de distribuição diamétrica utilizando índice de local. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 40, n. 1, p.107-116, 2016.

CLUTTER, J. L.; PIENAR, L. V.; BRISTER, G. H.; BAILEY, R. L. **Timber management: a quantitative approach.** New York, John Willey e Sons, 1983, 333 p.

COELHO, L. S.; SILVA, W. V.; PROTIL, R. M. Previsão não linear dos preços de troncos de eucalipto baseada em uma abordagem neuroevolutiva. **Gestão & Produção**, Rio de Janeiro, v. 14, n. 1, p. 139-154, 2007.

COSENZA, D. N.; LEITE, H. G.; MARCATTI, G. E.; BINOTI, D. H. B.; ALCÂNTARA, A. E. M. de; RODE, R. Classificação da capacidade produtiva de sítios florestais utilizando máquina de vetor de suporte e rede neural artificial. **Scientia forestalis**, Piracicaba, v. 43, n. 108, p. 955-963, 2015.

CUNHA NETO, F. R. C.; SCOLFORO, J. R. S.; OLIVEIRA, A. D. de; NATALINO CALEGÁRIO, N.; KANEGAE JÚNIOR, H. Uso da diferença algébrica para construção de curva de índice de sitio para *Eucaliptus grandis* e *Eucaliptus urophylla*, na região de Luiz Antônio - SP. **Cerne**, Lavras, v. 2, n. 2, p. 119-141, 1996.

DÂNGELO, M. F.; MENDES, D. S.; BRANT, L. X. **Relatório de uma aplicação de Redes Neurais**. Especialização em Engenharia de Sistemas, Universidade Estadual de Montes Claros, 2011. Disponível em: <<http://www.diogosouza.com/files/Rede%20Neurais.pdf>>. Acesso em: 22 Maio 2015.

DAUBENMIRE, R. F. Forest vegetation of northern Idaho and adjacent Washington, and its bearing on concepts of vegetation classification. **Ecol. Monogr.** v. 22, p. 301-330, illus. 1952.

DAVID, H. C. **Avaliação de sítio, relações dendrométricas e otimização de regimes de manejo de *Pinus taeda* L. nos estados do Paraná e de Santa Catarina**. 2014. 151 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

DAVID, H. C.; PÉLLICO NETTO, S.; ARCE, J. E.; CORTE, A. N. D.; MARINHESKI FILHO, A.; BEHLING, A. Updating of Dominant Height Growth Modeling and site Index of *Pinus taeda* L. in southern Brazil. **Aust. J. Basic & Appl. Sci.** v. 9, n. 2, p. 115-125, 2015.

DAVID, H. C.; ARCE, J. E.; PÉLLICO NETTO, S.; CORTE, A. N. D.; MARINHESKI FILHO, A.; ARAÚJO, E. J. G. Efeito do Desbaste e da Qualidade do Sítio na Relação Hipsométrica de *Pinus taeda*. **Floresta e Ambiente**, v. 23, n. 2, p. 220-228, 2016.

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

DIAMANTOPOULOU, M. J.; MILIOS, E. Modelling total volume of dominant pine trees in reforestations via multivariate analysis and artificial neural network models. **Biosystems Engineering**, v. 105, n. 3, p. 306–315, 2010.

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

DIAS, A. N.; LEITE, H. G.; NOGUEIRA, G. S.; RODRIGUES, F. L. Avaliação de métodos de ajuste de curvas de índices de local em povoamentos de eucalipto desbastados. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, p. 741-747, 2005.

DIÉGUEZ-ARANDA, U.; GABRIEL, J.; GONZÁLEZ, Á. L.; ANTA, M. B. A. Site quality equations for *Pinus sylvestris* L. plantations in Galicia (northwestern Spain). **Annals of Forest Science**, v. 62, n. 2, p. 143–152, 2005. EDP Sciences. Disponível em: <<http://dx.doi.org/10.1051/forest:2005006>>. Acesso em: 10/10/2013.

DIETRICHSON, J. "The provenance problem illustrated by studies of growth hm and climate, **Medd. Norske Skogforsflks.** v. 19, p. 499-656, illus. [In Norwegian, English summary]. 1964.

FERRAZ, A. S. **Estimação dos estoques de biomassa e carbono na parte aérea de um fragmento de Floresta Estacional Semidecidual por meio de imagens de satélite Ikonos II.** 2012. 88 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2012.

FERRAZ FILHO, A. C.; SCOLFORO, J. R. S.; FERREIRA, M. Z.; MAESTRI, R.; ASSIS, A. L. de; OLIVEIRA, A. D. de; MELLO, J. M. de. Dominant height projection model with the addition of environmental variables. **Cerne**, Lavras, v. 17, n. 3, p. 427-433, 2011.

FERREIRA, J. C. B.; LAFETÁ B. O.; PENIDO T. M. A.; CAMPOS P. M. DE; CASTRO P. M. Altura de mudas da *Tibouchina granulosa* cogn. (Melastomataceae) estimada por redes neurais artificiais. **Revsbau**, Piracicaba – SP, v. 9, n. 1, p. 151-160, 2014.

FIORIN, D. V.; MARTINS, F. R.; SCHUCH, N. J.; PEREIRA, E. B. Aplicações de redes neurais e previsões de disponibilidade de recursos energéticos solares. **Revista Brasileira de Ensino de Física**, v. 33, n. 1, p. 1309-1329, 2011.

FISHWICK, R. W. **Determinação de curvas de índice de sítio para *Pinus elliotti*,** São Paulo, 1977, 10 p.

FROTHINGHAM, E. H. Height growth as a key to site. **J. Forest.** v. 16, p. 754-760, 1918.

GARBER, S. M.; MAGUIRE, D. A. Modeling stem taper of three central oregon species using nonlinear mixed effects models and autoregressive error structures. **Forest Ecology and Management**, v. 179, n. 1, p. 507-522, 2003.

GERHARDT, J. E.; FINGER, C. A. G.; LONGHI, S. L.; SCHUMACHER, M. V. Contribuição da análise multivariada na classificação de sítios em povoamentos de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze. Baseada nos fatores físicos e morfológicos do solo e no conteúdo de nutrientes da serapilheira. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 11, n. 2, p. 41-57, 2001.

GÖRGENS, E. B. **Estimação do Volume de Árvores Utilizando Redes Neurais Artificiais.** 2006. 84 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa-MG, 2006.

GÖRGENS, E. B.; LEITE, H. G.; SANTOS, H. N.; GLERIANI, J. M. Estimação do volume de árvores utilizando redes neurais artificiais. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 33, n. 6, p. 1141-1147, 2009.

GÖRGENS, E. B.; LEITE, H. G.; GLERIANI, J. M.; SOARES, C. P. B.; CEOLIN, A. influência da arquitetura na estimativa de volume de árvores individuais por meio de redes neurais artificiais. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 38, n. 2, p. 289-295, 2014.

GUAN, B. T.; GERTNER, G. Modeling red pine tree survival with an artificial neural network. **Forest Science**, Bethesda, v. 37, n. 5, p. 1429-1440, 1991a.

GUAN, B. T.; GERTNER, G. Using a Parallel Distributed Processing System, to Model Individual Tree Mortality. **Forest Science**, v. 37, n. 3, p. 871-855, 1991b.

GUAN, B. T.; GERTNER, G. Modeling individual tree survival probability with a random optimization procedure: An artificial neural network approach. **AI Application**, v. 9, n. 1, p. 39-52, 1995.

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

HÖCK, B. K.; PAYN, T. W. SHIRLEY, J. W. Using a geographic information system and geostatistics to estimate site index of *Pinus radiata* for Kaingaroa forest, New Zealand. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v. 23, n. 3, p. 264-277, 1993.

HUSCH, B.; BEERS, T. W.; KERSHAW JR., J. A. **Forest mensuration**. 4ª edição, Hoboken, New Jersey, J. Wiley & Sons, 1923, 447 p.

JONES, J. R. Review and comparison of site evaluation methods. **USDA Forest Service Research Paper RM**, RM-51, 1969.

JONSON, T. **Om bonitering av skogsmark**. **Svenska Skogsvårdsforen**. Tidskr. (Not seen. Cited by Carbonnier, 1954 and Langsaeter, 1954.) 1914.

KABZEMS, A. Some principles of forest site-type classification. **Forest. Chron.** v. 27, p. 157-163, illus. 1951.

KHOURY JUNIOR, J. K.; PINTO, F. A. C.; QUEIROZ, D. M.; LUCIA, R. M. D.; RESENDE, R. C. Redes neurais para reconhecimento de defeitos de madeira serrada de eucalipto em imagens digitais. **Scientia forestalis**, n. 70, p. 85-96, 2006.

LACERDA, T. H. S.; JESUS, R. B.; PLAZAS, I. V. C.; LACERDA, K. W. S.; CABACINHA, C. D.; ASSIS, A. L. **Redes Neurais Artificiais para estimar o volume de espécies de cerrado stricto sensu**. In: Universidade Federal do Paraná - UFPR;

Setor de Ciências Agrárias SCA; Departamento de Ciências Florestais DECIF. (Org.). ATUALIDADES EM MENSURAÇÃO FLORESTAL. 1ed. Curitiba, 2014, v. 1, p. 1-407.

LAFETÁ, B. O. **Eficiência nutricional, área foliar e produtividade de plantações de eucalipto em diferentes espaçamentos estimados com redes neurais artificiais**. 2012. 76 p. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina-MG, 2012.

LAFETÁ, B. O.; SANTANA, R. C.; NOGUEIRA, G. S.; PENIDO, T. M. A.; COUTO, L. Área foliar específica e clorofila em eucalipto estimadas por redes neurais artificiais. **Biomassa & Energia**, Viçosa, v. 5, n. 1, p. 67-75, 2012.

LEAL, F. A.; MIGUEL, E. P.; MATRICARDI, E. A. T.; PEREIRA, R. S. Redes neurais artificiais na estimativa de volume em um plantio de eucalipto em função de fotografias hemisféricas e número de árvores. **Rev. Bras. Biom.**, São Paulo, v. 33, n. 2, p. 233-249, 2015.

LEITE, H. G.; SILVA, M. L. M.; BINOTI, D. H. B.; FARDIN, L.; TAKIZAWA, F. H. Estimation of inside-bark diameter and heartwood diameter for *Tectona grandis* Linn. trees using artificial neural networks. **European Journal of Forest Research**, v. 130, n. 2, p. 263-269, 2011a.

LEITE, H.; CASTRO, R.; SILVA, A.; JÚNIOR, C.; BINOTI, D.; CASTRO, A. F.; BINOTI, M. Classificação da capacidade produtiva de povoamentos de eucalipto utilizando diâmetro dominante. **Silva Lusitana**, Lisboa, v. 19, n. 2, p. 181-195, 2011b.

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

LIMA JUNIOR, L. M. de. **Utilização de técnicas multivariadas na classificação de fases de crescimento da Leucena**. 78 p. Dissertação (Mestrado em Biometria) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife-PE, 2006.

MACHADO, S. A.; OLIVEIRA, E. B. de; CARPANEZZI, A. A.; BARTOSZECK, A. C.P.S. Classificação de sítio para bracingais na região metropolitana de Curitiba. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 35, p. 21-37. 1997.

MACHADO, S. A. Curvas de índice de sítio para plantações de *Pinus taeda* L. na região central do estado do Paraná. **Revista Floresta**, v. 11, n. 2, p. 4-18, 1980. Disponível em: <<http://ojs.c3sl.ufpr.br/ojs2.2.4/index.php/floresta/article/view/6270>>. Acesso em: 20 maio 2016.

MAEDA, E. E.; FORMAGGIO, A. R.; SHIMABUKURO, Y. E.; ARCOVERDE, G. F. B.; HANSEN, M. C. Predicting forest fire in the Brazilian Amazon using MODIS imagery and artificial neural networks. **International Journal of Applied Earth Observation and Geoinformation**, Amsterdam, v. 11, p. 265-272, 2009.

MARCOLIN, M. **Polimorfismo e tamanho de amostra para construção de curvas de índice de sítio para *Pinus taeda* L., no segundo Planalto Paranaense**. Curitiba: UFPr, 1990. 64 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Paraná, 1990.

MARTINS, E. F. P. **Curvas de índice de sítio para *Leucena [Leucaena leucocephala (Lam.) de Wit]* no agreste de Pernambuco**. 2006. 94 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Pernambuco, Recife, 2006.

MELLO, J. M. de; BATISTA, J. L. F.; OLIVEIRA, M. S. de; RIBEIRO JÚNIOR, P. J. Estudo da dependência espacial de características dendrométricas para *Eucalyptus grandis*. **Cerne**, Lavras, v. 11, n. 2, p. 113-126, abr./jun. 2005.

MINSKY, M.; PAPER, S. **Perceptrons: An Introduction to Computational Geometry**. MIT Press, Cambridge. 1969.

NASCIMENTO, F. A. F. do; DIAS, A. N.; FIGUEIREDO FILHO, A.; MIRANDA, G. de M.; ARCE, J. E. Sistema de crescimento e produção para povoamentos de *Pinus taeda* na região norte de Santa Catarina. **Cerne**, v. 21, n. 2, p. 235-242, 2015.

OLIVEIRA, M. L. R.; LEITE, H. G.; NOGUEIRA, G. S.; GARCIA, S. L. R.; SOUZA, A. L. de. Classificação da capacidade produtiva de povoamentos não desbastados de clones de eucalipto. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 11, p. 1559-1567, nov. 2008.

ORTIZ, J. L.; VETTORAZZI, C. A.; COUTO, H. T. Z.; GONÇALVES, J. L. M. Relações espaciais entre o potencial produtivo de um povoamento de eucalipto e atributos do solo e do relevo. **Scientia Florestalis, Piraciaba**, n. 72, p. 67-79, 2006.

OSÓRIO, F.; BITTENCOURT, J. R. **Sistemas Inteligentes baseados em Redes Neurais Artificiais aplicados ao Processamento de Imagens**. In: I WORKSHOP DE INTELIGÊNCIA ARTIFICIAL UNISC – Universidade de Santa Cruz do Sul Departamento de Informática - Junho, p. 2-30, 2000.

ÖZÇELİK, R.; DIAMANTOPOULOU, M. J.; BROOKS, J. R.; JR., H. V. W. Estimating tree bole volume using artificial neural network models for four species in Turkey. **Journal of Environmental Management**, v. 91, n. 3, p. 742-753, 2010.

ÖZÇELİK, R.; DIAMANTOPOULOU, M. J.; CRECENTE-CAMPO, F.; ELER, U. Estimating Crimean juniper tree height using nonlinear regression and artificial neural network models. **Forest Ecology and Management**, v. 306, p. 52-60, 2013.

PARKER, D. **Learning-Logic**. Invention Report S81-64, File 1, Office of Technology Licensing, Stanford University, Stanford. Oct. 1982.

PARKER, H. A. Addenda [to Roth, 1916]. **Forest. Quart.** v. 14, p. 12-13, 1916.

PARVIAINEN, J., NAUMANN, N. A Finlândia e suas florestas. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 1/2, n. 16, p. 5-18, 1986.

REGAZZI, A. J. Teste para verificar a igualdade de parâmetros e a identidade de modelos de regressão não linear. **Revista Ceres**, v. 50, p. 9-26, 2003.

ROSENBLATT, R. **Principles of Neurodynamics**. Spartan, New York, 1959.

ROTH, F. **Concerning site**. **Forest. Quart.** v. 14, p. 3-12, 1916.

RUMELHART, D.; HINTON, G.; WILLIAMS, R. **Learning Internal Representations by Error Propagation**. ICS Report 8506, Institute for Cognitive Science, University of California at San Diego, La Jolla. Sept. 1985.

RUMELHART, D.; HINTON, G.; WILLIAMS, R. **Learning Internal Representations by Error Propagation**. In : Rumelhart & McClelland: Parallel Distributed Processing - Explorations in the Microstructure of Cognition - v.1: Foundations. Cambridge: MIT Press, 1986.

SANTOS, R. C. dos. **Curvas de crescimento em altura e índice de sítio de povoamentos clonais de Eucalyptus spp. na chapada do Araripe, Pernambuco**. 2012. 84 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, 2012.

SCAVINSKI, V. **Projeção da produção utilizando curvas de sítio anamórficas e polimórficas para plantios de Eucalyptus grandis W. Hill. Ex. Maiden**. 2014. 75 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Estadual do Centro Oeste, Irati. 2014.

SCHNEIDER, P. R.; SCHNEIDER, P. S. P. **Introdução ao manejo florestal**. 2. ed. Santa Maria: FACOS-UFSM, 2008, 566 p.

SCHNEIDER, P.R., SILVA, J.A. Índice de sítio para acácia-negra, *Acacia mearnsii* de Wild. **Brasil Florestal**, Brasília, v. 1, n. 42, p. 53-58, 1980.

SCHONAU, A. P. G. **A site evaluation study in black wattle (*Acacia mearnsii* de Wild)**. Local: Univ. von Stellenbosch, 1969, 214 p.

SCHOENINGER, E. R.; KOEHLER H. S.; WATZLAWICK L. F.; OLIVEIRA FILHO P. C. de. Uso de redes neurais artificiais como uma alternativa para mapeamento de biomassa e carbono orgânico no componente arbóreo de florestas naturais. **Revista Ambientia**, Guarapuava, v. 4, n. 3, p. 529-549, 2008.

SCOLFORO, J. R. Curvas de índice de sítio para *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Revista do IPEF**, Piracicaba, v. 45, p. 40-47, 1992.

SCOLFORO, J. S. R. **Mensuração florestal**: Avaliação de produtividade florestal através da classificação do sítio. ESAL/FAEPE, Lavras, 1993, 451 p.

SCOLFORO, J. R. S. **Biometria florestal**: modelos de crescimento e produção florestal. Lavras: FAEPE–UFLA, 2006. 393 p.

SELLE, G. L.; SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G. Classificação de sítios para *Pinus taeda* L., através da altura dominante, para a região de Cambará do Sul, RS, Brasil. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 77-95, 1994.

SELLE, G. L.; PAULESKI, D. T.; BRAZ, E. M. **Como classificar sítios florestais através da altura dominante do povoamento**. Colombo: Embrapa Florestas, 2008, 46 p. (Documentos, n. 166).

SHEPHERD, R. F. Phytosociological and environmental characteristics of outbreak and non-outbreak áreas of the two-year cycle spruce budworm, *Choristoneura fumiferana*. **Ecology**, v. 40, p. 608-620, illus. 1959.

SILEN, R. R. Regeneration aspects of the 50-year-old Douglas fir heredity study. West. **Reforestation Coord. Comm.** (Spokane, Wash., 1964) Proc. p. 35-39, illus. West. Forest, and Conserv. Ass., Portland, Oreg, 1965.

SILVA, R. M. A.; BRANDÃO, F. G.; BALEEIRO, G. B.; VALENTIM, F. L.; MENDONÇA, A. R.; PIRES, D. M. **Fuzzy and neuro-fuzzy estimates of the total height of eucalyptus trees**. In: *2008 ACM symposium on Applied Computing*. New York, NY, USA: ACM, 2008, p. 1772–1776.

SILVA, M. L. M.; 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, n. 6, p. 1133–1139, 2009.

SILVA, F. da.; PIMENTEL, A.; CORTE, A. P. D.; SANQUETTA, C. R. Classificação de sítio para *Pinus caribaea* var. *hondurensis* na região do Triângulo Mineiro.

**Revista Acadêmica: Ciências Agrárias e Ambientais**, Curitiba, v. 11, Supl. 1, p. S105-S112, 2013.

SILVA, J. P. M ; SOUZA, D. C. ; LOPES, I. L. ; OLIVEIRA, L. G. G. ; CABACINHA, C. D. ; ASSIS, A. L. de ; MAIA, R. D. . Redes neuro-fuzzy para estimação volumétrica de espécies do cerrado stricto sensu. In: III Simpósio Nacional de Inventário Florestal, 2014, Manaus. **Anais do III Simpósio Nacional de Inventário Florestal**, 2014. v. 1. p. 17-17.

SOARES, F. A. A. M. N.; FLÔRES, E. L.; CABACINHA, C. D.; CARRIJO, G. A.; VEIGA, A. C. P. Recursive diameter prediction and volume calculation of eucalyptus trees using Multilayer Perceptron Networks. **Computers and Electronics in Agriculture**, Amsterdam, v. 78, p. 19–27, 2011a.

SOARES, P. L. B.; SILVA, J. P. da. Aplicação de Redes Neurais Artificiais em Conjunto com o Método Vetorial da Propagação de Feixes na Análise de um Acoplador Direcional Baseado em Fibra Ótica. **Revista Brasileira de Computação Aplicada**, Passo Fundo, v. 3, n. 2, p. 58-72, 2011.

SOARES, F. A. A. M. N. **Predição Recursiva de Diâmetros de Clones de Eucalipto utilizando Rede Perceptron de Múltiplas Camadas para o cálculo de volume**. 2012. 111 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 2012.

SOARES, F. A. A. M. N.; FLORES, E. L.; CABACINHA, C. D.; CARRIJO, G. A.; VEIGA, A. C. P. Recursive diameter prediction for calculating merchantable volume of Eucalyptus clones without previous knowledge of total tree height using artificial neural networks. **Applied Soft Computing**, Elsevier, v. 12, n. 8, p. 2030–2039, 2012.

SOUZA, D. C.; SILVA, J. P. M; PINTO, L. O. R. ; GONÇALVES, A. F. A. ; FERREIRA, P. H. B. ; CABACINHA, C. D. ; ASSIS, A. L. de ; MAIA, R. D. . Redes neurais para estimativa de peso seco de espécies do cerrado stricto sensu. In: III Simpósio Nacional de Inventário Florestal, 2014, Manaus. **Anais do III Simpósio Nacional de Inventário Florestal**, v. 1. p. 22-22, 2014.

SPRING, S.N. Site and site classes. **J. Forest**. v.15, p. 102-103, 1917.

SPURR, S. H. **Forest inventory**. New York: The Ronald Press, 1952, 476 p.

STERRETT, W. D. **Forest management of loblolly pine in Delaware, Maryland, and Virginia**. U. S. D. p. Agr. Bull. II, 59 p., illus, 1914.

TÉO, S. J.; BRESSAN, D. R.; COSTA, R. H. da. Uso de modelos estatísticos para classificação de sítios em povoamentos de *Pinus taeda* na região de Caçador – SC. **Revista Floresta**, Curitiba, PR, v. 41, n. 1, p. 179-188, 2011.

THOMÉ, A. C. G. **Redes Neurais - uma Ferramenta para KDD E DATA MINING**. 2005. Disponível em: <[http://equipe.nce.ufrj.br/thome/grad/nn/mat\\_didatico](http://equipe.nce.ufrj.br/thome/grad/nn/mat_didatico)>. Acessado em: 15 abr. 2015.

TONINI, H.; FINGER, C. A. G.; SCHNEIDER, P. R.; SPATHELF, P. Crescimento em altura de *Pinus elliottii* Engelm. na região de Piratini no Rio Grande do Sul, Brasil. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, n. 3, p. 417-423, 2001.

TONINI, H.; FINGER, C. A. G.; SCHNEIDER, P. R.; SPATHELF, P. Comparação gráfica entre curvas de índice de sítio para *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* desenvolvidas no Sul do Brasil. **Ciência Florestal**, Santana Maria, v. 12, n. 1, p. 143-152, 2002.

VAN ARSDEL, E. P. **Growing white pine in the Lake States to avoid blister rust.**\* U. S. Dep. Agr., Forest Serv., Lake States Forest Exp. Sta. Sta. Pap. 92, 11 p., illus. St. Paul, Minn, 1961.

VAN LAAR, A. Biomass parameters in studies of the effect of site and silviculture on production. In: IUFRO WORLD CONGRESS, 17., 1981, Kyoto. **Anais...** Kyoto: IUFRO, 1981, p.120-124.

VIDAL, O. G. **Índice de sítio para *Pinus insigne* em Chile**. Santiago/Chile: Instituto Florestal, 1969, 32 p.

WATSON, R. Site determination, classification, and application. **J. Forest**. v. 15, p. 552-563. 1917.

WIDROW, B. Generalization and Information Storage in Networks of ADALINE Neurons. In: **Self-Organization Systems**. Spartan Books. Washington, 1962, p. 435-461.

XIAO, R.; CARANDE, R.; GHIGLIA, D. A Neural Network Approach for Tree Height Estimation Using IFSAR Data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 5, p. 345–348, 1998.

