

PAULA VENTURA DA SILVA

**ESTIMAÇÃO DO VOLUME E AFILAMENTO DO FUSTE
DE ÁRVORES DE EUCALIPTO UTILIZANDO
REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS**

Monografia apresentada ao Departamento de
Engenharia Florestal, como parte das exigências
do curso de graduação em Engenharia Florestal.

VIÇOSA
MINAS GERAIS – BRASIL
2014

PAULA VENTURA DA SILVA

**ESTIMAÇÃO DO VOLUME E AFILAMENTO DO FUSTE
DE ÁRVORES DE EUCALIPTO UTILIZANDO
REDES NEURAS ARTIFICIAIS**

Monografia apresentada ao Departamento de
Engenharia Florestal, como parte das exigências
do curso de graduação em Engenharia Florestal.

APROVADA: 6 de dezembro de 2013.

Prof. José Marinaldo Glierani

Gustavo Eduardo Marcatti

Prof. Helio Garcia Leite
(Orientador)

AGRADECIMENTOS

A Deus.

Aos meus pais, Paulo Afonso e Eliane, pelo amor incondicional, pelo apoio diário e por tornarem este sonho real.

Às minhas irmãs, Carolina e Patrícia, por serem o meu porto seguro, me completarem e estarem sempre comigo.

Ao professor Helio Garcia Leite, pelos ensinamentos transmitidos desde o início da graduação, pelo incentivo, pela paciência, pela confiança e por ser um grande exemplo profissional e, principalmente, pessoal.

Ao Daniel Binoti, pela valiosa ajuda, pela paciência e pelas contribuições.

Ao professor José Marinaldo Gleriani e ao doutorando Gustavo Eduardo Marcatti, membros da banca examinadora, pelas correções e valiosas sugestões.

Aos meus amigos, em especial à Dominic e à Marcela, por serem as melhores companhias em qualquer momento, pela ajuda e pelos risos e choros compartilhados.

A todos que, direta ou indiretamente, contribuíram para a realização deste trabalho.

BIOGRAFIA

PAULA VENTURA DA SILVA, filha de Paulo Afonso da Silva de Eliane Ventura da Silva, nasceu em 28 de março de 1989, em Visconde do Rio Branco, Minas Gerais.

Em 2006, concluiu o ensino médio no Colégio Anglo, em Viçosa, Minas Gerais.

Em agosto de 2008, iniciou o curso de graduação em Engenharia Florestal, na Universidade Federal de Viçosa.

Em março de 2009, iniciou o estágio sob a orientação do professor Helio Garcia Leite no Departamento de Engenharia Florestal.

Em agosto de 2011, foi aceita como bolsista de iniciação científica pelo PIBIC/CNPq sob a orientação do professor Helio Garcia Leite, concluindo-o em agosto de 2012.

Irà graduar-se em Engenharia Florestal em março de 2014.

CONTEÚDO

	Página
EXTRATO	v
1. INTRODUÇÃO	1
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	3
2.1. Redes Neurais Artificiais	3
2.2. Volume	5
2.3. <i>Taper</i>	5
3. OBJETIVOS.....	7
4. MATERIAL E MÉTODOS.....	8
4.1. Descrição dos dados	8
4.2. Volume	10
4.3. <i>Taper</i>	11
4.4. Análise das estimativas.....	12
5. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	13
6. CONCLUSÃO	25
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	26

EXTRATO

SILVA, Paula Ventura da. Monografia de graduação. Universidade Federal de Viçosa, outubro de 2013. **Estimação do volume e afilamento do fuste de árvores de eucalipto utilizando Redes Neurais Artificiais.** Orientador: Helio Garcia Leite.

A realização de planos de manejo consistentes exige o conhecimento do volume de madeira disponível nos povoamentos florestais. Essa é uma das informações de maior importância para avaliar o potencial produtivo dos povoamentos, haja visto que o volume individual fornece subsídios para a análise do potencial produtivo das florestas. Esse volume é geralmente estimado com o emprego de modelos lineares ou não lineares que o correlacionam com o diâmetro a 1,30 m de altura e com a altura total das árvores. Os parâmetros desses modelos são estimados pelo método de mínimos quadrados (regressão). O afilamento do fuste é comumente estimado com o emprego de modelos de regressão. Uma alternativa que pode ser mais eficiente para essas estimações