## CAPÍTULO 1:

### CLASSIFICAÇÃO DA CAPACIDADE PRODUTIVA DE EUCALIPTO UTILIZANDO CURVAS DE SÍTIO ANAMÓRFICAS E POLIMÓRFICAS PELO MÉTODO DA DIFERENÇA ALGÉBRICA

#### RESUMO

Este estudo teve como objetivo testar o anamorfismo dos dados em estudo e selecionar o modelo que melhor se ajustou para a classificação de sítios florestais a partir do método da diferença algébrica e comparar a classificação gerada através da estabilidade do Índice de Sítio (IS) entre as curvas anamórficas e polimórficas. Os dados dendrométricos utilizados neste estudo totalizam 28.150 registros provenientes de 8.819 parcelas permanentes, oriundos de povoamentos de clones de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, localizados no extremo Sul da Bahia, em primeira rotação, com idades variando de 0,80 até 12,70 anos. Foi realizado o teste de anamorfismo para confirmar o padrão de crescimento da floresta a partir da análise de regressão linear entre o IS estimado, para confirmar que o índice de sítio não depende da idade, mas sim da capacidade produtiva do local. Foram testados cinco modelos de regressão não linear, sendo eles: Chapman e Richards, Gompertz, Weibull, Monomolecular e Logístico, para gerar curvas de sítio pelo método da diferença algébrica com curvas do tipo anamórficas e polimórficas. Os dados em estudo apresentam um padrão de crescimento polimórfico, portanto, a utilização do método da diferença algébrica para classificação de sítios florestais foi satisfatória. Os modelos de regressão testados são capazes de classificar a capacidade produtiva do local de forma satisfatória, a partir de famílias de curvas dos dois tipos, exceto o modelo Logístico na sua formulação polimórfica, que não se ajustou bem aos dados. O modelo de Chapman e Richards foi o selecionado neste estudo, pois apresentou uma superioridade em relação aos demais, para estatísticas de precisão e na estabilidade das parcelas, para uma família de curvas anamórficas. Embora os dados apresentem um padrão de crescimento polimórfico, o conjunto de curvas anamórficas geradas pelos modelos consegue realizar a classificação de sítios florestais de forma superior às curvas polimórficas, se analisado os resultados de

precisão estatística, teste de estabilidade e análise crítica (gerencial) do conjunto de resultados obtidos.

**Palavras-chave:** Teste de Anamorfismo, curvas de sítio, capacidade produtiva.

## 1. INTRODUÇÃO

O Brasil, graças às suas condições edafoclimáticas, sua disponibilidade de terras e a tecnologia desenvolvida pelas empresas nacionais, é um dos poucos países capazes de fornecer ao mundo uma gama de bioprodutos que estão em fase de desenvolvimento. Dentre estes produtos, estão os advindos de florestas plantadas para fins comerciais. Atualmente, estas florestas ocupam aproximadamente 7,74 milhões de hectares, o que corresponde a 0,9% do território nacional, e aproximadamente 72% deste total é do gênero *Eucalyptus* (IBA, 2015).

Com o contexto mundial voltado para a sustentabilidade nos últimos anos, as empresas do setor estão se debruçando sobre o desafio de aprimorar as técnicas de manejo aplicadas às florestas plantadas. Sendo assim, a classificação de sítios se torna um importante parâmetro para estabelecer regimes de gestão, pois oferece vantagens para o manejador florestal, permitindo estratificar o povoamento em unidades equiprodutivas (DAVID, 2014) e, conseqüentemente, subsidiando tomadas de decisão sobre o povoamento.

Além disso, conhecer a capacidade produtiva ou sítio é um fator básico no planejamento da produção madeireira de uma empresa florestal, pois permite juntamente com o grau de utilização do local, a idade, e outras variáveis que influenciam o desenvolvimento das árvores, projetar o crescimento e a produção de um povoamento florestal (CAMPOS e LEITE, 2013).

Miguel et al. (2011) afirmaram que existem diferentes formas de classificação de sítios: por meio de fatores edáficos, climáticos, fisiográficos, a partir da vegetação rasteira local, de multifatores de sítio, de registros históricos e de elementos dendrométricos (volume, área basal e altura). Porém, as curvas de índice de local constituem-se atualmente no método mais prático e difundido para classificar a produtividade florestal.

Para a classificação da capacidade produtiva de florestas equiâneas, a média da altura dominante correlacionada com a idade tem sido considerado o método mais prático e usual (SELLE et al., 2008), uma vez que esta variável representa a resposta aos fatores ambientais inter-relacionados e não sofre significativa influência dos tratamentos silviculturais e da competição (TONINI et al., 2002).

Dentre os principais métodos existentes para construir curvas de índices de local, estão: curva guia, equação das diferenças e predição de parâmetros

(CLUTTER et al., 1983). Campos e Leite (2013) citam, além desses três, o método da atribuição preliminar de índices de local e o método de Hammer. Porém, o método da curva guia ainda é o mais utilizado (DIAS et al., 2005), sendo que este método gera apenas curvas anamórficas. Entretanto, diversos estudos demonstraram, a partir de testes de anamorfismo, a necessidade de utilização de curvas polimórficas (SCAVINSKI, 2014).

No Brasil, o emprego de curvas polimórficas teve início em 1980, com o trabalho de Machado (1980), que utilizou dados de análise de tronco de 64 árvores de *Pinus taeda*, na região central do Paraná. Posteriormente, outros trabalhos foram desenvolvidos, como o de Marcolin (1990), Scolforo (1992), Cunha Neto et al. (1996); Dias et al. (2005); Scavinski (2014) e Nascimento et al. (2015).

Outro fator de extrema importância que deve ser analisado no processo da classificação da capacidade produtiva em florestas é a estabilidade das curvas de sítios, sendo esta de fundamental importância para seu uso com precisão (SCOLFORO; MACHADO, 1988). A variação de uma mesma parcela entre diferentes classes de sítio pode gerar uma classificação incoerente que muitas vezes é tomada de maneira arbitrária pelo manejador, além de dificultar a aplicação do método. Entretanto, foi possível observar que os estudos que já foram realizados para a classificação de sítios florestais, tanto a partir de curvas anamórficas como polimórficas, não levaram em consideração a estabilidade das curvas de sítios geradas pelos métodos e modelos aplicados.

Nesse contexto, este estudo teve como objetivo testar o anamorfismo dos dados e selecionar o modelo que melhor se ajustou à classificação de sítios, comparando a classificação gerada a partir do método da diferença algébrica, considerando a estabilidade do índice de sítio (IS) entre as curvas anamórficas e polimórficas.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Caracterização dos dados

Os dados utilizados neste estudo foram provenientes de plantios comerciais de híbridos de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, implantados com espaçamento variando entre 9 e 12 m<sup>2</sup> por planta, conforme padrão da empresa, localizados no extremo Sul da Bahia, abrangendo uma área de aproximadamente 96.000 ha, em primeira rotação, com idades de medição variando de 0,80 até 12,70 anos.

O clima é, segundo a classificação de Köppen, Tropical Equatorial (Af): chuvoso, quente e úmido, característico do litoral e Tropical de Monção (Am): quente e úmido, com precipitações inferiores ao anterior. A região apresenta temperatura média anual de 24°C, com pequena amplitude.

Os dados dendrométricos totalizaram 28.150 registros provenientes de 8.819 parcelas permanentes. As parcelas eram predominantemente de 260 m<sup>2</sup> de área, podendo haver uma variação entre 200 e 400 m<sup>2</sup> de uma minoria dos dados. Em cada parcela mediu-se: a circunferência à altura do peito, tomado a 1,30 m do solo (CAP) de todas as árvores; altura total das cinco primeiras árvores; e altura total das árvores dominantes, que foram identificadas segundo o conceito de Assmann, correspondendo às três árvores mais grossas da parcela. A Tabela 1 apresenta a descrição dos dados em estudo.

**Tabela 1** – Valores mínimo, médios, máximos e o desvio padrão da Idade (anos), Área Basal (m<sup>2</sup>/ha), Diâmetro médio quadrático (cm), Precipitação (mm). Altura Dominante (m) dos dados do estudo.

Parâmetro	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão
Idade (anos)	0,80	4,40	12,70	1,77
Altura dominante (m)	5,50	25,70	43,00	6,20

Fonte: elaborada pelo autor (2016).

## 2.2. Teste de Anamorfismo

O teste de anamorfismo consiste basicamente em verificar o padrão de desenvolvimento das curvas das alturas dominantes com a idade. Implementou-se o teste que verifica a existência da relação linear entre os índices de sítio e as alturas dominantes médias nas várias idades (KING, 1966; CAMPOS et al., 1985; SCOLFORO e MACHADO, 1988; SCOLFORO, 1992).

Foi utilizado o modelo de Chapman e Richards como base para o teste por este se configurar como um modelo biológico e bastante flexível, que consegue representar bem os dados nas idades mais avançadas (MACHADO et al., 1997), além de ser um dos modelos mais utilizados para o ajuste de dados biológicos de espécies florestais, conforme observado em diversos trabalhos, como os de Selle et al. (1994); Palahí (2004), Bravo-Oviedo et al. (2004), Scavinski (2014) e David et al. (2015).

No entanto, antes de verificar essa relação linear por meio de regressão linear simples, foi necessário encontrar o valor do índice de sítio correspondente a cada valor de  $h_{dom}$ , por meio da seguinte expressão matemática:

$$IS = h_{dom} \left( \frac{1 - e^{\beta_1 I_{ref}}}{1 - e^{\beta_1 I}} \right)$$

Em que:  $IS$  = índice de sítio;  $h_{dom}$  = altura dominante;  $I_{ref}$  = idade de referência;  $I$  = idade para a qual a relação linear entre  $IS - h_{dom}$  será ajustada;  $\beta_1$  = coeficiente do modelo estatístico ajustado para classificação de sítios.

Posteriormente, foi verificada a existência de relação linear entre os índices de sítio e as alturas dominantes médias nas diversas idades, por meio do ajuste do seguinte modelo estatístico:

$$IS = \beta_0 + \beta_1 h_{dom}$$

Em que:  $IS$  = índice de sítio;  $h_{dom}$  = altura dominante média nas diferentes idades;  $\beta_{is}$  = coeficientes estimados pelo ajuste do modelo.

O modelo linear simples foi ajustado para confirmar a hipótese de que há forte relação linear entre as variáveis envolvidas, expressando que o índice de sítio não depende da idade, mas sim da capacidade produtiva do local.

Segundo Scolforo (1992), para que o crescimento seja anamórfico, a interseção  $\beta_0$  deve ser igual a zero e a inclinação ( $\beta_1$ ) deve ser menor que 1 nas idades superiores à idade de referência, igual a 1 na idade de referência e maiores que 1 para as menores idade.

### 2.3. Geração das curvas de sítio pelo método da diferença algébrica

O método da diferença algébrica foi proposto inicialmente por Bailey e Clutter (1974), para o desenvolvimento de curvas de índice de sítio anamórficas ou polimórficas, invariantes em relação à idade de referência. Este método faz uso de pares de medidas consecutivas da variável a ser estimada.

O método, que consiste na seguinte premissa: considerando que a interseção do modelo utilizado é constante sobre os sítios, mas a inclinação é um parâmetro específico do sítio, ou seja, tem diferentes valores, então, tem-se um conjunto de curvas altura dominante-idade polimórficas. Se é assumido que a interseção é o parâmetro específico do sítio e a inclinação é constante para todos os sítios, então curvas anamórficas serão geradas (SCOLFORO, 2006).

Neste trabalho, foram geradas curvas de sítio pelo método supracitado para os modelos que estão apresentados na Tabela 2 em sua forma original. Foi assumida uma idade-índice de sete anos por estar em torno da idade de rotação da espécie em estudo.

**Tabela 2** – Modelos não lineares testados para estimativa da altura de árvores dominantes na sua formulação original.

Modelo	Equação
Chapman e Richards	$Hd = \beta_0 (1 - e^{-\beta_1 d})^{\beta_2}$
Gompertz	$Hd = \beta_0 e^{-\beta_1 e^{-\beta_2 d}}$
Weibull	$Hd = \beta_0 (1 - e^{-\beta_1 d \beta_2})$
Monomolecular	$Hd = \beta_0 (1 - \beta_1 e^{-\beta_1 d})$
Logístico	$Hd = \frac{\beta_0}{1 + \beta_1 e^{\beta_2 d}}$

Onde:  $Hd$  = altura das árvores dominantes;  $\beta'_s$  = parâmetros a serem estimados;  $e$  = exponencial.  
Fonte: elaborada pelo autor (2016).

Como descrito anteriormente, o método utilizado neste estudo tem como premissa a modificação algébrica dos modelos originais, sendo assim, a Tabela 3 apresenta os modelos testados após a realização das modificações algébricas para gerar curvas anamórficas e polimórficas, conforme descrito por Carrero et al. (2008) e Diéguez-Aranda et al. (2005).

**Tabela 3** – Modelos testados para gerar curvas de índice de sítios com a modificação algébrica para obtenção de curvas anamórficas e polimórficas.

Modelo	Curvas Anamórficas	Curvas Polimórficas
Chapman e Richards	$Hd_2 = Hd_1 \left[ \frac{(1 - e^{-\beta_1 Id_1})^{\beta_2}}{(1 - e^{-\beta_1 Id_2})} \right]$	$Hd_2 = \beta_0 \left[ 1 - \left[ 1 - \left( \frac{Hd_1}{\beta_0} \right)^{1/\beta_2} \right]^{\frac{Id_1}{Id_2}} \right]^{\beta_2}$
Gompertz	$Hd_2 = Hd_1 \left[ \frac{e^{-\beta_1 e^{(-\beta_2 Id_1)}}}{e^{-\beta_1 e^{(-\beta_2 Id_2)}}} \right]$	$Hd_2 = \beta_0 \left[ \frac{Hd_1}{\beta_0} \right]^{e^{(-\beta_2 (Id_1 - Id_2))}}$
Weibull	$Hd_2 = Hd_1 \left[ \frac{1 - e^{-\beta_1 Id_1^{\beta_2}}}{1 - e^{-\beta_1 Id_2^{\beta_2}}} \right]$	$Hd_2 = \beta_0 \left/ \left[ 1 - \left[ 1 - \frac{Hd_1}{\beta_0} \left( \frac{Id_1}{Id_2} \right)^{\beta_2} \right] \right] \right.$
Monomolecular	$Hd_2 = Hd_1 \left( \frac{1 - \beta_2 e^{-\beta_1 Id_1}}{1 - \beta_2 e^{-\beta_1 Id_2}} \right)$	$Hd_2 = \beta_0 \left[ 1 - \beta_2 \left( 1 - \left( \frac{Hd_1}{\beta_0} \right) \right)^{\left( \frac{Id_1}{Id_2} \right)} \right]$
Logístico	$Hd_2 = Hd_1 \left[ \frac{1 + \beta_2 e^{\beta_1 Id_2}}{1 + \beta_2 e^{\beta_1 Id_1}} \right]$	$Hd_2 = \beta_0 \left/ \left( (1 + \beta_2) \left[ \left( \left( \frac{\beta_0}{Hd_1} \right) - 1 \right) / \beta_2 \right]^{\frac{Id_1}{Id_2}} \right) \right.$

Onde:  $Hd_1$ = alturas das árvores dominantes observada na idade 1;  $Hd_2$ = alturas das árvores dominantes observada na idade 2 (medição posterior);  $Id_1$ = Idade da parcela na primeira medição (anos);  $Id_2$ = Idade da parcela na segunda medição (anos);  $\beta'_s$  = parâmetros a serem estimados;  $e$  = exponencial.

Fonte: elaborada pelo autor (2016).

A precisão das estimativas foi avaliada empregando-se o coeficiente de correlação ( $r$ ) entre alturas dominantes observadas e estimadas, e também pela raiz quadrada do erro médio em metros (RMSE), e em porcentagem (RMSE%), conforme as Equações 2 e 3. De forma a avaliar a presença de dados discrepantes e possível tendenciosidade nas estimativas, foram gerados gráficos de dispersão dos erros percentuais (Equação 4).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Hd - \widehat{Hd})^2}{n}} \quad (2)$$

$$RMSE\% = \left( \frac{RMSE}{\widehat{Hd}} \right) 100 \quad (3)$$

$$Erro (\%) = \left( \frac{Hd - \widehat{Hd}}{\widehat{Hd}} \right) 100 \quad (4)$$

Onde:  $Hd$  = Altura dominante observada,  $\widehat{Hd}$  = Altura dominante estimada,  $\overline{Hd}$  = média das alturas dominantes observadas em todas as parcelas e  $n$  = número total de observações.

Os parâmetros dos modelos foram estimados pelo método de Levenberg–Marquardt, com o auxílio do *software R Statistical Computing* (versão 3.2.1). Já as curvas de sítio foram desenvolvidas com o auxílio do software Excel®.

#### **2.4. Estabilidade das curvas índice de sítio**

A estabilidade de classificação se torna prioritária na análise da classificação de sítios florestais, pois fornece uma informação prática no procedimento de definição do índice de sítio, visto que, modelos que geram oscilação das classes de sítio para diferentes idades de medição da parcela, dificultam ao manejador a tomada de decisão na definição do sítio estudado.

O procedimento para a avaliação da estabilidade consistiu em interpretar a constância da classificação dos sítios para os modelos testados. Assim, um modelo que apresenta uma classificação mais estável pode ser definido como a capacidade do modelo ajustado de manter uma parcela classificada numa mesma classe de sítio do primeiro ao último ano observado (FIGUEIREDO, 2005).

Para testar se as curvas de sítio apresentam estabilidade ao longo das remediações, após estimativa do índice de sítio, foram contabilizadas as parcelas que mudavam de classe de sítio a cada idade.

Desse modo, a equação mais estável foi aquela que apresentou um maior número de parcelas que não mudaram de classe nenhuma vez em todas as suas observações. Portanto, quanto maior o número de parcelas, ou porcentagem de parcelas que não mudaram de classe, melhor foi a equação de classificação de sítio.

Além disso, para comprovar a estabilidade e a confiabilidade das curvas índices de sítio, foi realizada a verificação gráfica das alturas dominantes reais, de árvores oriundas dos povoamentos estudados, sobre as curvas de índice de sítio geradas pela função selecionada, seguindo o procedimento recomendado por King (1966) e Machado (1980).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 4 apresenta os resultados do teste de anamorfismo a partir do ajuste do modelo linear simples entre o índice de sítio (IS) e altura dominante, para as diferentes idades. O teste busca confirmar a hipótese de que há forte relação linear entre as variáveis envolvidas, expressando que o índice de sítio não depende da idade, mas sim da capacidade produtiva do local.

**Tabela 4** – Resultados dos ajustes dos modelos lineares para índice de sítio (IS) e altura dominante (Hdom) do teste de anamorfismo.

Idade	$\beta_0$	$\beta_1$	R <sup>2</sup>
1	3,1931 <sup>***</sup>	2,7207	0,9359
2	1,7415 <sup>***</sup>	1,8106	0,9491
3	0,4785 <sup>***</sup>	1,4424	0,9783
4	0,6149 <sup>***</sup>	1,2258	0,9898
5	0,2456 <sup>***</sup>	1,1173	0,9939
6	0,2488 <sup>***</sup>	1,0428	0,9969
7	0,2703 <sup>***</sup>	0,9922	0,9983
8	0,2608 <sup>***</sup>	0,9596	0,9989
9	0,1308 <sup>**</sup>	0,9396	0,9993
10	-0,0093 <sup>ns</sup>	0,9267	0,9999
11	0,0044 <sup>ns</sup>	0,9138	0,9999
12	0,0890 <sup>ns</sup>	0,9047	0,9999

Onde: \*\*\* = significante a 0, \*\* = significante a 0.001.

Fonte: elaborada pelo autor (2016).

Com base na Tabela 4, é possível observar que em todas as idades existiu uma alta correlação entre o índice de sítio e a altura dominante. Os coeficientes de determinação (R<sup>2</sup> ajust) foram sempre superiores a 0,9359 e se mantendo superiores a 0,99 a partir do quinto ano. Para a inclinação ( $\beta_1$ ), atendeu ao pressuposto do anamorfismo, onde o seu valor foi maior do que 1 nas menores idades, igual a 1 na idade de referência, neste caso aos 7 anos, e menor que 1 nas idades superiores à idade de referência.

Entretanto, para confirmar que o crescimento do povoamento apresenta um padrão anamórfico, a interseção  $\beta_0$  deve ser igual a zero em todas as idades. O que não foi confirmado neste estudo, pois até a idade de 9 anos, superior à idade de referência, que tem como base a rotação do povoamento, a interseção  $\beta_0$  apresentou diferença estatística significativa, mostrando-se diferente de zero, confirmando, assim, o padrão de crescimento polimórfico para os dados em estudo.

Este resultado pode ter sido influenciado pela base de dados, que possui um grande número de parcelas (8.819 parcelas, totalizando 28.150 pares de dados de altura dominante – idade), distribuídos em aproximadamente 96.000 hectares de floresta. Devido a estes fatores, era esperado encontrar um padrão de crescimento diferente entre as parcelas, o que é caracterizado pelo padrão polimórfico de curvas. Além disso, as medições das parcelas começaram em idades iniciais do povoamento, até mesmo inferior a 1 ano, o que permite caracterizar grande variabilidade no crescimento das plantas que pode ocorrer nestas idades, principalmente em espécies de rápido crescimento.

Confirmado o crescimento polimórfico em altura dos dados, justifica-se a aplicação do método da diferença algébrica para a classificação da capacidade produtiva, pois o mesmo é capaz de gerar curvas anamórficas e polimórficas.

Resultado semelhante foi encontrado por Scavinski (2014) em plantios de *Eucalyptus grandis* W. Hill. Ex. Maiden, no estado de São Paulo, nas regiões de Botucatu e Itapetininga. Além deste, curvas polimórficas para a classificação de sítios florestais também foram utilizadas com sucesso e sem tendenciosidades nos trabalhos de King (1966), Machado (1980), Marcolin (1990), Diéguez-Aranda et al. (2005), Patrício (2006) e Carrero et al. (2008).

Cabe ressaltar que existem muitos estudos que encontraram resultados que diferem deste, como foi observado por Scolforo e Machado (1988a,b), Scolforo (1992), Téó et al. (2011) e David (2014), para diferentes espécies de Pinus. Além destes, Campos et al. (1985) verificaram comportamento anamórfico para *Eucalyptus grandis* na região de Bom Despacho-MG. Cunha Neto et al. (1996) para *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla* na região de Luís Antonio-SP, e Miguel (2011), em estudos com *Eucalyptus urophylla* (S.T. Blake) na região norte do estado de Goiás.

A Tabela 5 apresenta os resultados das estatísticas, para os ajustes dos modelos testados na sua forma original.

Observa-se que todos os modelos apresentaram resultados satisfatórios para a estimativa de alturas dominantes do povoamento em estudo. Verificou-se um coeficiente de correlação variando de 0,9160 a 0,9203 e RMSE (%) entre 9,683% e 9,441% para os modelos Logístico e Monomolecular, que apresentaram o pior e o melhor ajuste, respectivamente. Todos os modelos apresentaram estatísticas de

precisão próximas entre si, e operacionalmente aceitáveis, o que dificultaria a seleção de apenas um para a aplicação.

**Tabela 5** – Estatísticas de exatidão dos diferentes modelos utilizados para estimativa da altura de árvores dominantes (Hdom) na sua forma original.

Modelo	Estatísticas		
	Correlação	RMSE (m)	RMSE (%)
Chapman e Richards	0,9201	2,430	9,452
Gompertz	0,9184	2,455	9,551
Weibull	0,9202	2,431	9,582
Monomolecular	0,9203	2,427	9,441
Logístico	0,9160	2,489	9,683

Fonte: elaborada pelo autor (2016).

Téo et al. (2011) encontraram que o modelo Monomolecular foi mais adequado para construção das curvas de índice de sítio para povoamentos de *Pinus taeda* na região de Caçador, no estado de Santa Catarina, com coeficiente de determinação de 0,96964 e Syx (m) de 1,8608 e Syx (%) de 8,3920. No mesmo estudo foi observada uma semelhança na precisão obtida entre os modelos de Chapman e Richards e o Monomolecular, porém, o primeiro foi selecionado por apresentar ligeira superioridade na distribuição de resíduos.

De acordo com o teste de anamorfismo, os dados em estudo apresentaram um padrão de crescimento polimórfico. Sendo assim, foram ajustados os modelos após a modificação algébrica para a obtenção de curvas dos tipos anamórficas e polimórficas.

A Tabela 6 apresenta os coeficientes ajustados para a estimativa da altura dominante e a estatística de exatidão obtida por cada modelo.

Carrero et al. (2008), estudando povoamentos de *Eucalyptus urophylla* na Venezuela, encontrou que para curvas do tipo anamórficas, os melhores modelos que se ajustaram foram o Monomolecular, Weibull e Chapman-Richards, resultados que corroboram com este estudo, exceto para o modelo Monomolecular. Já para os modelos modificados para curvas polimórficas, Chapman e Richards se apresentou superior e não foi possível ajustar o modelo de Weibull, o que diferiu deste estudo, em que o modelo de Weibull apresentou estatísticas superiores aos demais.

**Tabela 6** – Coeficientes ajustados e estatísticas de exatidão dos modelos utilizados para estimativa da altura de árvores dominantes (Hdom) com modificação algébrica.

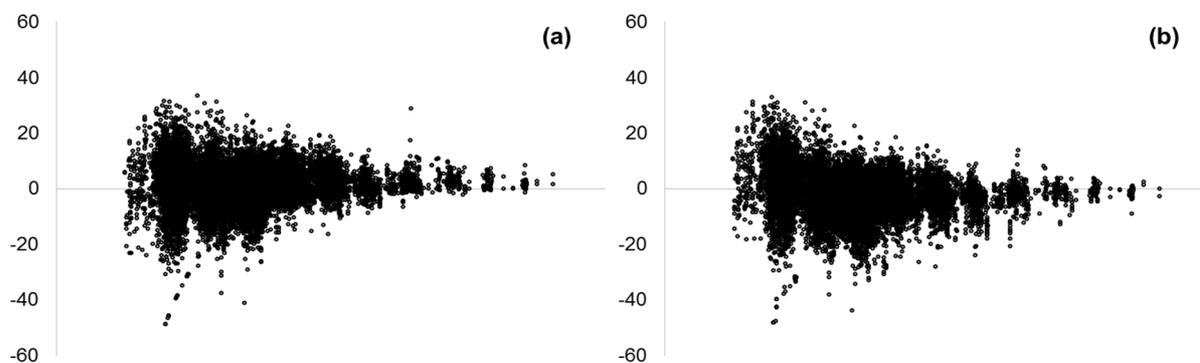
Curva	Modelo	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	Correlação	RMSE	RMSE %
Anamórfico	Chapman		-0,45755	1,40432	0,9332	1,784	6,444
	Gompertz		2,27508	0,60113	0,9301	1,824	6,590
	Weibull		0,29703	1,19072	0,9330	1,794	6,482
	Monomolecular		0,35644	0,92359	0,9377	2,080	7,515
	Logístico		0,78408	4,39586	0,9263	1,887	6,820
Polimórfico	Chapman	46,98012		0,96212	0,9370	1,977	7,143
	Gompertz	43,00021		0,25484	0,9394	1,892	6,835
	Weibull	38,69410		-	0,9454	1,577	5,699
	Monomolecular	46,78586		1,05203	0,9363	1,969	7,114
	Logístico	60,90375		1,15563	0,9274	3,846	13,896

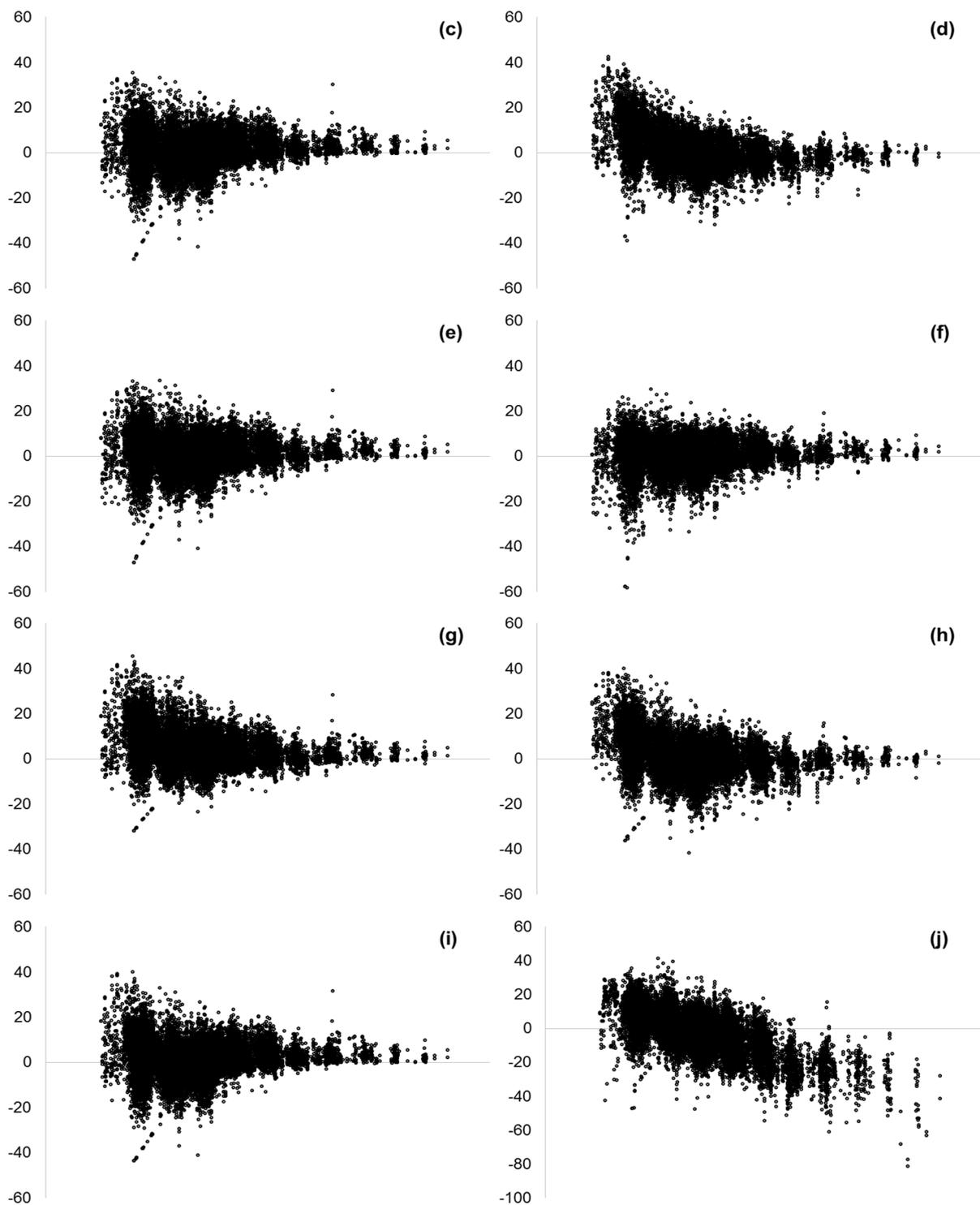
Fonte: elaborada pelo autor (2016).

Kitikidou et al. (2011), estudando o método da diferença algébrica para gerar curvas de sítios em *Pinus brutia* Ten., na Grécia, testaram os modelos de Chapman e Richards e Bailey e Clutter, modificados por Korf. O modelo de Bailey e Clutter apresentou os melhores resultados na sua formulação polimórfica, além de todas as características desejáveis, já o modelo de Chapman e Richards não se ajustou aos dados.

De acordo com Draper e Smith (1966), nenhuma equação de estimativa deve ser utilizada antes de se verificar a distribuição gráfica de resíduos, mesmo que as estatísticas da regressão sejam consideradas boas.

A Figura 1 apresenta os gráficos de dispersão dos resíduos, em porcentagem, para os cinco modelos testados para estimativa da altura dominante na formulação anamórfica e polimórfica.





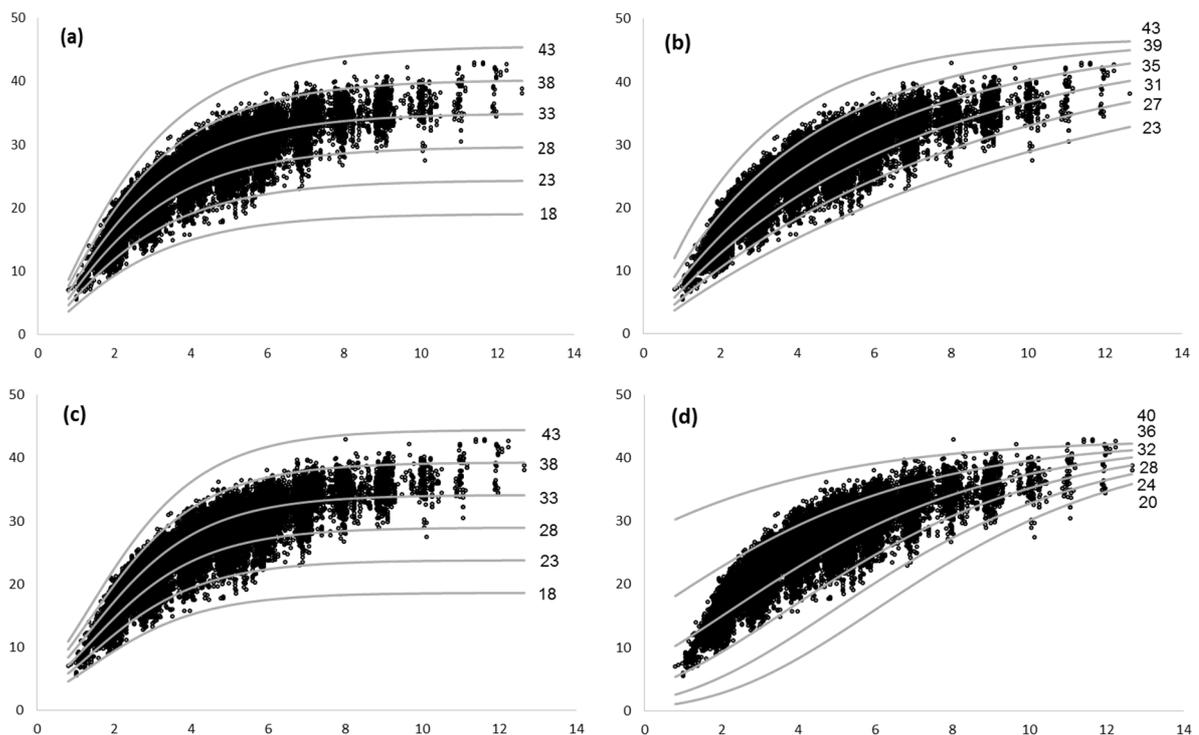
**Figura 1** – Gráfico de dispersão dos resíduos, em porcentagem, para os seguintes modelos e suas formulações algébricas: Chapman e Richards anamórficas (a) e polimórficas (b); Gompertz anamórficas (c) e polimórficas (d); Weibull anamórficas (e) e polimórficas (f), Monomolecular anamórficas (g) e polimórficas (h); Logístico anamórficas (i) e polimórficas (j); com o erro em porcentagem (y) em função da idade (x).

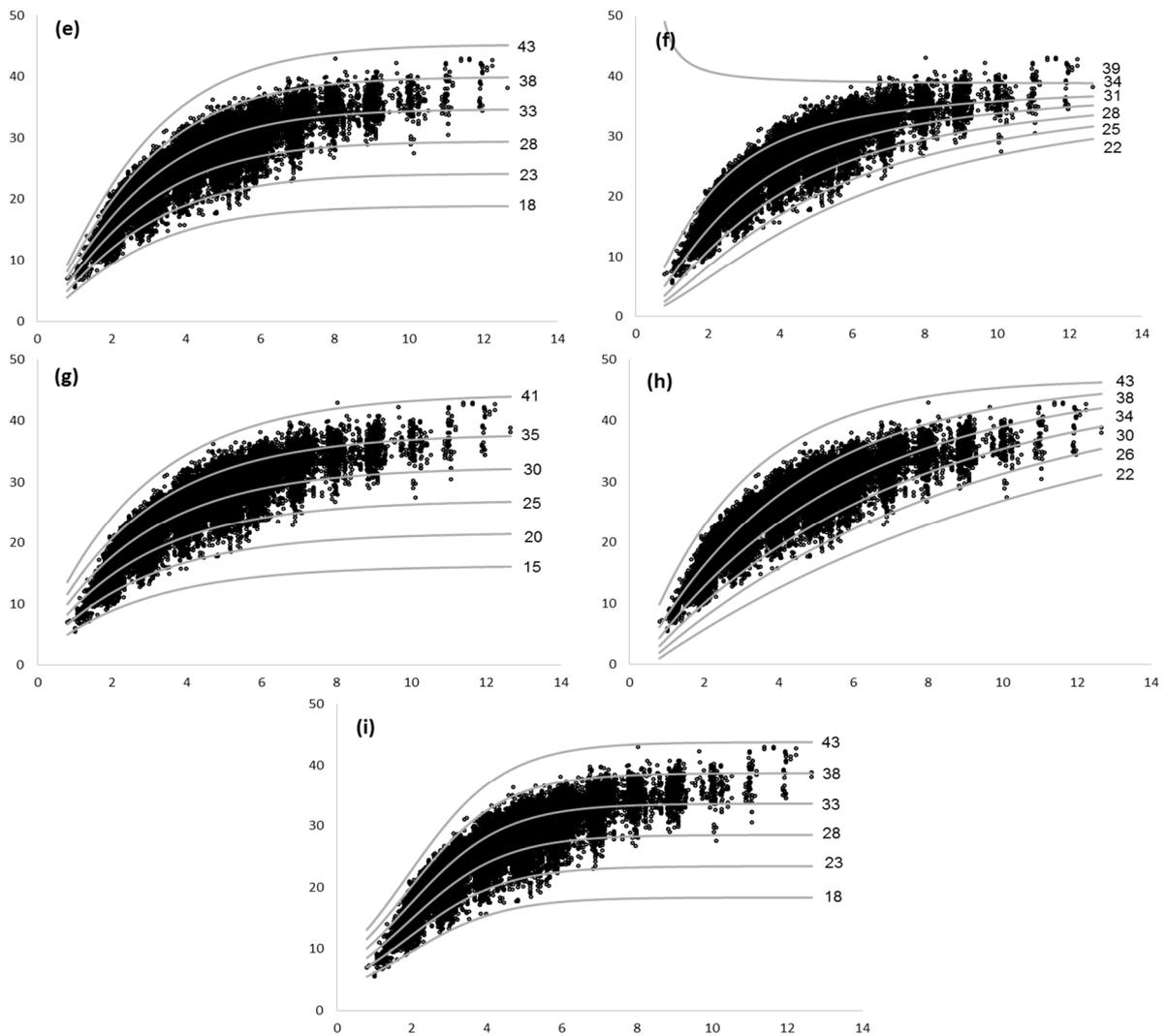
Fonte: elaborada pelo autor (2016).

Como mostra a Figura 1, os modelos testados apresentaram uma dispersão residual muito próxima entre si, sempre com uma tendência maior de erros ocorrerem nas menores idades. Isso pode ocorrer porque, nas menores idades, a sensibilidade das plantas ocasionada pela susceptibilidade das mudas aos fatores externos, induz a uma maior variação das alturas, inclusive de árvores dominantes e codominantes (DAVID, 2014).

O modelo Logístico, na sua forma polimórfica, apresentou uma dispersão dos resíduos de maneira tendenciosa e inferior aos demais modelos testados (Figura 1f). Observou-se neste modelo uma grande tendência em subestimar as alturas dominantes nas menores idades, assim como superestimar nas maiores idades, portanto, este modelo não seria indicado para ser utilizado na classificação da capacidade produtiva.

Curvas de sítios anamórficas e polimórficas foram geradas para todos os modelos ajustados (exceto para o modelo Logístico na formulação polimórfica, pois o mesmo não se ajustou bem aos dados) e são apresentadas na Figura 2.





**Figura 2** – Curvas de sítios geradas pelo método da diferença algébrica para os modelos de Chapman e Richards com curvas anamórficas (a) e polimórficas (b); Gompertz com curvas anamórficas (c) e polimórficas (d); Weibull com curvas anamórficas (e) e polimórficas (f), Monomolecular com curvas anamórficas (g) e polimórficas (h), Logístico com curvas anamórficas (i); tendo a altura dominante (y) em função da idade (x).

Fonte: elaborada pelo autor (2016).

De acordo com a Figura 2, na geração de curvas anamórficas para todos os modelos testados foi possível manter os mesmos valores dos limites das classes de sítio, variando entre 20 e 45 metros. Foram geradas cinco classes de sítio, com intervalos de cinco metros entre cada classe. Já para as curvas polimórficas, durante o ajuste do método foi necessário alterar os valores dos limites de classes, que foram estabelecidos de acordo com os índices de sítios (IS) calculados para cada parcela, a partir da idade de referência estabelecida (7 anos). De acordo com essa variação de IS para todas as parcelas, os limites foram escolhidos de maneira que

se mantivessem as mesmas cinco classes, e que as curvas abrangessem todos os dados em estudo.

É possível concluir com a Figura 2, que o método da diferença algébrica foi efetivo na geração de curvas de sítio para a classificação da capacidade produtiva para os modelos testados. As curvas anamórficas apresentam resultados muito próximos entre os modelos estudados. Já para as curvas polimórficas, os modelos apresentaram comportamentos diferentes, o que era esperado, pois a inclinação das curvas varia de acordo com os dados apresentados para ajuste do modelo.

A família de curvas polimórficas conseguiu se ajustar bem aos dados, confirmando o resultado obtido pelo teste de anamorfismo. As curvas alteraram sua inclinação de maneira a abranger todos os dados, e descrever o seu padrão biológico de crescimento, principalmente as parcelas de maior produtividade que se encontram na parte superior dos gráficos, como pode ser observado nas Figuras 1b, d, f, h.

Como o modelo Logístico para curvas polimórficas não conseguiu se ajustar bem aos dados, não foram geradas curvas de sítio para o mesmo.

Ainda é possível inferir sobre a Figura 1 que os modelos de Chapman e Richards e o Monomolecular, nas famílias de curvas polimórficas, foram os que conseguiram melhor expressar o comportamento biológico de crescimento do povoamento em estudo. Ambos alteraram a inclinação da curva do limite de sítio de maior e menor produtividade, de maneira que abrangessem todas as parcelas em estudo.

Uma característica desejável para as curvas de sítio é que uma parcela se mantenha estável em uma mesma classe de sítio ao longo de sua existência (CLUTTER et al., 1983). Para verificar essa característica, foi realizado o teste de estabilidade entre as curvas anamórficas e polimórficas que estão apresentadas na Tabela 8.

A Tabela 7 mostra que embora os dados apresentem um padrão de crescimento polimórfico, as curvas anamórficas conseguem uma melhor estabilidade se comparadas às curvas do tipo polimórficas.

**Tabela 7** – Teste de estabilidade para os diferentes modelos com as suas modificações algébricas, testados para a classificação de sítios florestais a partir de curvas anamórficas e polimórficas.

Curva	Modelo	% não mudou	Parcelas que mudaram				
			0 vezes	1 vez	2 vezes	3 vezes	4> vezes
Anamórfico	Chapman	49,15	4338	3115	1049	279	37
	Gompertz	48,54	4284	3140	1085	273	36
	Weibull	48,72	4300	3138	1053	290	37
	Monomolecular	45,28	3996	3529	959	294	40
	Logístico	47,26	4171	3252	1107	252	36
Polimórfico	Chapman	40,72	3594	3654	1207	278	85
	Gompertz	60,39	5330	2639	693	123	33
	Weibull	53,72	4741	3036	790	215	36
	Monomolecular	36,36	3209	4170	1105	286	48
	Logístico	--	--	--	--	--	--

Fonte: elaborada pelo autor (2016).

Houve certa homogeneidade na estabilidade entre os modelos ajustados com curvas anamórficas, em relação à quantidade de parcelas estáveis variando de 45,28 % a 49,15 %, para os modelos Monomolecular e Chapman e Richards, respectivamente. Já na família de curvas polimórficas, foi possível observar que os modelos de Gompertz e Weibull, que apresentaram um maior número de parcelas estáveis em consequência das curvas geradas que não descrevem o crescimento biológico da floresta.

O modelo de Gompertz, na sua formulação polimórfica, teve 60,39% de parcelas estáveis na classificação. Porém, esse valor não pode ser levado como uma superioridade de ajuste do modelo, porque, como pode ser observado na Figura 1d, as curvas geradas possuem aberturas muito grandes, principalmente nas idades iniciais, o que influencia diretamente na estabilidade das parcelas. Pois, se as curvas são mais largas, a probabilidade de uma parcela permanecer na mesma classificação nas medições posteriores é maior, se comparadas às curvas mais fechadas.

Entretanto, essas curvas não expressam o padrão de crescimento da floresta, não sendo adequadas, então, para se utilizar na classificação dos sítios florestais. O mesmo foi observado para o modelo de Weibull (Figura 1f).

O teste de anamorfismo mostrou um padrão polimórfico dos dados em estudo, além da Figura 1b e 1h mostrarem que os modelos de Chapman e Richards

e o Monomolecular, na sua formulação polimórfica, tenham conseguido ajustar suas curvas, de acordo com o padrão de crescimento biológico dos dados em estudo.

Visualmente, foram os modelos que conseguiram melhor esboçar o padrão biológico de crescimento das parcelas, onde as curvas de sítios geradas por estes modelos tiveram sua inclinação modificada e abrangeram melhor os dados em estudo. Portanto, esperava-se que os mesmos apresentassem uma superioridade em relação à quantidade de parcelas estáveis, o que não foi comprovado.

Os modelos de Chapman e Richards e Monomolecular na família de curvas polimórficas tiveram um total de 40,72% e 36,36% de parcelas estáveis, respectivamente. Ao passo que, os mesmos modelos em sua formulação anamórfica, tiveram 49,15% e 45,28% de parcelas estáveis na sua classificação.

Além de os dados apresentarem um padrão de crescimento polimórfico demonstrado pelo teste de anamorfismo e a partir do conjunto de curvas obtidas pelo método da diferença algébrica, visualmente o conjunto de curvas polimórficas conseguiu captar a diferença no crescimento das parcelas ao longo das remedições nas diferentes idades, e gerar curvas com inclinações que abrangessem esse padrão e classificassem todos os dados.

Porém, para o teste de estabilidade, essas curvas não apresentaram superioridade em relação às curvas anamórficas. Como já foi bastante discutido neste estudo, a estabilidade da classificação de sítios se torna de extrema importância na seleção do melhor modelo e pelo conjunto de curvas a ser utilizado, pois no resultado final do processo de classificação o que realmente importa é o índice de sítio que será atribuído para cada parcela.

Este índice pode ser bastante influenciado pela estabilidade da parcela de se manter em uma mesma classe de sítio ao longo de suas remedições e, em caso de mudanças dessa classificação, o mesmo será definido de maneira arbitrária pelo manejador, além de dispender de mais trabalho para um resultado final.

Levando-se em consideração que povoamentos florestais dificilmente irão apresentar padrões de crescimento homogêneo entre parcelas que foram mensuradas, pois, por mais que sejam plantios clonais de uma mesma espécie e com tratamentos silviculturais semelhantes, inúmeros fatores podem influenciar no desenvolvimento das plantas, fazendo com que as mesmas se comportem de maneira diferente.

Independente de resultados do teste de anamorfismo, é esperado que haja diferença no padrão de crescimento entre parcelas. Portanto, espera-se que curvas de sítios polimórficas realizem uma melhor classificação de sítios florestais, e devam ser utilizadas sempre que possível. Apesar de que, para a obtenção das mesmas, é necessário um melhor conjunto de dados, se comparados ao requisito para obtenção de curvas anamórficas.

Contudo, este estudo mostra que famílias de curvas anamórficas conseguem fazer a classificação da capacidade produtiva de florestas de maneira satisfatória, mostrando-se até superiores às curvas polimórficas, mesmo os dados apresentando polimorfismo no seu padrão de crescimento.

Hernández-Ramos et al. (2014), estudando a classificação de sítios florestais para florestas naturais de *Pinus teocote*, no estado de Hidalgo, no México, verificou que após o ajuste do modelo de Schumacher para família de curvas anamórficas e polimórficas, as curvas anamórficas representam com maior fidelidade a capacidade produtiva do local. Enquanto que famílias de curvas polimórficas tendem a superestimar o crescimento em altura dominante para os sítios mais produtivos nas idades iniciais, assim como subestimam a qualidade dos sítios mais pobres.

Scavinsk (2014) encontrou em seu estudo que as curvas polimórficas apresentavam uma maior abertura nas menores idades, e que as curvas polimórficas apresentaram uma melhor estabilidade se comparadas com as anamórficas, representando um ganho de 6%. Resultado que difere do presente estudo, no qual as curvas anamórficas foram superiores.

Autores como Tonini et al. (2001), Scolforo e Machado (1988), Marcolin (1990) e Selle (1994) relaram que a instabilidade das parcelas nas curvas de sítios está relacionada com a idade, de modo que, de forma geral, a maior instabilidade ocorre nas menores idades. Esta instabilidade inicial é provavelmente ocasionada pela adaptação da planta ao local de crescimento nas idades mais jovens e tem sido mencionada em vários estudos que procuraram classificar o sítio mediante o crescimento em altura dominante.

Por fim, o modelo que melhor se ajustou para este estudo foi o de Chapman e Richards, com a geração de curvas anamórficas. O mesmo apresentou os melhores resultados estatísticos e de estabilidade, se comparado aos demais, sendo indicado para ser utilizado na classificação dos sítios florestais para o povoamento florestal em estudo.

O modelo de Chapman-Richards possui características adequadas para representar o crescimento de qualquer variável biológica, pois, descreve o início de crescimento na origem, com um ritmo inicial acelerado, um ponto de inflexão onde este ritmo de crescimento decresce e, finalmente, tende a um valor assintótico, como ocorre em povoamentos florestais (FINGER, 1992).

O mesmo modelo também já foi selecionado para a geração de curvas anamórficas e polimórficas pelo método da diferença algébrica por Cunha Neto et al. (1996), para plantios de *E. grandis* e *E. urophylla*, que apresentavam um padrão de crescimento anamórfico entre os dados. Assim como Scavinski (2014), para a classificação da capacidade produtiva em *Eucalyptus grandis* W. Hill. Ex. Maiden, no estado de São Paulo.

#### 4. CONCLUSÃO

Os dados em estudo apresentam um padrão de crescimento polimórfico e a utilização do método da diferença algébrica para classificação de sítios florestais foi satisfatória por gerar curvas anamórficas e polimórficas.

Os modelos de regressão testados geraram conjuntos de curvas capazes de classificar a capacidade produtiva do local de forma satisfatória. Os modelos apresentaram bons resultados de precisão estatística e conseguiram realizar estimativas sem tendenciosidade.

O modelo logístico na sua formulação polimórfica não é recomendado para classificar sítios florestais no povoamento em estudo.

As curvas geradas pelos modelos de Gompertz, Weibull e Logístico não apresentaram comportamento coerente com os padrões biológicos de crescimento para o povoamento em estudo. Portanto, mesmo apresentando superioridade nos resultados estatísticos e de estabilidade, esses modelos não são recomendados para serem utilizados para classificar sítios florestais.

O modelo de Chapman e Richards foi selecionado para classificação dos sítios florestais. A família de curvas anamórficas gerou uma melhor estabilidade das parcelas ao longo do tempo, se comparadas às curvas polimórficas.

Embora os dados apresentem um padrão de crescimento polimórfico, o conjunto de curvas anamórficas gerado pelos modelos consegue realizar a classificação de sítios florestais de forma superior às curvas polimórficas, se analisados os resultados de precisão estatística, teste de estabilidade e análise crítica (gerencial) do conjunto de resultados obtidos.

## REFERÊNCIAS

- BAILEY, R. L.; CLUTTER, J. L. **Base age invariant polymorphic site curves.** *Forest Science*, v. 20, n. 2, p. 155-159, 1974.
- BRAVO-OVIEDO, A.; DEL RIO, M.; MONTEIRO, G. Site index curves and growth model for mediterranean maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) in Spain. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, n. 201, p. 187-197, 2004.
- CAMPOS, J. C. C.; TORQUATO, M. C.; RIBEIRO, G. A. Equações para calcular índices de local e incremento da altura em plantações puras de *Eucalyptus grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 9, n. 1, p. 1-9, 1985.
- CAMPOS, J. C. C., LEITE, H. G. **Mensuração Florestal: perguntas e respostas.** 4. ed. Viçosa: Editora UFV, 2013, 605 p.
- CARRERO, O.; JEREZ, M.; MACCHIAVELLI, R.; ORLANDONI, G.; STOCK, J. Ajuste de curvas de índice de sitio mediante modelos mixtos para plantaciones de *Eucalyptus urophylla* en Venezuela. **APR**, v. 33, n. 4, p. 265-272, 2008.
- CLUTTER, J. L.; PIENAR, L. V.; BRISTER, G. H.; BAILEY, R. L. **Timber management: a quantitative approach.** New York, John Willey e Sons, 1983, 333 p.
- CUNHA NETO, F. R. C.; SCOLFORO, J. R. S.; OLIVEIRA, A. D. de; NATALINO CALEGÁRIO, N.; KANEGAE JÚNIOR, H. Uso da diferença algébrica para construção de curva de índice de sitio para *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, na região de Luiz Antônio - SP. **Cerne**, Lavras, v. 2, n. 2, p. 119-141, 1996.
- DAVID, H. C. **Avaliação de sítio, relações dendrométricas e otimização de regimes de manejo de *Pinus taeda* L. nos estados do Paraná e de Santa Catarina.** 2014, 151. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.
- DAVID, H. C.; PÉLLICO NETTO, S.; ARCE, J. E.; CORTE, A. N. D.; MARINHESKI FILHO, A.; BEHLING, A. Updating of Dominant Height Growth Modeling and site Index of *Pinus taeda* L. in southern Brazil. **Aust. J. Basic & Appl. Sci.**, v. 9, n. 2, p. 115-125, 2015.
- DIAS, A. N.; LEITE, H. G.; NOGUEIRA, G. S.; RODRIGUES, F. L. Avaliação de métodos de ajuste de curvas de índices de local em povoamentos de eucalipto desbastados. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, p. 741-747, 2005.

DIÉGUEZ-ARANDA, U.; BURKHART, E. H.; RODRÍGUEZ-SOALLEIRO, R. Modeling dominant height growth of Radiata Pine (*Pinus radiata* D. Don) plantations in north-western Spain. **Forest Ecology and Management**, v. 215, p. 271-284, 2005.

DRAPER, N. R., SMITH, H. **Applied regression analysis**. New York: John Wiley & Sons, 1966, 407p.

FIGUEIREDO, E. O. **Avaliação de Modelos pelo Método da Curva Média para a Construção de Curvas de Índice de Sítio para *Tectona grandis* L.f.** Rio Branco: Embrapa Acre. 2005, 49 p.

FINGER, C. A. G. **Fundamentos de biometria florestal**. Santa Maria: UFSM, 1992, 269p.

IBA – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **O RELATÓRIO IBÁ 2015**. Brasília, DF: IBÁ, 2015. Disponível em: <[http://iba.org/images/shared/iba\\_2015.pdf](http://iba.org/images/shared/iba_2015.pdf)>. Acesso em: 30 jun. 2016.

KING, J. E. **Site index curves for Douglas fir in de Pacific Northwest**. Weyerhaeuser, Foresty Paper 8, 1966, 49 p.

KITIKIDOU, K.; BOUNTIS, D.; MILIOS, E.; Site index models for Calabrian pine (*Pinus brutia* Ten.) in Thasos Island, Greece. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 21, n. 1, p. 125-131, jan.-mar., 2011.

MACHADO, S. do A. Curvas de índice de sítio para plantações de *Pinus taeda* L. na região central do Estado do Paraná. Curitiba. **Revista Floresta**. v. 11, n. 2, p. 4-18, 1980.

MACHADO, S. A.; OLIVEIRA, E. B. de; CARPANEZZI, A. A.; BARTOSZECK, A. C.P.S. Classificação de sítio para bracingais na região metropolitana de Curitiba. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 35, p. 21-37, 1997.

MARCOLIN, M. **Polimorfismo e tamanho da amostra para construção de curvas de índice de sítio para *Pinus taeda* L., no Segundo Planalto Paranaense**. Curitiba, 1990. 57p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, 1990.

MIGUEL, E. P.; IMAÑA ENCINAS, J.; REZENDE, A. V.; FERREIRA, J. C. S.; AGUIAR, G. P. Classificação de sítio para plantios de *Eucalyptus urophylla* em Niquelândia, estado de Goiás. **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer - Goiânia, v. 7, n. 12; p. 1, 2011.

HERNÁNDEZ-RAMOS, J.; GARCÍA-MAGAÑA, J.J.; GARCÍA-CUEVAS, X.; HERNÁNDEZ-RAMOS, A.; MUÑOZ-FLORES, H. J.; SAMPERIO-JIMÉNEZ, M. Índice de sitio para bosques naturales de *Pinus teocote* Schlecht. & Cham. en el oriente del estado de Hidalgo. **Revista Mexicana de Ciencias Forestales**, v. 6, n. 27, p. 24-36, 2014.

NASCIMENTO, F. A. F. do; DIAS, A. N.; FIGUEIREDO FILHO, A.; MIRANDA, G. de M.; ARCE, J. E. Sistema de crescimento e produção para povoamentos de *Pinus taeda* na região norte de Santa Catarina. **Revista Cerne**, Lavras, v. 21 n. 2, p. 235-242, 2015.

PALAHÍ, M. Site index model for *Pinus silvestris* in north-east Spain. **Forest Ecology and Management**. Amsterdam, n. 187, p. 35-47, 2004.

PATRÍCIO, M. S. F. **Análise da Potencialidade Produtiva do Castanheiro em Portugal**. 2006. 273 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Técnica de Lisboa, 2006.

SCAVINSKI, V. **Projeção da produção utilizando curvas de sitio anamórficas e polimórficas para plantios de *Eucalyptus grandis* W. Hill. Ex. Maiden**. 2014. 75 p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Estadual do Centro Oeste, Irapati, 2014.

SCOLFORO, J. R. Curvas de índice de sitio para *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. **Revista do IPEF**, Piracicaba, v. 45, p. 40-47, 1992.

SCOLFORO, J.R.S, MACHADO, S. A. Curvas de índice de sitio para plantações de *Pinus elliottii* nos Estados do Paraná e Santa Catarina. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 17, p. 140-158, 1988.

SCOLFORO, J. R. S. **Biometria florestal**: modelos de crescimento e produção florestal. Lavras: FAEPE–UFLA, 2006, 393 p.

SELLE, G. L.; SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G. Classificação de sítios para *Pinus taeda* L., através da altura dominante, para a região de Cambará do Sul, RS, Brasil. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 77-95, 1994.

SELLE, G. L.; PAULESKI, D. T.; BRAZ, E. M. **Como classificar sítios florestais através da altura dominante do povoamento**. Colombo: Embrapa Florestas, 2008, 46 p. (Documentos, n. 166).

TÉO, S. J.; BRESSAN, D. R.; COSTA, R. H. da. Uso de modelos estatísticos para classificação de sítios em povoamentos de *Pinus taeda* na região de Caçador – SC. **Revista Floresta**, Curitiba, PR, v. 41, n. 1, p. 179-188, 2011.

TONINI, H.; FINGER, C. A. G.; SCHNEIDER, P. R.; SPATHELF, P. Crescimento em altura de *Pinus elliottii* Engelm. na região de Piratini, Rio Grande do Sul, Brasil. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, n. 3, p. 417-423, 2001.

TONINI, H.; FINGER, C. A. G.; SCHNEIDER, P. R.; SPATHELF, P. Comparação gráfica entre curvas de índice de sítio para *Pinus elliottii* e *Pinus taeda* desenvolvidas no Sul do Brasil. **Ciência Florestal**, Santana Maria, v. 12, n. 1, p. 143-152, 2002.

TONINI, H.; SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G. Curvas de índice de sitio para povoamentos clonais de *Eucalyptus saligna* Smith para a Depressão Central e Serra do Sudeste, Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, v. 16, n. 1, p. 27-43, 2006.

## CAPÍTULO 2:

### REDES NEURAIS ARTIFICIAIS PARA CLASSIFICAÇÃO DA CAPACIDADE PRODUTIVA DE FLORESTAS DE EUCALIPTO

#### RESUMO

Este estudo teve como objetivo testar o desempenho e selecionar um modelo de Rede Neural Artificial (RNA), com adição de variáveis dendrométricas e edafoclimáticas, características do povoamento em estudo, que pode ser utilizado para estimar a altura média das árvores dominantes de Eucalipto, e aplicá-las na classificação de sítios florestais, utilizando o método da curva guia como uma alternativa aos modelos de regressão não linear e verificar qual abordagem gerou uma classificação mais estável ao longo dos anos. Os dados dendrométricos utilizados neste estudo totalizaram 28.150 registros provenientes de 8.819 parcelas permanentes, oriundas de povoamentos clonais de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, localizados no extremo Sul da Bahia, em primeira rotação, com idades variando de 0,80 até 12,70 anos. Foram testados cinco modelos de regressão não linear, sendo eles: Chapman e Richards, Gompertz, Logístico, Weibull e Monomolecular. Dois tipos de RNA foram treinadas: (1) *Feed Forward Back propagation Network* (FFBP) e (2) *Cascade Forward Back propagation Network* (CFBP). Foram treinadas RNA com as mesmas variáveis utilizadas pelos modelos de regressão não linear. Além destas, doze diferentes RNA foram treinadas com adições de variáveis do povoamento em estudo, sendo elas: área basal, diâmetro médio quadrático, combinados com a idade das parcelas, além de dados categóricos de solo e precipitação. Todos os modelos de regressão não linear foram capazes de classificar a capacidade produtiva de forma satisfatória, porém, houve uma superioridade do modelo Monomolecular nas suas estatísticas de precisão, assim como na estabilidade das curvas de sítio. As redes do tipo CFBP apresentaram uma leve superioridade tanto para a estimativa de alturas dominantes como na estabilidade das curvas de sítio. A aplicação de alturas dominantes estimadas pelas RNA que tiveram a adição de variáveis do povoamento durante o

seu treinamento, na classificação de sítio pelo método da curva guia, melhorou a estabilidade em relação ao modelo de regressão selecionado, em 1.156 parcelas estáveis, o que corresponde a 13,4% do total, comprovando que a aplicação da técnica proposta neste trabalho trouxe uma melhoria para a classificação de sítios.

**Palavras-chave:** inteligência artificial, altura dominante, curva guia, sítios florestais.

## 1. INTRODUÇÃO

Além das condições edafoclimáticas, um fator que propiciou o desenvolvimento do setor de florestas plantadas no Brasil foi o grande investimento em tecnologia por parte das empresas e instituições de pesquisa, que em poucas décadas transformaram o país no mais produtivo polo de produção florestal do planeta. Porém, ainda existem inúmeros desafios a serem vencidos pelo setor, que envolvem políticas integradas, investimentos em tecnologia e inovação, biotecnologia, dentre outros (IBA, 2015).

Muitos estudos estão sendo desenvolvidos nas diversas áreas em busca de aprimoramentos dos processos que envolvem toda a cadeia produtiva em florestas. Dentre elas, conhecer a produtividade de um determinado local é um elemento fundamental, pois contribui para a estimativa da colheita anual, do período de rotação e da escolha de espécies adequadas (VARGAS-LARRETA et al., 2010). Isso constitui um recurso básico quando o objetivo é aplicar um sistema integrado de manejo visando à racionalização e otimização do uso dos recursos florestais (SILVA et al., 2013).

A principal variável dendrométrica empregada para indicar a capacidade produtiva de florestas plantadas é a altura média das árvores dominantes, pois esta possui os melhores pré-requisitos para tal, como uma boa correlação com a produção volumétrica. Além disso, indica a qualidade do sítio para todas as idades presentes no povoamento e é menos dependente da densidade do povoamento (TONINI et al., 2001). Todavia, sabe-se que vários outros fatores influenciam no desenvolvimento de uma floresta, e se utilizados para sua modelagem, poderão trazer benefícios na aplicação da técnica.

As curvas de índice de local constituem-se, atualmente, no método mais prático e difundido para classificar a produtividade florestal. Existem vários métodos para se construir curvas de índices de locais, sendo que o mais utilizado é o método da curva guia (DIAS et al., 2005). Essa produtividade é expressa através de um índice de sítio, que se refere a uma altura dominante ou a uma classe de produção relativa em uma idade de referência do povoamento (SPATHELF & NUTTO, 2000).

Nos últimos anos, pesquisas estão sendo direcionadas para o estudo de novas metodologias que estimem a produtividade das florestas de forma eficiente e

com grau de precisão satisfatório. Assim, novas ferramentas têm sido introduzidas na área florestal com este intuito, dentre elas, é possível destacar os modelos de Redes Neurais Artificiais (RNA) (GÖRGENS et al., 2009; LEITE et al., 2011). As RNA têm algumas das características notáveis de processamento semelhantes à informação do cérebro humano, como a não linearidade, alto paralelismo, robustez, tolerância a falhas e ruídos, capacidade de lidar com informações imprecisas e distorcidas, além da sua capacidade de generalizar (BASHEER & HAJMEER, 2000).

As RNA diferenciam-se por sua arquitetura e pela forma como os pesos associados às conexões são ajustados durante o processo de aprendizado. Embora haja um grande número de possíveis modelos de redes para escolher, as *Multilayers perceptrons* (MLP) e em especial as redes de Retropropagação (*Back-Propagation*), são as mais frequentemente aplicadas na prática, por resolverem problemas nas mais diversas áreas (CORNE et al., 2004).

Um algoritmo promissor, pertencente ao tipo *Feed-Forward*, que é um algoritmo supervisionado na RNA de múltiplas camadas, onde suas camadas são interligadas por sinapses completas, ou seja, cada neurônio de uma camada é ligado a todos os neurônios da camada seguinte (BRAGA et al., 2007), é o do tipo Cascata (*Cascade*). Neste tipo de rede, uma camada é interligada a todas as suas camadas posteriores, não sendo restrita apenas a uma camada posterior, o que pode potencialmente aprender qualquer relação de entrada e saída, mesmo em relacionamentos complexos e de forma mais rápida (JESUS & HAGAN, 2007; DEMUTH et al., 2009).

Nas últimas décadas, as RNA têm recebido uma atenção considerável devido a esta metodologia ser comparável à modelagem estatística, podendo ser utilizada como esforço complementar (sem a suposição restritiva de um modelo estatístico em particular) ou como uma abordagem alternativa para a estimativa de dados complexos (ÖZÇELIK et al., 2010).

Na Ciência Florestal, as RNA têm sido utilizadas com sucesso em diferentes áreas, apresentando resultados equivalentes ou superiores aos modelos usuais de regressão na modelagem. Alguns estudos já foram realizados na estimativa de altura de árvores (XIAO et al., 1998; DIAMANTOPOULOU, 2012; BINOTI et al., 2013, ÖZÇELIK et al., 2013), mas não altura de árvores dominantes. Já na classificação da capacidade produtiva, Cosenza et al. (2015) utilizaram RNA e Máquina de Vetor de Suporte (MVS) para definir classes de sítios florestais a partir

de uma classificação preestabelecida por métodos tradicionais empregados, onde eram apresentadas às RNA e MVS, variáveis dendrométricas como entrada, e a saída uma classe de sítio predeterminada. Porém, a estimativa de altura de árvores dominantes e aplicação para classificação de sítios florestais não foi realizada.

Neste contexto, o presente trabalho teve como objetivo testar o desempenho e selecionar um modelo de Rede Neural Artificial (RNA) que pode ser utilizado para estimar a altura dominante de árvores de Eucalipto, em diferentes idades, e aplicá-lo na classificação de sítios florestais utilizando o método da curva guia como uma alternativa aos modelos de regressão não linear.

Foram treinados dois tipos de redes: (1) *Feed Forward Back propagation Network* (FFBP) e (2) *Cascade Forward Back propagation Network* (CFBP). Além disso, a inclusão de variáveis dendrométricas e ambientais (área basal, diâmetro médio quadrático, características de solo e precipitação) durante o treinamento das RNA foi realizada na intenção de aumentar a precisão das estimativas. Foram geradas curvas de sítios com alturas dominantes estimadas pelo método tradicional e pelas RNA, para verificar qual abordagem gerou uma classificação mais estável ao longo dos anos.

## 2. MATERIAL E MÉTODOS

### 2.1. Caracterização dos dados

Os dados utilizados neste estudo foram provenientes de plantios comerciais de híbridos de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, implantados com espaçamento variando entre 9 e 12 m<sup>2</sup> por planta, conforme padrão da empresa, localizados no extremo Sul da Bahia, abrangendo uma área de aproximadamente 96.000 ha, em primeira rotação, com idades de medição variando de 0,80 até 12,70 anos.

O clima é, segundo a classificação de Köppen, Tropical Equatorial (Af): chuvoso, quente e úmido, característico do litoral e Tropical de Monção (Am): quente e úmido, porém com precipitações inferiores ao anterior. A região apresenta temperatura média anual de 24°C, com pequena amplitude.

Os dados dendrométricos totalizaram 28.150 registros provenientes de 8.819 parcelas permanentes. As parcelas apresentavam predominantemente 260 m<sup>2</sup> de área, podendo haver uma variação entre 200 e 400 m<sup>2</sup> de uma minoria dos dados. Em cada parcela mediu-se: a circunferência à altura do peito, tomado a 1,30 m do solo (CAP) de todas as árvores; altura total das cinco primeiras árvores; e altura total das árvores dominantes, que foram identificadas segundo o conceito de Assmann, correspondendo às três árvores mais grossas da parcela. A Tabela 1 apresenta a descrição dos dados em estudo.

**Tabela 1** – Valores mínimo, médios, máximos e o desvio padrão da Idade (anos), Área Basal (m<sup>2</sup>/ha), Diâmetro médio quadrático (cm), Precipitação (mm) e Altura Dominante (m) dos dados em estudo.

Parâmetro	Mínimo	Média	Máximo	Desvio Padrão
Idade (anos)	0,80	4,40	12,70	1,77
Área basal (m <sup>2</sup> /ha)	0,982	17,749	41,655	5,681
Diâmetro médio quadrático (cm)	5,16	16,45	26,63	2,80
Precipitação (mm)	850	1.360	1.550	89,61
Altura dominante (m)	5,50	25,70	43,00	6,20

Fonte: elaborada pelo autor (2016).

## 2.2. Método para classificação da capacidade produtiva

Para a construção das curvas de índices de local foi empregado o método da curva guia, a partir das alturas dominantes estimadas pelo método tradicional (modelos de regressão não linear) e pela altura dominante estimada pelas RNA.

Com a relação entre as alturas dominantes observadas e estimadas pelos diferentes métodos, foram obtidos fatores que foram utilizados para a determinação dos limites das classes de sítio. Foi assumida uma idade-índice de sete anos por estar em torno da idade de rotação da espécie em estudo. A amplitude adotada entre as classes de sítio foi de cinco metros, exceto para a classe de sítio mais produtiva, que teve uma amplitude de seis metros para que a curva abrangesse todos os dados.

## 2.3. Modelagem de curvas de sítio

### 2.3.1. Método Tradicional (Regressão não linear)

Foram testados cinco modelos não lineares consagrados na literatura, para a estimativa da altura de árvores dominantes. Os mesmos também foram testados por Carrero et al. (2008), que estão apresentados na Tabela 2.

**Tabela 2** – Modelos não lineares testados para estimativa da altura de árvores dominantes na sua formulação original.

Autor	Modelo
Chapman e Richards	$Hd = \beta_0 (1 - e^{-\beta_1 Id})^{\beta_2} + \varepsilon$
Gompertz	$Hd = \beta_0 e^{-\beta_1 e^{-\beta_2 Id}} + \varepsilon$
Logística	$Hd = \frac{\beta_0}{1 + \beta_1 e^{\beta_2 Id}} + \varepsilon$
Weibull	$Hd = \beta_0 (1 - e^{-\beta_1 Id \beta_2}) + \varepsilon$
Monomolecular	$Hd = \beta_0 (1 - \beta_1 e^{-\beta_1 Id}) + \varepsilon$

Onde:  $Hd$  = Média das alturas das árvores dominantes;  $\beta'_s$  = parâmetros a serem estimados;  $e$  = exponencial;  $\varepsilon$  = erro de estimativa.

Fonte: adaptado de Carrero et al. (2008).

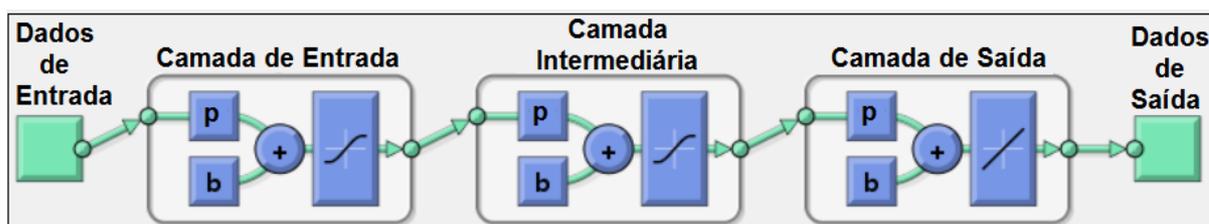
Os parâmetros do modelo foram estimados através do método de *Levenberg–Marquardt*, com o auxílio do software *R Statistical Computing* (versão 3.2.1).

### 2.3.2. Redes Neurais Artificiais (RNA)

Neste estudo foram utilizadas Redes Neurais de Múltiplas Camadas (MLP). Dois tipos de RNA foram testados: *Feed Forward Back Propagation Network* (FFBP) e *Cascade Forward Back Propagation Network* (CFBP).

A aprendizagem por retropropagação (*Back Propagation*) consiste em dois passos através da rede. Inicialmente, os dados de entrada são introduzidos na rede e sua saída é comparada com a saída esperada. Em caso de erro, a diferença é redistribuída pelos pesos da rede no sentido inverso, daí o nome de retropropagação. Esse procedimento é repetido até que o erro cometido seja menor que o erro máximo admitido, quando, então, a rede é considerada treinada para aquele conjunto de dados (ALMEIDA et al., 2006).

A FFBP mostrada na Figura 1 consiste em uma rede MLP em que suas camadas são interligadas por sinapses completas, ou seja, cada neurônio da camada  $i$  é ligado a todos os neurônios da camada seguinte ( $i+1$ ), sendo as sinapses orientadas somente para frente (tipo *feed forward*). Com isso, durante o treino desta rede, os cálculos são realizados a partir de camada de entrada da rede em direção à camada de saída, e valores de erro são propagados para camadas anteriores.



**Figura 1** – Exemplo de uma RNA de múltiplas camadas do tipo *Feed-Forward Back Propagation Network* (FFBP) com 3 camadas, como a utilizada neste estudo.

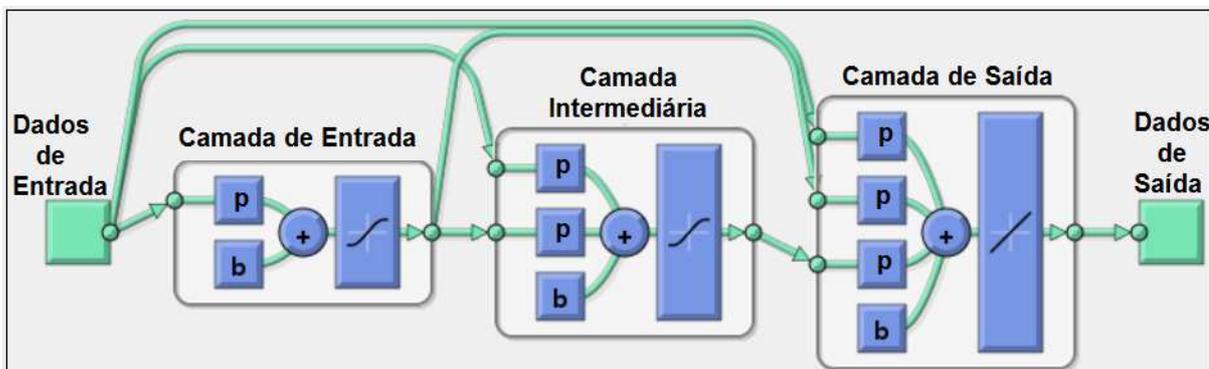
Onde:  $p$  = pesos e  $b$  = bias (erros).

Fonte: Adaptado de MatLab 2010.

Já as redes do tipo CFBP são semelhantes às redes FFBP, mas incluem a ligação dos pesos a partir da entrada para cada camada e a partir de cada camada para as camadas sucessivas. Enquanto a alimentação de duas camadas de redes para frente pode potencialmente aprender virtualmente qualquer relação de entrada e saída, as redes de *Feed-forward* com mais camadas podem aprender

relacionamentos complexos mais rapidamente (JESUS & HAGAN, 2007; DEMUTH et al., 2009).

Como mostra a Figura 2, uma rede de três camadas tem ligações da camada 1 com a camada 2, a camada 2 e a camada 3, e entre as camadas 1 e 3.



**Figura 2** – Exemplo de uma RNA de múltiplas camadas do tipo *Cascade Forward Back Propagation Network* (CFBP) com 3 camadas, como a utilizada neste estudo.

Onde: p = pesos e b = bias (erros).

Fonte: Adaptado de MatLab (2010).

Foram treinadas RNA dos dois tipos, tendo como entrada somente a variável idade, como ocorre nos modelos de regressão não linear, permitindo confrontar o desempenho de ambas as técnicas disponíveis para utilização.

Vários fatores podem afetar diretamente a produtividade local, com isso, adicionar variáveis edafoclimáticas e de povoamento durante o treinamento das RNA pode gerar estimativas mais precisas das alturas das árvores dominantes. Foram treinados 12 diferentes tipos de redes, que mudam entre si pela quantidade e tipos de variáveis de entrada, conforme detalhado na Tabela 12.

Além da idade (Id), que já é uma variável comumente utilizada nos modelos de classificação de sítios, foram adicionadas características locais de solo e precipitação, como variáveis categóricas, representando características edafoclimáticas do povoamento.

A precipitação local variou de 850 a 1.550 mm anual e foi dividida em 19 classes. Já os solos, a partir da classificação informada na base de dados, foram agrupados em 15 diferentes classes.

Como variáveis numéricas, representando a produtividade do povoamento, foram utilizadas Área Basal (Ab); que descreve o grau de ocupação do sítio florestal; e o diâmetro médio quadrático (q), correspondente ao diâmetro da árvore de área

seccional média da população, permitindo conhecer em termos médios o estado do povoamento em crescimento diamétrico.

A Tabela 3 apresenta as 12 diferentes RNA que foram treinadas com adições de variáveis características do povoamento analisado, para os dois tipos de redes estudadas, variando a sua arquitetura e as variáveis de entrada.

**Tabela 3** – Arquitetura e variáveis de entrada das RNA treinadas para estimar altura dominante (Hdom).

RNA	Arquitetura	Variáveis de Entrada				
		Idade (Id)	Área Basal (Ab)	Diâmetro Médio Quadrático (q)	Solo (S)	Precipitação (P)
1	02 - 08 - 01	X			X	
2	02 - 08 - 01	X				X
3	03 - 12 - 01	X			X	X
4	02 - 08 - 01	X	X			
5	03 - 12 - 01	X	X	X		
6	03 - 12 - 01	X	X		X	
7	04 - 16 - 01	X	X		X	X
8	04 - 16 - 01	X	X	X	X	
9	05 - 20 - 01	X	X	X	X	X
10	02 - 08 - 01	X		X		
11	03 - 12 - 01	X		X	X	
12	04 - 16 - 01	X		X	X	X

Fonte: elaborada pelo autor (2016).

Hecht-Nielsen (1989) afirmaram que com apenas uma camada intermediária na rede neural já é possível calcular uma função arbitrária qualquer a partir de dados fornecidos. O número de neurônios na camada oculta deve ter por volta de  $(2i+1)$  neurônios, onde “*i*” é o número de variáveis de entrada.

De acordo com Bullinaria (2010), na estruturação de uma RNA, configurações mais simples e com o menor número de neurônios possível na camada oculta, evitam o *overfitting* (memorização dos dados de treinamento), facilitando o processo de busca e otimização. Por outro lado, Silva et al. (2010) destacaram que um pequeno número de neurônios na camada oculta pode não ser suficiente para a realização da tarefa desejada, fenômeno conhecido como *underfitting*.

Para determinar a arquitetura ideal para as redes neurais, foram realizados testes acerca do número de neurônios necessários em cada camada da rede até

que não ocorresse o aumento significativo do coeficiente de correlação com o aumento do número de neurônios para cada variável de entrada.

Foi verificado que 4 neurônios para cada variável de entrada era o número ideal para a montagem da arquitetura das redes. Foi gerado, então, um total de 26 RNA (13 de cada tipo: FFBP e CFBP), alterando entre si a quantidade de entradas e as combinações possíveis. Todas as redes tiveram como saída a altura dominante média observada em cada parcela.

Todas as redes treinadas foram constituídas de apenas uma camada oculta, sendo que o número de neurônios nessa camada variou de acordo com as diferentes entradas, tendo suas arquiteturas mostradas na Tabela 3. Nas camadas de entrada e oculta, a função de transferência foi a sigmoide e na camada de saída, a função linear.

Haykin (2001) destacou que a função de ativação sigmoide é a mais usual na elaboração de redes neurais artificiais. A sua transição ocorre entre os valores -1 e +1, por isso ocorre de forma mais suave e contínua, trazendo o benefício de ser computacionalmente menos custosa e interessante quando aplicada em redes neurais de grande dimensão.

A base de dados foi dividida aleatoriamente em dois conjuntos: 70% para treinamento e 30% para generalização (20% para teste e 10% para validação) (PRECHELT, 1994; HAYKIN, 2001).

Para uma maior confiabilidade e rapidez no treinamento das MLPs, os dados foram normalizados no intervalo de [-1, +1], utilizando-se a função “mapminmax”, conforme mostra a Equação 1, gerando dados dentro dos intervalos de -1 a +1 (ZANCHETTIN & LUDERMIR, 2005; SOARES, 2012).

$$X_{NORM} = (b - a) \left( \frac{X - \min(X)}{\max(X) - \min(X)} \right) + a \quad (1)$$

Onde:  $X_{NORM}$  = valor da variável normalizada;  $X$  = valor da variável a ser normalizada;  $\min(X)$  = menor valor da variável a ser normalizada;  $\max(X)$  = maior valor da variável a ser normalizada;  $a$  e  $b$  = limites do intervalo de normalização.

Como critério de parada dos algoritmos de treinamento, utilizou-se o número total de ciclos ou épocas, que representam a quantidade de vezes que os dados são apresentados ao algoritmo (máximo de 1.000) ou o erro quadrático médio inferior a

1%. Portanto, finalizou-se o treinamento quando um dos critérios foi atingido (LEITE et al., 2016).

Os modelos acima referidos foram construídos usando a caixa de ferramentas *do Neural Network Toolbox*, do *software MatLab* (versão 7.10).

## 2.4. Análise estatística

A exatidão das estimativas foi avaliada empregando o coeficiente de correlação ( $r$ ) entre alturas dominantes observadas e estimadas, e também pela raiz quadrada do erro médio em metros (RMSE), e em porcentagem (RMSE%), conforme as Equações 2 e 3 (BINOTI et al., 2013).

De forma a avaliar a presença de dados discrepantes e possível tendenciosidade nas estimativas, foram gerados gráficos de dispersão dos erros percentuais (Equação 4).

$$RMSE = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Hd - \widehat{Hd})^2}{n}} \quad (2)$$

$$RMSE\% = \left(\frac{RMSE}{\overline{Hd}}\right) * 100 \quad (3)$$

$$Erro (\%) = \left(\frac{(Hd - \widehat{Hd})}{\overline{Hd}}\right) * 100 \quad (4)$$

Onde:  $Hd$  = Altura dominante observada,  $\widehat{Hd}$  = Altura média das árvores dominantes estimada,  $\overline{Hd}$  é a média das alturas dominantes observadas em todas as parcelas, e  $n$  = número total de observações.

## 2.5. Estabilidade das curvas de Índice de Sítio

A estabilidade da classificação se torna prioritária na análise da classificação de sítios florestais, pois fornece uma informação aplicada da qualidade da classificação de sítio, visto que, modelos que geram oscilação das classes de sítio para diferentes idades de medição da parcela, dificultam ao manejador a tomada de decisão na definição do sítio estudado.

O procedimento para a avaliação da estabilidade consistiu em interpretar a constância da classificação dos sítios para os modelos testados. Assim, um modelo

que apresenta uma classificação mais estável, pode ser definido como a capacidade do modelo ajustado de manter uma parcela classificada numa mesma classe de sítio do primeiro ao último ano observado (FIGUEIREDO, 2005).

Para testar se as curvas de sítio apresentam estabilidade ao longo das remedições, o índice de sítio foi estimado, e então foram contabilizadas as parcelas que mudavam de classe de sítio a cada idade.

Desse modo, a equação considerada mais estável foi aquela que apresentou um maior número de parcelas que não mudaram de classe nenhuma vez em todas as suas observações. Portanto, quanto maior o número de parcelas, ou porcentagem de parcelas que não mudaram de classe, melhor foi a equação de classificação de sítio.

Além disso, para comprovar a estabilidade e a confiabilidade das curvas de índices de sítio, foi realizada a verificação gráfica das alturas dominantes reais, de árvores oriundas dos povoamentos estudados, sobre as curvas de índices de sítio geradas pela função selecionada, seguindo o procedimento recomendado por King (1966) e Machado (1980).

### 3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

A Tabela 4 apresenta as estatísticas de precisão obtidas para os cinco modelos não lineares testados para a estimativa da altura dominante.

**Tabela 4** – Estatísticas de exatidão dos diferentes métodos utilizados para a estimativa da altura de árvores dominantes (Hdom).

Modelo	Estatísticas		
	Correlação	RMSE (m)	RMSE (%)
Chapman e Richards	0,9201	2,430	9,452
Gompertz	0,9184	2,455	9,551
Logístico	0,9160	2,489	9,683
Weibull	0,9202	2,431	9,582
Monomolecular	0,9203	2,427	9,441

Fonte: elaborada pelo autor (2016).

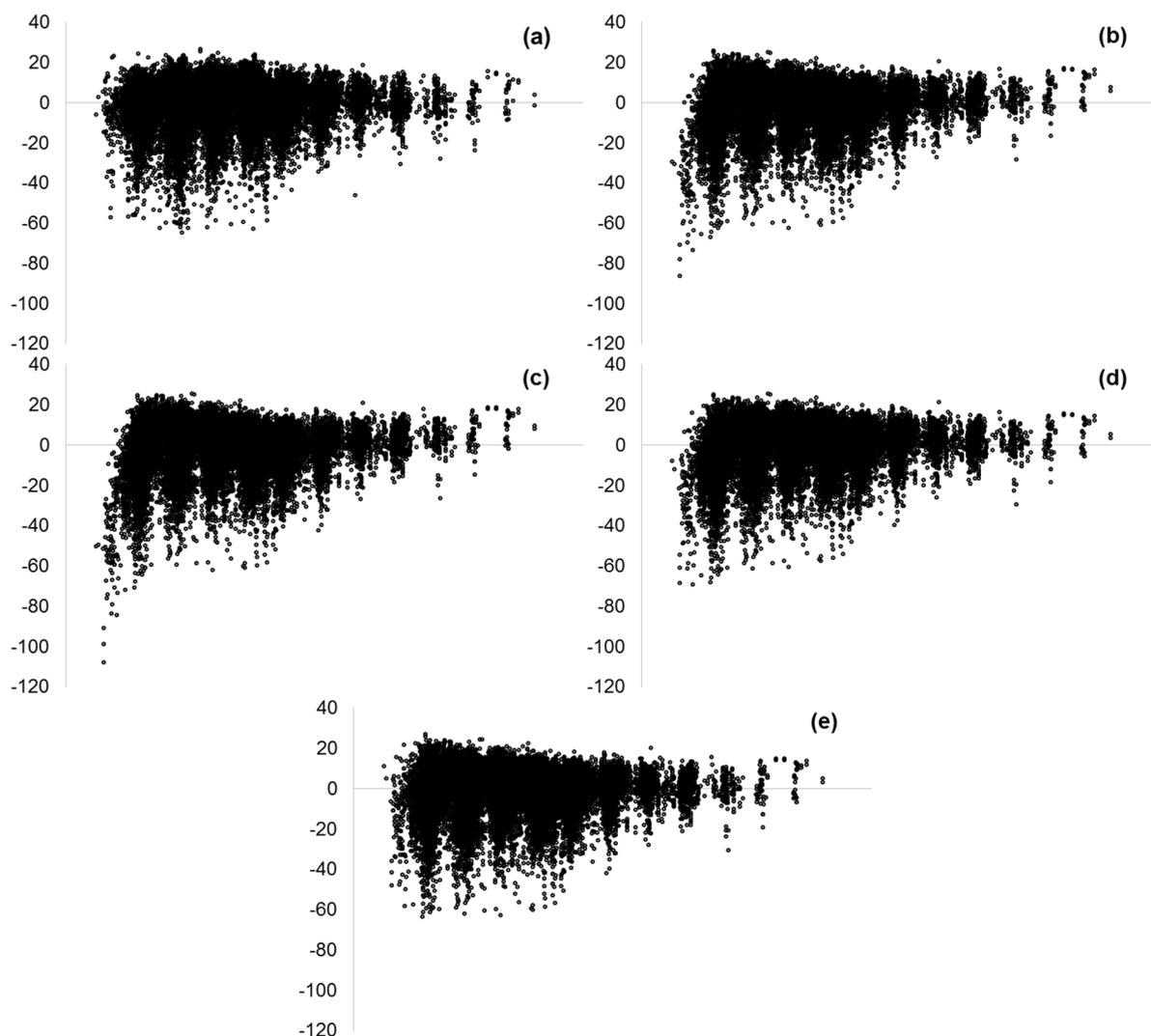
Observa-se que todos os modelos apresentaram resultados satisfatórios para a estimativa de altura das árvores dominantes do povoamento em estudo. Verificou-se um coeficiente de correlação variando de 0,9160 a 0,9203 e raiz do erro médio quadrático (RMSE%) entre 9,683 e 9,441% para os modelos Logístico e Monomolecular, que apresentaram o pior e o melhor ajuste, respectivamente. Porém, é importante ressaltar que as diferenças entre as estatísticas obtidas pelos modelos foram muito pequenas, o que poderia prejudicar na seleção do modelo que melhor se ajustou aos dados.

Téo et al. (2011) encontraram que o modelo Monomolecular foi mais adequado para a construção das curvas de índice de sítio para povoamentos de *Pinus taeda* na região de Caçador, no estado de Santa Catarina, com coeficiente de determinação de 0,96964, Syx (m) de 1,8608 e Syx (%) de 8,3920. No mesmo estudo foi observada também uma semelhança na precisão obtida entre os modelos de Chapman e Richards e o Monomolecular. Porém, o Monomolecular foi selecionado por apresentar ligeira superioridade na distribuição de resíduos.

Para a elaboração das curvas de índice de sítio, as curvas anamórficas, em especial, dependem fundamentalmente de uma curva média e distorções. Nessas podem ser identificadas com facilidade ao observar-se a distribuição gráfica de resíduos. Assim, a análise gráfica dos resíduos se torna mais importante que as estatísticas da regressão (CUNHA NETO et al., 1996). De acordo com Draper e

Smith (1966), nenhuma equação deve ser utilizada para estimativa antes de se verificar a análise gráfica de resíduos, mesmo que os índices de ajuste de precisão sejam avaliados como suficientes.

A Figura 3 apresenta os gráficos de dispersão dos resíduos, em porcentagem, para os cinco modelos testados para a estimativa da altura dominante.



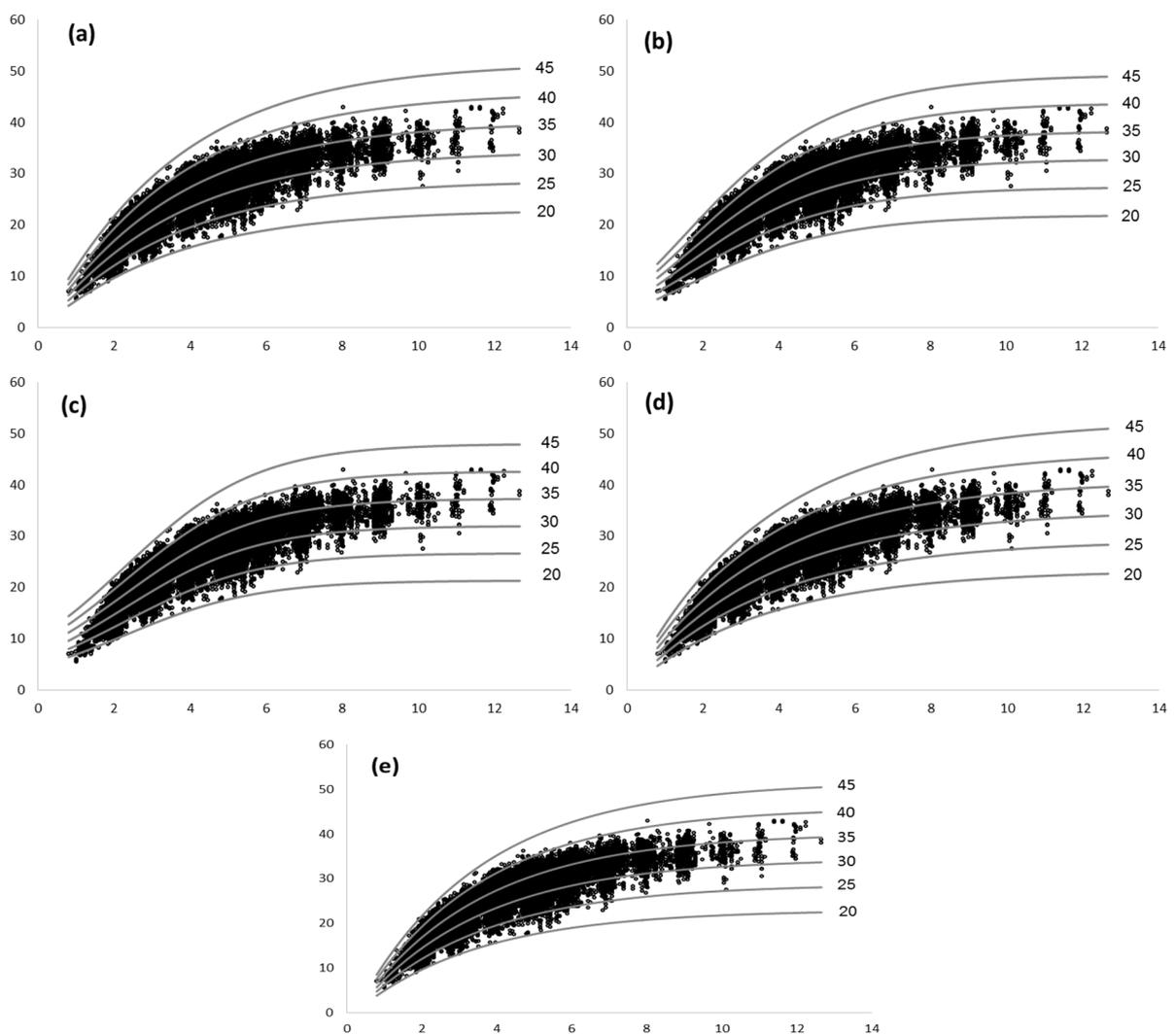
**Figura 3** – Gráfico de dispersão dos resíduos, em porcentagem, para os modelos de Chapman e Richards (a); Gompertz (b); Logístico (c); Weibull (d); Monomolecular (e), com os erros em porcentagem (x) em função da idade (y).  
Fonte: elaborada pelo autor (2016).

Como mostra a Figura 3, os modelos testados apresentaram uma dispersão dos resíduos de maneira semelhante, observando-se sempre uma tendência maior de erros nas menores idades. É possível notar ainda que os modelos de Gompertz e o Logístico (Figuras 3b e 3c) apresentaram uma pior dispersão dos resíduos em

relação aos demais, tendendo a superestimar mais as alturas dominantes nas menores idades, comprovando os resultados estatísticos apresentados na Tabela 4.

Maiores erros ocorrem nas idades iniciais do povoamento devido à sensibilidade ocasionada às plantas e aos fatores externos que atuam sobre as mudas transplantadas, que ocasionam em variações no crescimento em altura, inclusive de árvores dominantes e codominantes (DAVID, 2014).

Curvas de sítios foram geradas para os modelos não lineares ajustados e são apresentadas na Figura 4.



**Figura 4** – Curvas de sítios geradas pelo método da curva guia para os modelos de Chapman e Richards (a); Gompertz (b); Logístico (c); Weibull (d); Monomolecular (e), com as alturas dominantes observadas (x) em função da idade (y).  
Fonte: elaborada pelo autor (2016).

De acordo com a Figura 4, todos os modelos testados apresentaram ajustes satisfatórios para os dados em estudo. As curvas de sítio variaram seus limites entre 20 e 45 metros e foram geradas cinco classes de sítio, com intervalo de cinco metros entre cada classe.

Outra característica desejável para as curvas de sítio é que uma parcela se mantenha estável em uma mesma classe de sítio ao longo de sua existência (CLUTTER et al., 1983). Sendo assim, foi realizado o teste de estabilidade das curvas obtidas pelos cinco modelos testados. Os resultados são apresentados na Tabela 5.

**Tabela 5** – Estabilidade para os diferentes modelos testados para a classificação de sítios florestais.

Modelo	Estabilidade					
	Número de vezes que mudou					
	% não mudou	0 x	1 x	2 x	3 x	4 > x
Chapman e Richards	45,05	3976	3397	1094	302	57
Gompertz	43,30	3822	3517	1121	304	62
Logístico	40,72	3594	3663	1203	307	59
Weibull	45,08	3979	3413	1084	298	53
Monomolecular	45,54	4019	3390	1064	293	60

Fonte: elaborada pelo autor (2016).

De acordo com a Tabela 5, é possível confirmar que todos os modelos testados também apresentaram resultados próximos para o teste de estabilidade. A porcentagem de parcelas estáveis, ou seja, que não mudaram de sítio ao longo das remedições, variou entre 40,72% a 45,54% para os modelos Logístico e Monomolecular, respectivamente.

O teste de estabilidade mostrou que o comportamento das parcelas ao longo das remedições segue o mesmo padrão do desempenho de precisão estatística dos modelos. O modelo que melhor se ajustou (maior correlação e menor RMSE %) foi o que apresentou melhor estabilidade, e vice-versa.

É possível observar uma leve superioridade do modelo Monomolecular em relação aos demais, para a estabilidade, assim como nas estatísticas de precisão da regressão, apresentando um melhor desempenho para a classificação da capacidade produtiva do povoamento em questão. Logo, o mesmo teve o seu desempenho comparado às RNA, que são o foco deste estudo.

Redes Neurais Artificiais foram treinadas com as mesmas variáveis utilizadas pelos modelos de regressão não linear, para servirem como critério de comparação entre as duas técnicas. O resultado é apresentado na Tabela 6.

Como mostra a Tabela 6, os dois tipos de RNA treinadas com as mesmas variáveis utilizadas nos modelos de regressão não linear apresentaram resultados de precisão estatística e de estabilidade bastante próximos aos modelos testados.

As redes do tipo FFBP apresentaram correlação total de 0,9239 e RMSE de 9,405 %. Já as redes do tipo CFBP apresentaram resultados um pouco superiores com correlação de 0,9251 e RMSE de 9,392%. Ao passo que o modelo de regressão não linear que teve o melhor desempenho, no caso deste estudo, o Monomolecular, alcançou uma correlação de 0,9203 e RMSE de 9,441 %, performance muito próxima ao alcançado pelas RNA.

**Tabela 6** – Estatísticas de exatidão e estabilidade para as diferentes RNA treinadas com variáveis semelhantes aos modelos de regressão não linear para estimativa da altura de árvores dominantes (Hdom).

RNA	Arquitetura	Entrada	Correlação				RMSE (m)	RMSE (%)
			Trein.	Val.	Teste	Total		
FFBP	1 - 4 - 1	Idade	0,9240	0,9224	0,9248	0,9239	2,416	9,405%
CFBP			0,9259	0,9250	0,9228	0,9251	2,413	9,392%

RNA	Arquitetura	Entrada	% que não mudou	Estabilidade				
				Nº de vezes que a parcela mudou de classe				
				0 x	1 x	2x	3 x	4 > x
FFBP	1 - 4 - 1	Idade	46,71	4119	3241	1090	301	68
CFBP			46,76	4124	3245	1082	297	71

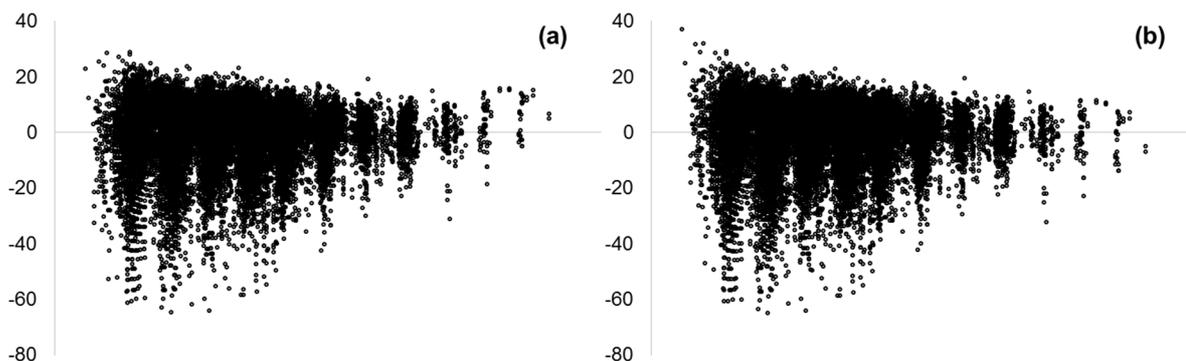
Fonte: elaborada pelo autor (2016).

Já para o teste de estabilidade, as RNA apresentaram 46,71 % e 46,76 % de parcelas que permaneceram estáveis na classificação para o tipo FFBP e CFBP, respectivamente. Esses valores, em porcentagem, representam um total de 4.119 e 4.124 parcelas estáveis, ao passo que o modelo de regressão não linear alcançou uma estabilidade de 45,54 %, ou seja, um total de 4.019 parcelas estáveis.

A diferença entre os métodos estudados foi um ganho de 105 parcelas estáveis pelo uso da RNA do tipo CFPB em relação ao modelo Monomolecular.

A Figura 5 apresenta os gráficos de dispersão dos resíduos, em porcentagem, para os dois tipos de RNA treinadas para a estimativa da altura dominante, utilizando as mesmas variáveis dos modelos de regressão não linear.

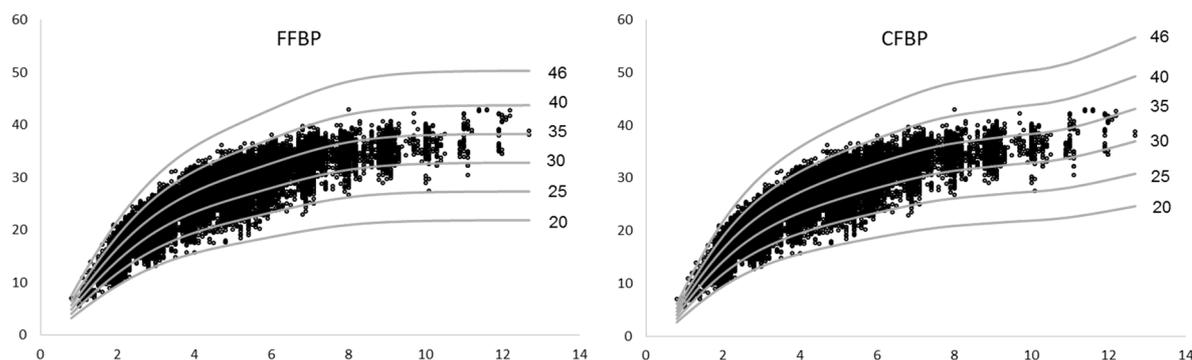
De acordo com a Figura 5, os dois tipos de RNA apresentaram uma dispersão dos resíduos próximas entre si, e com padrão semelhante ao encontrado pelos modelos de regressão não linear, no que se refere ao fato de apresentarem maiores erros nas menores idades.



**Figura 5** – Gráfico de dispersão dos resíduos, em porcentagem, para as RNA do tipo FFBP (a) e CFBP (b) utilizando as mesmas variáveis dos modelos de regressão não linear testados, com o erro em porcentagem (x) em função da idade (y).  
Fonte: elaborado pelo autor (2016).

Para a obtenção dos limites de sítio pelo método da curva guia a partir de alturas dominantes estimadas com RNA, foi necessário conhecer a altura dominante na idade de referência ( $H_{ref}$ ). Foram observadas as alturas dominantes estimadas aos sete anos (idade de referência) pela RNA e então prosseguido o método normalmente. Nos casos das RNA que estimavam valores diferentes para uma mesma idade, devido à estratificação do povoamento com a adição de novas variáveis nos modelos, foi calculada então a média aritmética dos valores, e estes foram utilizados como altura dominante na idade de referência. Os limites das classes de sítios foram mantidos os mesmos das curvas geradas pelos modelos não lineares.

As curvas de sítio geradas pelos dois tipos de RNA treinadas, FFBP e CFBP, com as mesmas variáveis utilizadas pelos modelos de regressão não linear, estão apresentadas na Figura 6.



**Figura 6** – Curvas de sítio geradas com as alturas dominantes estimadas pelas RNA do tipo FFBP e CFBP, pelo método da curva guia, utilizando as mesmas variáveis dos modelos de regressão não linear testados, com as alturas dominantes observadas (x) em função da idade (y).

Fonte: elaborada pelo autor (2016).

As curvas de sítios apresentadas na Figura 6 mostram que as RNA conseguiram estimar altura dominante com precisão e gerar curvas de sítios satisfatórias pelo método da curva guia. Ainda é possível inferir que os resultados ficaram próximos aos encontrados pelos modelos de regressão não linear, assim como para os outros critérios estatísticos e de estabilidade da classificação que também foram analisados.

A Tabela 7 apresenta as arquiteturas e estatísticas de exatidão obtidas para as RNA treinadas com adição de variáveis edafoclimáticas e dendrométricas características do povoamento em estudo, para a estimativa da altura dominante.

De acordo com a Tabela 7, é possível concluir que as RNA treinadas com adição de variáveis do povoamento tendem a apresentar resultados superiores aos modelos de regressão não linear e das RNA treinadas para estimar altura dominante em função da idade. O que é usualmente aplicado para a classificação de sítios florestais.

Como esperado, a adição de mais variáveis de entrada resulta em um aumento da precisão nas estimativas desejadas, podendo gerar benefícios para a técnica da classificação da capacidade produtiva em florestas.

Um ponto importante mostrado na Tabela 7 foi a qualidade dos ajustes para as diferentes RNA. Todas apresentaram um nível muito próximo de eficiência para o treinamento, teste e validação dos dados, confirmando que as redes apresentaram um desempenho satisfatório para estimativa da variável de interesse.

**Tabela 7** – Arquitetura, variáveis de entrada e estatísticas de exatidão para as diferentes RNA treinadas para estimativa da altura de árvores dominantes (Hdom).

RNA	Arquitetura	Entrada	Tipo de RNA	Correlação				RMSE (m)	RMSE (%)
				Trein.	Val.	Teste	Total		
1	2 - 8 - 1	Id, S	FFBP	0,9240	0,9224	0,9248	0,9239	2,374	9,24%
			CFBP	0,9259	0,9250	0,9228	0,9251	2,355	9,17%
2	2 - 8 - 1	Id, P	FFBP	0,9209	0,9245	0,9210	0,9216	2,407	9,37%
			CFBP	0,9351	0,9314	0,9343	0,9342	2,214	8,62%
3	3 - 12 - 1	Id, S, P	FFBP	0,9246	0,9208	0,9251	0,9240	2,374	9,24%
			CFBP	0,9383	0,9357	0,9351	0,9372	2,164	8,42%
4	2 - 8 - 1	Id, Ab	FFBP	0,9554	0,9549	0,9539	0,9550	1,840	7,16%
			CFBP	0,9565	0,9554	0,9533	0,9556	1,827	7,11%
5	3 - 12 - 1	Id, Ab, q	FFBP	0,9600	0,9583	0,9592	0,9595	1,748	6,81%
			CFBP	0,9593	0,9604	0,9600	0,9596	1,745	6,79%
6	3 - 12 - 1	Id, Ab, S	FFBP	0,9575	0,9573	0,9549	0,9569	1,802	7,01%
			CFBP	0,9579	0,9588	0,9559	0,9577	1,785	6,95%
7	4 - 16 - 1	Id, Ab, S, P	FFBP	0,9601	0,9610	0,9569	0,9597	1,745	6,79%
			CFBP	0,9611	0,9592	0,9600	0,9605	1,729	6,73%
8	4 - 16 - 1	Id, Ab, q, S	FFBP	0,9613	0,9610	0,9602	0,9611	1,715	6,68%
			CFBP	0,9611	0,9618	0,9610	0,9612	1,710	6,66%
9	5 - 20 - 1	Id, Ab, q, S, P	<b>FFBP</b>	<b>0,9627</b>	<b>0,9641</b>	<b>0,9613</b>	<b>0,9627</b>	<b>1,678</b>	<b>6,53%</b>
			<b>CFBP</b>	<b>0,9651</b>	<b>0,9630</b>	<b>0,9638</b>	<b>0,9644</b>	<b>1,643</b>	<b>6,40%</b>
10	2 - 8 - 1	Id, q	FFBP	0,9564	0,9547	0,9556	0,9559	1,824	7,10%
			CFBP	0,9571	0,9544	0,9588	0,9569	1,801	7,01%
11	3 - 12 - 1	Id, q, S	FFBP	0,9586	0,9590	0,9568	0,9583	1,771	6,90%
			CFBP	0,9590	0,9591	0,9574	0,9587	1,765	6,87%
12	4 - 16 - 1	Id, q, S, P	FFBP	0,9610	0,9603	0,9613	0,9609	1,721	6,70%
			CFBP	0,9617	0,9607	0,9625	0,9616	1,703	6,63%

Onde: Trein. = Treinamento; Val.=Validação; FFBP = RNA do tipo *Feed Forward Back Propagation Network* e CFBP = RNA do tipo *Cascade Forward Back propagation Network*.

Fonte: elaborada pelo autor (2016).

Outro fator relevante que é possível concluir com este estudo é que a rede do tipo CFBP tende a apresentar uma leve superioridade em relação às redes do tipo FFBP. Isso pode ter ocorrido devido às redes CFBP possuírem um efeito de cascata durante o seu treinamento, onde as suas camadas são ligadas a todas as camadas posteriores, transmitindo os valores de pesos calculados a partir dos dados de entrada, fazendo com que o seu aprendizado seja superior às redes FFBP, que possuem apenas a ligação de uma camada com a sua posterior.

A RNA que apresentou melhor resultado estatístico foi a RNA 9, para ambos os tipos de redes treinadas (FFBP e CFBP). Este resultado era esperado, posto que, dentre todas, esta é a rede que possui a maior quantidade de variáveis de entrada, no total de cinco, sendo elas: idade, área basal, diâmetro médio quadrático e as

variáveis categóricas de solo e precipitação. Essa RNA apresentou a correlação total para o tipo FFBP de 0,9627 e erro RMSE% de 6,53%, já para o tipo CFBP correlação de 0,9644 e 6,40%.

É possível inferir também que a adição de variáveis numéricas que descrevem o comportamento do povoamento, no caso deste estudo, as variáveis dendrométricas: área basal e o diâmetro médio quadrático, em conjunto com a idade, impactaram mais positivamente a precisão dos ajustes, do que a adição de variáveis categóricas (solo e precipitação).

As RNA 1, 2 e 3, que tiveram como entrada somente a adição das variáveis categóricas, o coeficiente de correlação variou entre 0,9210 e 0,9372 e o RMSE% de 9,37% e 8,42%, respectivamente, o que foi praticamente alcançado pelo modelo de regressão não linear e pelas redes que foram treinadas com apenas idade como entrada.

Já as redes que tiveram como variáveis de entrada a área basal e o diâmetro médio quadrático, sempre apresentaram correlação superior a 0,95 e o RMSE% variando entre 6,40 e 7,16%. Isso permite concluir que a adição de variáveis dendrométricas que tenham relação com a produtividade do povoamento, auxiliam em estimativas mais precisas, quando se trata de crescimento em altura de árvores dominantes, se comparada à adição de somente características edafoclimáticas, como solo e precipitação.

Um fator que pode ter afetado essa menor contribuição das variáveis de solo e precipitação na estimativa do crescimento em altura dominante do povoamento, é que, a estratificação da área em classes relacionadas às suas características edafoclimáticas não foram suficientes para diferenciar o padrão de crescimento da floresta. O que é possível mais facilmente com variáveis dendrométricas que podem descrever isso de forma mais direta, por se tratarem de medidas que foram mensuradas ao longo do tempo no povoamento em estudo.

Binoti et al. (2013), estimando altura total de árvores em povoamentos equiâneos de Eucalipto, com RNA, verificaram que a aplicação da metodologia permite reduzir o tempo para a realização de um inventário. Isto porque a partir da mensuração apenas do *dap* e das alturas das árvores dominantes do povoamento, que são necessárias também para a classificação da capacidade produtiva, são capazes de realizar estimativas de altura total de árvores de Eucalipto sem

tendenciosidade e alta precisão, com valores de correlação acima de 0,98 e RMSE variando de 2,43% a 5,00%, além de pequena dispersão residual.

Cosenza et al. (2015) avaliaram a aplicação de técnicas de inteligência artificial (Redes Neurais Artificiais e Máquinas de Vetor de Suporte) no processo de classificação da capacidade produtiva de povoamentos florestais com a inclusão de variáveis edáficas, de manejo e de povoamento. Os autores compararam seus resultados com os obtidos pelo método da curva guia, onde as variáveis de entrada para o treinamento eram características dos povoamentos florestais estudados, e como saída, o índice de sítio (IS) que foi previamente determinado pelo método da curva guia. Assim, eles concluíram que as RNA foram mais precisas para classificar a capacidade produtiva do que a MVS. Além disso, a inclusão de muitas variáveis pouco significativas pode prejudicar ou ser indiferente no desempenho das técnicas.

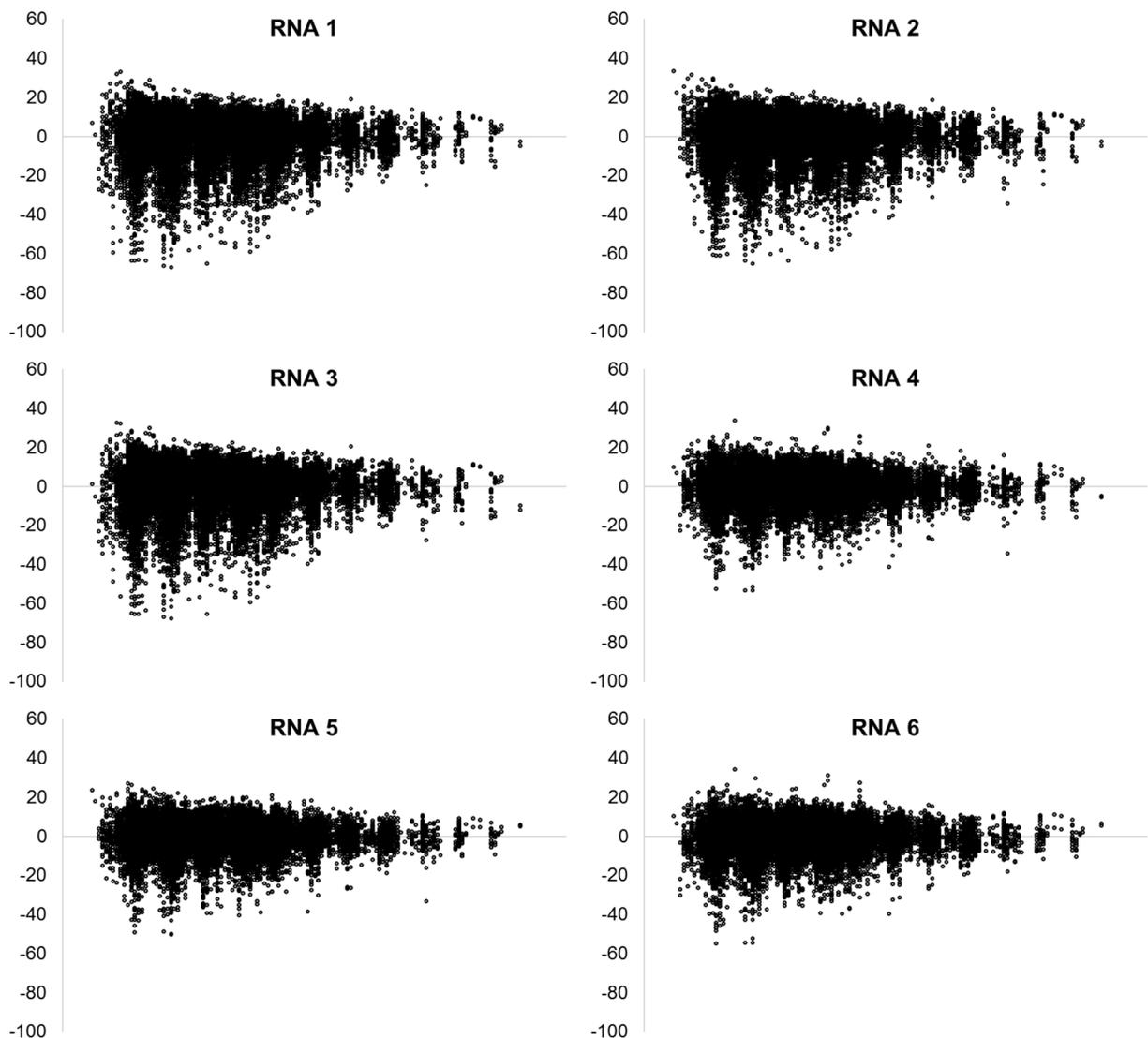
De acordo com os mesmos autores, para que a classificação ocorra de forma satisfatória, o uso conjunto das variáveis tipo de solo, espaçamento do plantio, idade e altura dominante, foram suficientes para classificar os sítios. A inclusão da idade neste caso foi fundamental por dar sentido ao valor da altura dominante, de forma que um talhão com idade avançada e baixa altura dominante indicaria baixo potencial produtivo, e vice-versa. Já a variável espaçamento, contribui para a melhoria do treinamento, por ser intimamente ligada à densidade do povoamento, sendo possível atribuir pesos adequados para um local onde a produtividade ao longo do tempo ( $m^3.há^{-1}.ano^{-1}$ ) não seja condizente com o adensamento do plantio.

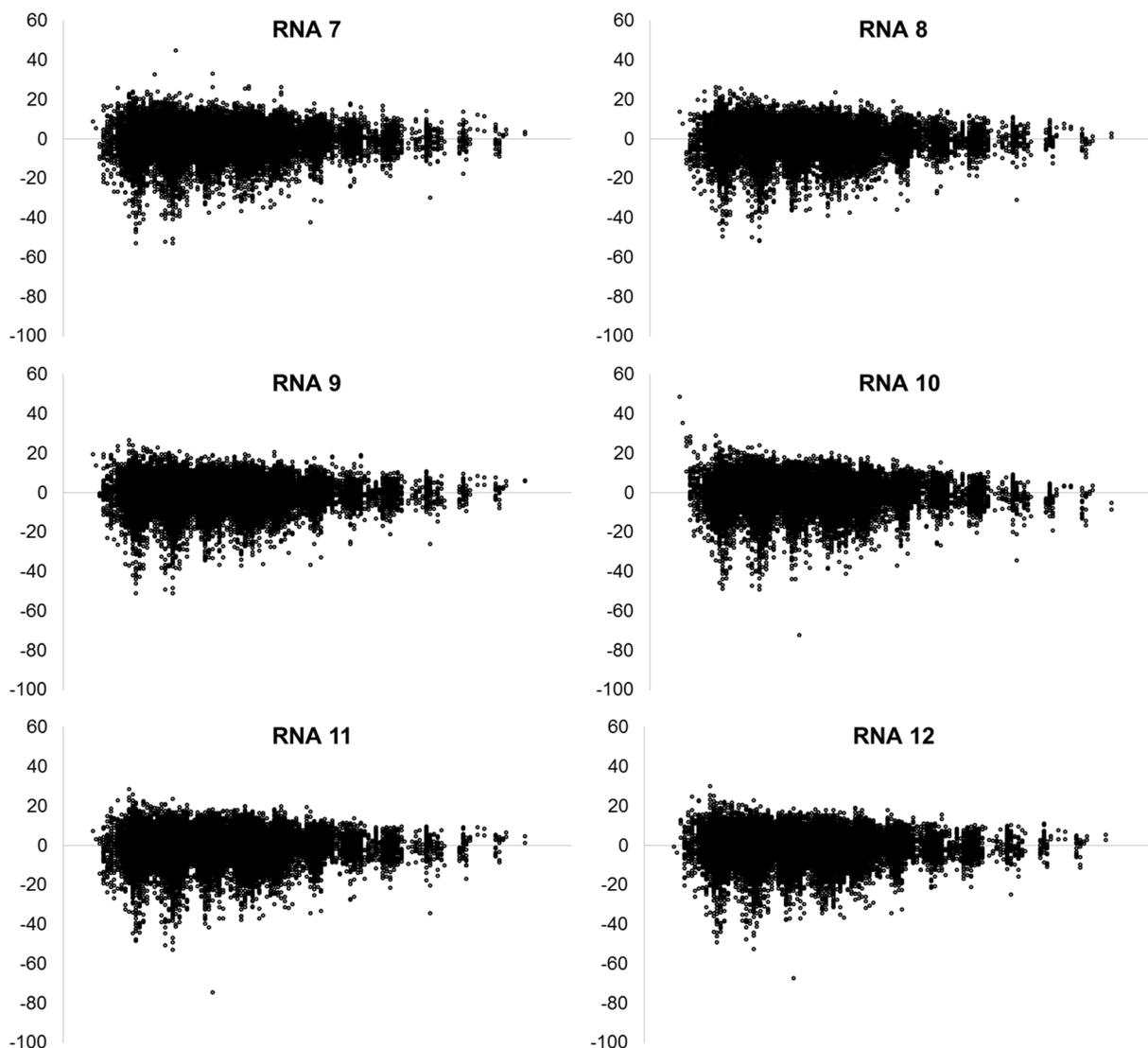
Gonçalves (1988) destacou que o efeito das variáveis climáticas sobre a qualidade do sítio é notado principalmente em extensas regiões. No caso de regiões próximas, onde existe a ocorrência de diminutos efeitos microclimáticos, as variáveis topográficas e pedológicas explicam melhor as variações de crescimento das árvores. Baixas temperaturas, deficiências hídricas acentuadas ou de elevados excedentes hídricos são alguns exemplos de limitações climáticas que podem ocorrer.

Özçelik et al. (2013) fizeram a aplicação de RNA do tipo *Back Propagation* para a estimativa da altura de árvores de florestas naturais de *Crimean juniper*, na Turquia, comparados com modelos não lineares de efeito misto e modelos generalizados. Os pesquisadores observaram uma redução de 13% do RMSE em relação aos modelos de regressão não linear, e com aplicação de RNA do tipo *Back Propagation*, a redução do RMSE foi superior a 20%. Além disso, a rede neural é

uma alternativa confiável por possuir melhor capacidade de generalização. Se analisado o ponto de vista prático, ainda possui a vantagem de que não há a necessidade de medidas de altura para a sua implementação, o que não é necessário para a calibração dos modelos de efeitos mistos, sendo um fator limitante de acordo com a sua utilização.

A Figura 7 apresenta os gráficos de dispersão dos resíduos das 12 RNA do tipo FFBP, treinadas para estimar alturas dominantes. Já a Figura 8 apresenta os gráficos de dispersão dos resíduos, em porcentagem, para as 12 diferentes RNA do tipo CFBP, treinadas neste estudo para estimar alturas dominantes.



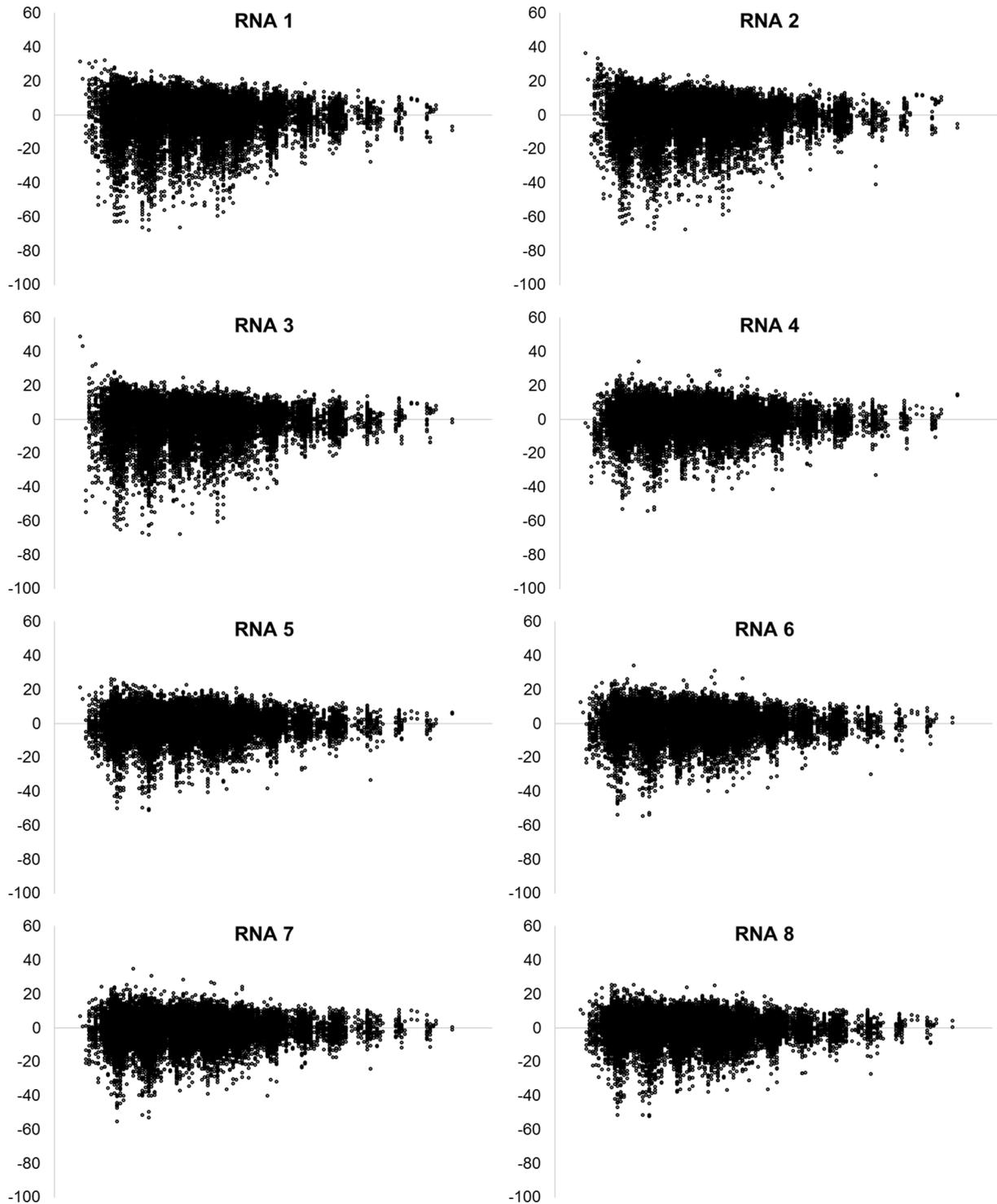


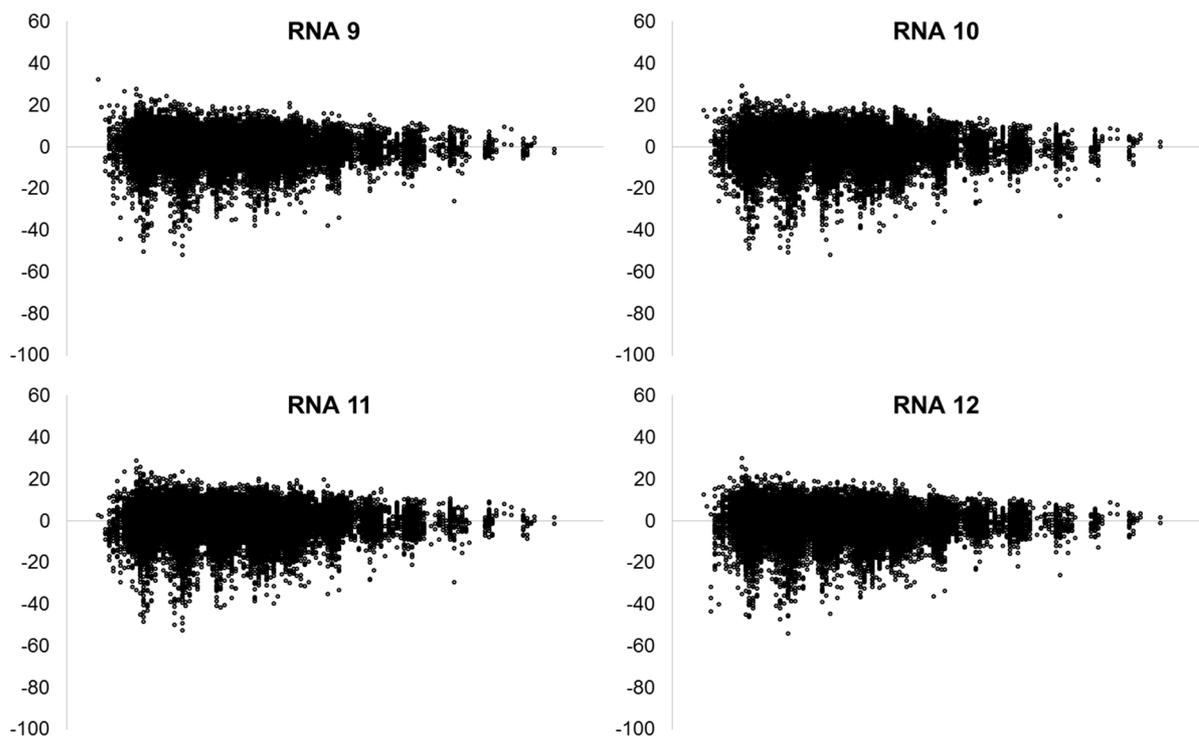
**Figura 7** – Dispersão dos resíduos, em porcentagem, em função da idade para as diferentes RNA do tipo *Feed Forward Back Propagation Network* (FFBP) treinadas para estimar altura dominante, com o erro em porcentagem (x) em função da idade (y).

Fonte: elaborada pelo autor (2016).

De acordo com as Figuras 7 e 8, é possível concluir que todas as RNA propostas, variando as entradas e arquiteturas, são capazes de estimar altura dominante sem tendenciosidade nos resíduos. Porém, é notório que as RNA 1, 2 e 3 apresentam dispersão dos erros inferior, comprovando seus desempenhos estatísticos, que foram inferiores aos demais. Já as redes que tiveram a adição de variáveis dendrométricas e categóricas, como é o caso da RNA 9, que apresentou o melhor desempenho estatístico, comprovam sua superioridade também na dispersão gráfica dos erros percentuais.

Este comportamento residual é explicado através das estatísticas de precisão obtidas (Tabela 7) para cada RNA diferente, que com a adição de novas variáveis de entrada nas redes, houve um ganho de precisão nas estimativas realizadas.





**Figura 8** – Dispersão dos resíduos, em porcentagem, em função da idade, para as diferentes RNA do tipo *Cascade Forward Back propagation Network (CFBP)* treinadas para estimar altura dominante, com o erro em porcentagem (x) em função da idade (y).

Fonte: elaborada pelo autor (2016).

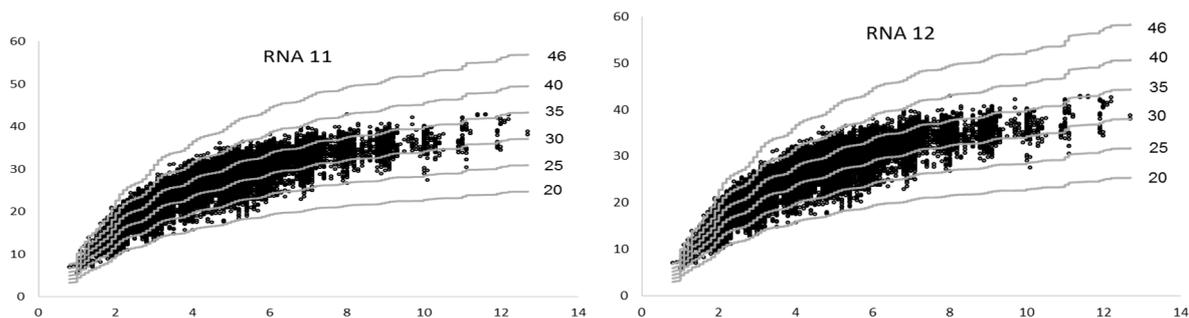
Curvas de sítios foram geradas com as alturas dominantes estimadas pelas diferentes RNA do tipo FFBP, pelo método da curva guia, e são apresentadas na Figura 9.

A Figura 9 mostra que todas as RNA treinadas foram capazes de realizar estimativas da altura dominante e com elas gerar curvas de classificação da capacidade produtiva, pelo método proposto neste estudo, de forma satisfatória.

Entretanto, é possível observar que as RNA em que houve a adição de variáveis de entrada, as curvas geradas não apresentaram comportamento de crescimento perfeito, como ocorre nos modelos de regressão não linear.

Isso ocorre porque as RNA com mais de uma entrada conseguem estimar valores de altura dominante diferentes para uma mesma idade, pois, elas passam a ser correlacionadas com outras variáveis características do povoamento, que não só idade, como ocorre nos modelos não lineares e nas RNA treinadas com variáveis semelhantes aos modelos.

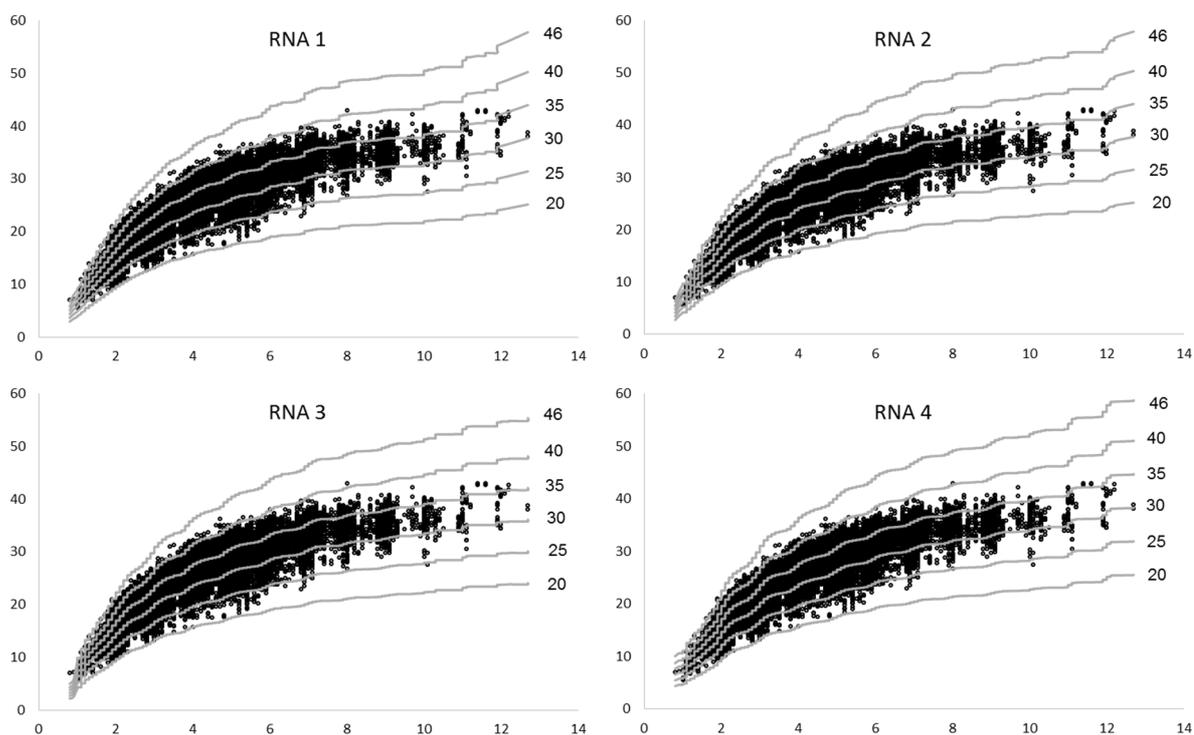


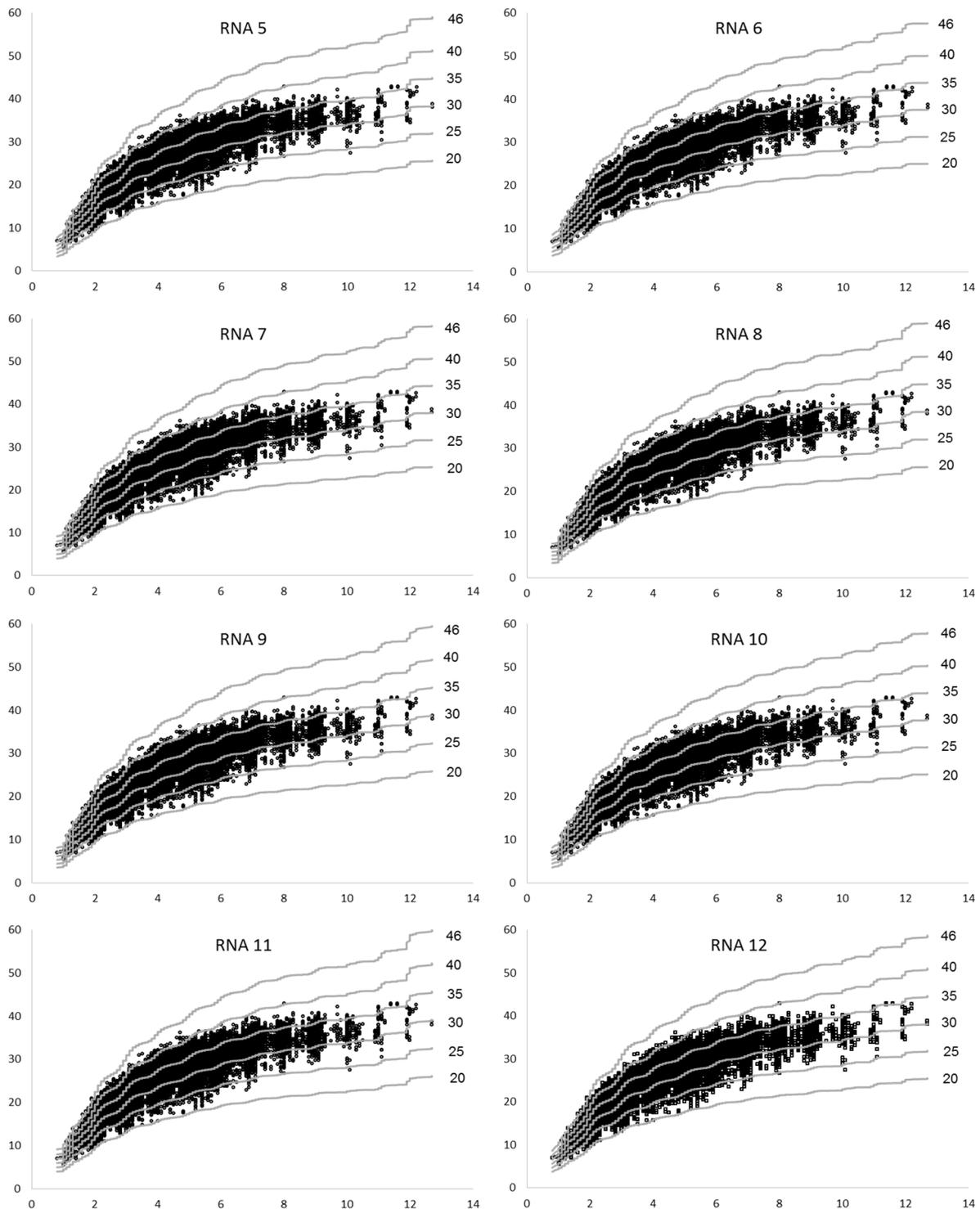


**Figura 9** – Curvas de sítio geradas com as alturas dominantes estimadas pelas diferentes RNA do tipo *Feed Forward Back Propagation Network* (FFBP) pelo método da curva guia, com as alturas dominantes observadas (x) em função da idade (y).

Fonte: elaborada pelo autor (2016).

O mesmo comportamento pode ser observado para as curvas de sítios geradas com as alturas dominantes estimadas pelas diferentes RNA do tipo CFBP pelo método da curva guia, que estão apresentadas na Figura 10.





**Figura 10** – Curvas de sítio geradas com as alturas dominantes estimadas pelas diferentes RNA do tipo *Cascade Forward Back propagation Network (CFBP)* pelo método da curva guia, com as alturas dominantes observadas (x) em função da idade (y).

Fonte: elaborada pelo autor (2016).

As redes do tipo FFBP e CFBP não foram aplicadas em estudos voltados às Ciências Florestais, porém, já foram aplicadas em estudos na Engenharia Civil e Hidrológica.

Badde et al. (2013) utilizaram as RNA na estimação da resistência à compressão de concreto. O estudo revela que o desempenho da CFBP é melhor do que a FFBP para todas as misturas de concreto estudadas.

Tengeleng e Armand (2014) aplicaram redes neurais do tipo CFBP na estimativa do teor de água, taxa de chuva e a refletividade ao radar, em cinco localidades da África subsaariana, e obtiveram resultados satisfatórios, nos quais os modelos foram capazes de prever valores de precipitação em diferentes latitudes.

Diamantopoulou (2012), estudando florestas de Abeto (*Abies borisii* regis Mattf.), na Grécia, avaliou diferentes abordagens de RNA para estimar a altura das árvores através dos tipos: *Back Propagation Artificial Neural Network* (BPANN), *Cascade Correlation Artificial Neural Network* (CCANN), e os modelos *Generalized Regression Artificial Neural Network* (GRNN) e comparados com modelos de regressão não linear (NLR) e linear múltipla (MLR). Verificou-se que todos os modelos testados foram eficientes na estimativa de altura de árvores, porém, o modelo CCANN apresentou resultados mais precisos.

Diamantopoulou (2012) destacou que a utilização de Redes Neurais Artificiais tem recebido atenção considerável, por ser uma abordagem alternativa e confiável para a realização da estimativa da altura de árvores, tendo como principais vantagens em relação aos modelos de regressão não linear: a capacidade de aprender a partir dos dados complexos e o fato de que os modelos não têm que ser previamente especificados, em contraste com outras técnicas de modelagem não lineares, que se configuram como um processo muito difícil, especialmente no caso de modelagem do comportamento complexo do crescimento do fuste de árvore e as suas dimensões.

Um grande problema encontrado na técnica utilizada para a classificação da capacidade produtiva em povoamentos florestais é a estabilidade da classificação, ou seja, uma mesma parcela classificada em suas diferentes idades pode apresentar classes de sítios distintas, fazendo com que a tomada de decisão a respeito da classe que será atribuída à mesma (e o valor do índice de sítio), seja realizada de forma subjetiva. Sendo assim, é de interesse que uma classificação de

sítios que apresente uma melhor estabilidade, ou seja, menor variação entre classes ao longo das idades seja alcançada neste processo.

Com isso, se as RNA conseguem fazer estimativas mais precisas das alturas dominantes para as diferentes idades devido às suas características peculiares, estes resultados podem impactar também positivamente na estabilidade das parcelas dentro das curvas de sítios geradas pelo método proposto neste estudo.

Sendo assim, a Tabela 8 apresenta o resultado do teste de estabilidade para as 24 diferentes RNA treinadas.

**Tabela 8** – Estabilidade das curvas de sítios geradas pelo método da curva guia a partir das estimativas de altura dominantes realizadas com RNA treinadas dos dois tipos.

RNA	Entrada	Tipo de RNA	% que não mudou	Estabilidade				
				Nº de vezes que a parcela mudou de classe				
				0 x	1 x	2x	3 x	4 > x
1	Id, S	FFBP	46,42	4094	3309	1043	309	64
		CFBP	46,14	4069	3376	1015	288	72
2	Id, P	FFBP	46,79	4126	3241	1094	296	62
		CFBP	48,24	4254	3149	1052	314	50
3	Id, S, P	FFBP	46,07	4063	3345	1037	319	55
		CFBP	47,05	4149	3272	1018	328	52
4	Id, Ab	FFBP	55,40	4886	2604	1013	256	60
		CFBP	56,41	4975	2545	997	251	51
5	Id, Ab, q	FFBP	57,13	5038	2501	982	241	57
		CFBP	57,47	5068	2477	979	246	49
6	Id, Ab, S	FFBP	57,49	5070	2479	965	262	43
		CFBP	57,76	5094	2447	988	251	39
7	Id, Ab, S, P	FFBP	57,89	5105	2459	983	237	35
		CFBP	57,67	5086	2465	988	241	39
8	Id, Ab, q, S	FFBP	58,10	5124	2458	971	229	37
		CFBP	58,05	5119	2467	955	230	48
9	Id, Ab, q, S, P	<b>FFBP</b>	<b>58,61</b>	<b>5169</b>	<b>2431</b>	<b>949</b>	<b>225</b>	<b>45</b>
		<b>CFBP</b>	<b>58,68</b>	<b>5175</b>	<b>2414</b>	<b>959</b>	<b>223</b>	<b>48</b>
10	Id, q	FFBP	56,00	4939	2573	987	256	64
		CFBP	57,00	5027	2489	980	264	59
11	Id, q, S	FFBP	56,97	5024	2544	950	253	48
		CFBP	57,15	5040	2539	947	246	47
12	Id, q, S, P	FFBP	57,41	5063	2496	971	228	61
		CFBP	58,00	5115	2427	982	243	52

Onde: FFBP = RNA do tipo *Feed Forward Back Propagation Network* e CFBP = RNA do tipo *Cascade Forward Back propagation Network*.

Fonte: elaborada pelo autor (2016).

A Tabela 8 confirma o resultado obtido pelas precisões estatísticas (Tabela 7), de forma que as RNA com adições de variáveis categóricas (classes de solo e precipitação) apresentaram uma variação do total de parcelas estáveis entre 46,14% e 48,24 %. Em números, as parcelas estáveis ficaram em torno de 4.069 e 4.254. Estes resultados ficaram próximos aos encontrados pelo modelo de regressão não linear, que alcançou um total de 45,54 %, ou seja, 4.019 parcelas estáveis, e para os modelos de RNA, que tiveram como entrada somente a variável entrada, 46,76 % de estabilidade, representando um total de 4.214 parcelas. Sendo assim, o ganho em quantidade de parcelas estáveis obtidas na classificação a partir da RNA 2, do tipo CFBP, apresenta-se, aproximadamente, em torno de 200 parcelas em relação aos modelos que estimavam altura dominante em relação somente à idade das parcelas.

Já para as redes que tiveram como adição de variáveis dendrométricas durante o seu treinamento, como são os casos das RNA 4 a 12, houve um ganho em estabilidade de parcelas sempre superior a 55%. Numericamente, a menor quantidade de parcelas estáveis fica em torno das 4.900, e a maior, em 58,68%, totalizando 5.175 parcelas que não mudaram de classe.

Seguindo a tendência de resultados obtidos neste estudo, a RNA que apresentou a melhor estabilidade de parcelas na sua classificação foi a RNA 9, que teve como entrada todas as variáveis disponíveis neste estudo, sendo elas: a idade, que já é comumente utilizada, combinada com área basal, diâmetro médio quadrático, e variáveis categóricas de solo e precipitação.

Essa RNA teve um total de 58,68 % e 58,61 % de parcelas estáveis para os tipos CFBP e FFBP, respectivamente. Portanto, a RNA que conseguiu realizar a melhor classificação dos sítios florestais em estudo foi a RNA 9, do tipo CFBP, que alcançou um total de 5.175 parcelas estáveis pela classificação, além de obter os melhores resultados de precisão estatística e distribuição gráfica dos resíduos.

Assim como nos resultados estatísticos, foi possível perceber uma superioridade das redes do tipo CFBP em relação às do tipo FFBP também no teste de estabilidade, onde a mesma na maioria das vezes apresentava um maior número de parcelas estáveis ao longo das remedições no tempo e, conseqüentemente, um menor número de parcelas que mudavam de sítio nos anos de remedições.

Do ponto de vista prático e operacional, a técnica proposta neste estudo, que consiste na utilização de RNA com adição de variáveis dendrométricas e edafoclimáticas do povoamento para estimativa de alturas dominantes e aplicá-la na

classificação de sítios florestais pelo método da curva-guia, trouxe uma melhora significativa em relação à quantidade de parcelas estáveis nas classes de produtividade que foram determinadas.

Em relação ao modelo de regressão não linear (Monomolecular), houve um aumento de 1.156 de parcelas que não apresentaram mudanças na sua classificação ao longo das idades, o que corresponde a 13,4% do total, além de diminuir também as parcelas que mudaram sua classificação em quantidades menores.

Já para a RNA de melhor desempenho, que foi treinada apenas com a idade para variável de entrada, houve um ganho de 1.051 parcelas estáveis, representando 11,9 % do total.

Com isso, observa-se através da aplicação de RNA treinadas, tendo como entrada a idade das parcelas, combinadas com a área basal e diâmetro médio quadrático, e variáveis edafoclimáticas de solo e precipitação que fazem parte do monitoramento contínuo pelas empresas florestais, a não adição de custo para a obtenção das mesmas.

A principal aplicação em se conhecer as diferentes classes de produtividade de uma floresta está em aplicá-las nos modelos de crescimento e produção, que são a base para o planejamento a curto, médio e longo prazo de empreendimentos florestais, além de ajudar também em tomadas de decisões a respeito do manejo que deverá ser adotado nas diferentes áreas.

Portanto, devido à importância destes resultados para o planejamento gerencial de uma floresta, justifica-se fazer a classificação da capacidade produtiva de florestas com a aplicação da técnica, por esta gerar benefícios de precisão nas estimativas, além dos ganhos nos aspectos financeiros e cronológicos, que são imprescindíveis quando se trata de processos de otimização.

#### 4. CONCLUSÃO

Os cinco modelos de regressão não linear foram capazes de classificar a capacidade produtiva do local de forma satisfatória, porém, houve uma superioridade do modelo Monomolecular nas suas estatísticas de precisão, assim como na estabilidade das curvas de sítio.

RNA do tipo FFBP e CFBP, treinadas com as mesmas variáveis utilizadas pelos modelos de regressão não linear, apresentaram resultados praticamente semelhantes ao modelo Monomolecular para precisão estatística e estabilidade das parcelas. Houve um ganho de 105 parcelas estáveis com a aplicação da RNA do tipo CFBP.

As redes do tipo CFBP foram ligeiramente superiores às redes do tipo FFBP tanto para estimativa de alturas dominantes como na estabilidade das curvas de sítio.

A introdução de variáveis do povoamento, como área basal e diâmetro médio quadrático, combinado com a idade das parcelas e variáveis categóricas de solo e precipitação no treinamento das RNA, trouxeram melhorias nas estimativas das alturas dominantes e, por consequência, na estabilidade das parcelas.

Na aplicação de alturas dominantes estimadas pelas RNA do tipo CFBP, treinadas com as mesmas variáveis utilizadas pelos modelos de regressão não linear, observou-se um ganho de 105 parcelas estáveis na classificação.

A adição de variáveis dendrométricas e edafoclimáticas às RNA do tipo CFBP melhorou a estabilidade da classificação da capacidade produtiva em relação ao modelo de regressão não linear selecionado, em 1.156 parcelas estáveis, o que corresponde a 13,4% do total.

Este estudo validou como satisfatória a técnica proposta e pode ser uma alternativa eficaz para ser utilizada na classificação de sítios florestais e trazer benefícios para manejadores florestais.

## REFERÊNCIAS

- ALMEIDA, A. C.; BARROS, P. L. C.; MONTEIRO, J. H. A.; ROCHA, B. R. P. Estimativa de biomassa arbórea: uma comparação entre métodos estatísticos e redes neurais. In: ENCONTRO DE ENERGIA NO MEIO RURAL. **Anais...** 2006.
- BADDE, D. S.; GUPTA, A. K.; PATKI, V. K. Cascade and Feed Forward Back propagation Artificial Neural Network Models for Prediction of Compressive Strength of Ready Mix Concrete. **IOSR J. Mech. Civ. Eng.**, v. 3, p. 1-6, 2013.
- BASHEER, I. A.; HAJMEER, M. Artificial neural networks: fundamentals, computing, design, and application. **Journal of Microbiological Methods**, v. 43, p. 3-31, 2000.
- BRAGA, F. A.; BARROS, N. F.; SOUZA, A. L.; COSTA, L. M. Características ambientais determinantes da capacidade produtiva de sítios cultivados com eucalipto. **Revista Brasileira de Ciência do Solo**, Viçosa, v. 23, n. 2, p. 291-298, 1999.
- BRAGA, A. de P.; CARVALHO, A. P. de L. F. de; LUDEMIR, T. B. **Redes Neurais Artificiais: Teoria e Aplicações**. 2 ed. Rio de Janeiro: LTC, 2007, 248 p.
- BRAVO-OVIEDO, A.; DEL RIO, M.; MONTEIRO, G. Site index curves and growth model for mediterranean maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) in Spain. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, n. 201, p. 187-197, 2004.
- BINOTI, M. L. M. S; BINOTI, D. H. B.; LEITE, H. G. Aplicação de redes neurais artificiais para estimação da altura de povoamentos equiâneos de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 37, n. 4, p. 639-645, 2013.
- BULLINARIA, J. A. Introduction to Neural Computation. **Notas de aula**. 2010. Disponível em: <<http://www.cs.bham.ac.uk/~jxb/inc.html>>. Acesso em: 15 mar. 2016.
- CARRERO, O.; JEREZ, M.; MACCHIAVELLI, R.; ORLANDONI, G.; STOCK, J. Ajuste de curvas de índice de sitio mediante modelos mixtos para plantaciones de *Eucalyptus urophylla* en Venezuela. **APR**, v. 33, n. 4, p. 265-272, 2008.
- CLUTTER, J. L.; PIENAR, L. V.; BRISTER, G. H.; BAILEY, R. L. **Timber management: a quantitative approach**. New York, John Willey e Sons, 1983, 333 p.
- CORNE, S. A.; CARVER, S. J.; KUNIN, W. E.; LENNON, J. J.; HESS, W. . S. van. Predicting forest attributes in southeast Alaska using artificial neural networks. **Forest Science**, v. 50, n. 2, p. 259-276, 2004.

COSENZA, D. N.; LEITE, H. G.; MARCATTI, G. E.; BINOTI, D. H. B.; ALCÂNTARA, A. E. M. de; RODE, R. Classificação da capacidade produtiva de sítios florestais utilizando máquina de vetor de suporte e rede neural artificial. **Sci. For.**, Piracicaba, v. 43, n. 108, p. 955-963, 2015.

CUNHA NETO, F. R. C.; SCOLFORO, J. R. S.; OLIVEIRA, A. D. de; NATALINO CALEGÁRIO, N.; KANEGAE JÚNIOR, H. Uso da diferença algébrica para construção de curva de índice de sítio para *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus urophylla*, na região de Luiz Antônio - SP. **Cerne**, Lavras, v. 2, n. 2, p. 119-141, 1996.

DAVID, H. C. **Avaliação de sítio, relações dendrométricas e otimização de regimes de manejo de Pinus taeda L. nos estados do Paraná e de Santa Catarina**. 2014. 151 p. Dissertação de Mestrado em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

DAVID, H. C.; PÉLLICO NETTO, S.; ARCE, J. E.; CORTE, A. N. D.; MARINHESKI FILHO, A.; BEHLING, A. Updating of Dominant Height Growth Modeling and site Index of *Pinus taeda* L. in southern Brazil. **Aust. J. Basic & Appl. Sci.**, v. 9, n. 2, p. 115-125, 2015.

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

DIAS, A. N.; LEITE, H. G.; NOGUEIRA, G. S.; RODRIGUES, F. L. Avaliação de métodos de ajuste de curvas de índices de local em povoamentos de eucalipto desbastados. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, p. 741-747, 2005.

DEMUTH, H.; BEALE, M.; HAGAN, M. **“Neural Network Toolbox User’s Guide”**. The MathWorks, Inc., Natick, USA. 2009.

DRAPER, N. R., SMITH, H. **Applied regression analysis**. New York: John Wiley & Sons. 1966, 407p.

FIGUEIREDO, E.O. **Avaliação de Modelos pelo Método da Curva Média para a Construção de Curvas de Índice de Sítio para Tectona grandis L.f.** Rio Branco: Embrapa Acre. 2005, 49 p.

GONÇALVES, J. L. M. Interpretação de levantamento de solo para fins silviculturais. **IPEF**. São Paulo. n. 39, p. 65-72, 1988.

GÖRGENS, E. B.; LEITE, H. G.; SANTOS, H. N.; GLERIANI, J. M. Estimação do volume de árvores utilizando redes neurais artificiais. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 33, n. 6, p. 1141-1147, 2009.

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

HECHT-NIELSEN, R. **Neurocomputing**. Boston: Addison-Wesley Longman, 1989.

IBA – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **O RELATÓRIO IBÁ 2015**. Brasília, DF: IBÁ, 2015. Disponível em: <[http://iba.org/images/shared/iba\\_2015.pdf](http://iba.org/images/shared/iba_2015.pdf)>. Acesso em: 30 jun. 2016.

JESUS, O. DE; HAGAN, M. T. "Backpropagation Algorithms for a Broad Class of Dynamic Networks". **IEEE Transactions on Neural Networks**, v. 18, n. 1, p. 14-27, 2007.

LEITE, H. G.; SILVA, M. L. M.; BINOTI, D. H. B.; FARDIN, L.; TAKIZAWA, F. H. Estimation of inside-bark diameter and heartwood diameter for *Tectona grandis* Linn. trees using artificial neural networks. **European Journal of Forest Research**, v. 130, n. 2, p. 263-269, 2011a.

LEITE, H. G.; NETO, R. R. de O.; CASTRO, R. R. de; BINOTI, M. L. M. da S.; BINOTI, D. H. B.; PAULINO, E. J.; LOPES, P. F.; COLODETTE, J. L. Redes Neurais Artificiais para a estimação da densidade básica da madeira. **Scientia forestalis**, Piracicaba, v. 44, n. 109, p. 149-154, 2016.

MACHADO, S. A.; OLIVEIRA, E. B. de; CARPANEZZI, A. A.; BARTOSZECK, A. C.P.S. Classificação de sítio para bracingais na região metropolitana de Curitiba. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 35, p. 21-37, 1997.

ÖZÇELİK, R.; DIAMANTOPOULOU, M. J.; BROOKS, J. R.; JR., H. V. W. Estimating tree bole volume using artificial neural network models for four species in Turkey. **Journal of Environmental Management**, v. 91, n. 3, p. 742-753, 2010.

ÖZÇELİK, R.; DIAMANTOPOULOU, M. J.; CRECENTE-CAMPO, F.; ELER, U. Estimating Crimean juniper tree height using nonlinear regression and artificial neural network models. **Forest Ecology and Management**, v. 306, p. 52-60, 2013.

PALAHÍ, M. Site index model for *Pinus silvestris* in north-east Spain. **Forest Ecology and Management**. Amsterdam, n. 187, p. 35-47, 2004.

PRECHELT, L. **PROBEN – A set neural network benchmark problems and benchmarking rules**. Württemberg: Karlsruhe Institut für Technologie, 1994, 37p. (Technical Report, 21).

SCOLFORO, J. R. S.; MACHADO, S. A. Curvas de índice de sítio para plantações de *Pinus taeda* nos estados de Paraná e Santa Catarina. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 8, n. 1-2, p. 159-168, 1988.

SELLE, G. L.; SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G. Classificação de sítios para *Pinus taeda* L., através da altura dominante, para a região de Cambará do Sul, RS, Brasil. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 4, n. 1, p. 77-95, 1994.

SILVA, I. N.; SPATTI, H. D.; FLAUZINO, R. A. **Redes Neurais Artificiais: para engenharia e ciências aplicadas**. São Paulo: Artliber, 2010, 399p.

SILVA, F. DA.; PIMENTEL, A.; CORTE, A. P. D.; SANQUETTA, C. R. Classificação de sítio para *Pinus caribaea* var. *hondurensis* na região do Triângulo Mineiro. **Revista Acadêmica: Ciências Agrárias e Ambientais**, Curitiba, v. 11, Supl. 1, p. S105-S112, 2013.

SOARES, F. A. A. M. N. **Predição Recursiva de Diâmetros de Clones de Eucalipto utilizando Rede Perceptron de Múltiplas Camadas para o cálculo de volume**. 2012. 111 p. Tese (Doutorado em Engenharia Elétrica) – Faculdade de Engenharia Elétrica, Universidade Federal de Uberlândia, Uberlândia-MG, 2012.

SPATHELF, P.; NUTTO, L. **Modelagem aplicada ao crescimento e produção florestal**. Santa Maria: UFSM, 2000, 70 p.

TENGELENG, S.; ARMAND, N. Performance of Using Cascade Forward Back Propagation Neural Networks for Estimating Rain Parameters with Rain Drop Size Distribution. **Atmosphere**, v. 5, p. 454-472, 2014.

TÉO, S. J.; BRESSAN, D. R.; COSTA, R. H. da. Uso de modelos estatísticos para classificação de sítios em povoamentos de *Pinus taeda* na região de Caçador – SC. **Revista Floresta**, Curitiba, PR, v. 41, n. 1, p. 179-188, 2011.

TONINI, H.; FINGER, C. A. G.; SCHNEIDER, P. R.; SPATHELF, P. Crescimento em altura de *Pinus elliottii* Engelm. na região de Piratini no Rio Grande do Sul, Brasil. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 31, n. 3, p. 417-423, 2001.

VARGAS-LARRETA, B.; ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J. G.; CORRAL-RIVAS, J. J.; AGUIRRE CALDERÓN, O. A. Construcción de curvas dinámicas de índice de sitio para *Pinus cooperi* Blanco. **Revista Fitotecnia Mexicana**, Chapingo, v. 33, n. 4, p. 343-351, 2010.

XIAO, R.; CARANDE, R.; GHIGLIA, D. A Neural Network Approach for Tree Height Estimation Using IFSAR Data. **IEEE Transactions on Geoscience and Remote Sensing**, v. 36, n. 5, p. 345–348, 1998.

ZANCHETTIN, C.; LUDERMIR, T. B. Sistemas neurais híbridos para reconhecimento de padrões em narizes artificiais. **SBA Controle & Automação**, v. 16, n. 2, 2005.

## 5. CONCLUSÕES GERAIS

De acordo com o teste de anamorfismo, os dados em estudo apresentam um padrão de crescimento polimórfico, portanto, a utilização do método da diferença algébrica para classificação de sítios florestais foi satisfatória por gerar curvas anamórficas e polimórficas.

As estatísticas de exatidão obtidas pelos ajustes dos modelos na sua forma original diferem das encontradas com o ajuste dos modelos modificados algebricamente para a geração de curvas anamórficas e polimórficas. O que significa que a seleção deve ser feita analisando os resultados obtidos após a modificação algébrica dos modelos.

Para o método da diferença algébrica, os modelos de regressão testados foram capazes de classificar a capacidade produtiva do local, de forma satisfatória. Os modelos apresentaram bons resultados de precisão estatística e conseguiram realizar estimativas sem tendenciosidade.

O modelo Logístico modificado algebricamente para gerar curvas polimórficas não se ajustou bem aos dados, apresentando baixos resultados de precisão estatística e número de parcelas estáveis, além de não conseguir gerar curvas que representassem o padrão de crescimento dos dados em estudo. Portanto, o mesmo não seria recomendado para classificar sítios florestais do povoamento em estudo.

Os modelos de Gompertz, Weibull e Logístico não conseguiram gerar curvas de sítios coerentes com o padrão de crescimento biológico do povoamento em estudo, mesmo apresentando superioridade nos resultados estatísticos e de estabilidade. Portanto, os mesmos não são recomendados para serem utilizados no caso estudado.

O modelo de Chapman e Richards foi selecionado para a classificação dos sítios florestais. A família de curvas anamórficas gerou uma melhor estabilidade das parcelas ao longo do tempo, se comparadas às curvas polimórficas. O modelo conseguiu 49,15% de parcelas estáveis, o que representa um total de 4.338 parcelas.

Embora os dados apresentem um padrão de crescimento polimórfico, o conjunto de curvas anamórficas geradas pelos modelos conseguem realizar a classificação de sítios florestais de forma superior às curvas polimórficas, se

analisados os resultados de precisão estatística, teste de estabilidade e análise crítica (gerencial) do conjunto de resultados obtidos.

Já para o método da curva guia, os cinco modelos de regressão não linear testados para classificar a capacidade produtiva obtiveram resultados satisfatórios e muito próximos entre si. Porém, houve uma superioridade no modelo Monomolecular, nas suas estatísticas de precisão. Os gráficos de resíduos não apresentaram tendenciosidades, assim como na estabilidade das parcelas dentro das curvas de sítio geradas. Entretanto, os modelos de Chapman e Richards e Weibull apresentaram resultados quase semelhantes, mas o Monomolecular foi selecionado.

Todas as RNA treinadas para estimar a altura dominante de árvores apresentaram resultados satisfatórios. As redes que foram treinadas com as mesmas variáveis utilizadas pelos modelos de regressão não linear apresentaram resultados praticamente semelhantes ao modelo Monomolecular para precisão estatística e estabilidade das parcelas. Entretanto, é possível mencionar que houve um ganho de estabilidade em 105 parcelas, com a aplicação da RNA do tipo CFBP, em relação ao modelo selecionado, no caso, o Monomolecular.

As redes do tipo *Cascade Forward Back Propagation Network (CFBP)* apresentaram uma leve superioridade em relação às redes do tipo *Feed Forward Back Propagation Network (FFBP)* tanto para estimativa de alturas dominantes como na estabilidade das curvas de sítio.

A aplicação de alturas dominantes estimadas pelas RNA na classificação de sítio pelo método da curva guia, com a introdução de variáveis do povoamento como área basal, diâmetro médio quadrático, combinado com a idade das parcelas e variáveis categóricas de solo e precipitação no treinamento das RNA, trouxeram melhorias nas estimativas das alturas dominantes e, conseqüentemente, na estabilidade das parcelas. A RNA do tipo CFBP, com adição de variáveis dendrométricas e edafoclimáticas, melhorou a estabilidade da classificação da capacidade produtiva em relação ao modelo de regressão não linear selecionado, em 1.156 parcelas estáveis, o que corresponde a 13,4% do total.

Analisando os resultados obtidos por este trabalho, o modelo que teve o melhor desempenho pelo método da diferença algébrica foi o de Chapman e Richards, que teve 49,15% de suas parcelas estáveis, o que representa um total de 4.338 parcelas. Já para a RNA que teve o seu melhor desempenho em estimar

alturas dominantes e utilizá-las no método da curva-guia, que no caso foi a RNA do tipo CFBP, com adição de variáveis teve 58,68 % de suas parcelas estáveis, totalizando 5.175 parcelas que não mudaram de classe ao longo das idades. Sendo assim, a técnica proposta neste estudo e que foi apresentada no segundo capítulo, mostrou-se superior ao resultado obtido pelo método da diferença algébrica analisado no primeiro capítulo.

Neste sentido, é justificável a aplicação de RNA com adição das variáveis, sendo elas: idade das parcelas combinadas com área basal e diâmetro médio quadrático, e variáveis edafoclimáticas de solo e precipitação. Estas variáveis características do povoamento, geralmente já são obtidas nas rotinas de inventário. Empreendimentos florestais também fazem o monitoramento de solo e de precipitação nas áreas em que se localizam os povoamentos florestais. Sendo assim, o uso dessas variáveis para a classificação de sítios florestais não adicionaria custos ou alteração das atividades que já são desenvolvidas normalmente, favorecendo a sua aplicação no método.

A metodologia proposta neste estudo se mostrou satisfatória, com o aumento de precisão nas estimativas e na quantidade de parcelas estáveis ao longo dos anos de remedição. Portanto, estes resultados positivos podem influenciar diretamente nos estudos de crescimento e produção, que têm como variável base o Índice de Sítio (IS), que é obtido pela classificação da capacidade produtiva, trazendo benefícios para o manejador florestal na sua tomada de decisão e no planejamento florestal a curto, médio e longo prazo.

Sendo assim, a aplicação dos resultados da nova abordagem proposta por este estudo em modelos de crescimento e produção deve ser realizada para confirmar a eficiência da metodologia. A projeção do volume deverá ser feita considerando os índices de sítios obtidos pela classificação, utilizando alturas dominantes estimadas com as RNA e com os modelos não lineares, comparando-se com a produção volumétrica observada, permitindo, então, concluir se houve ganho de precisão nas estimativas de estoque futuro, que são imprescindíveis para o planejamento florestal.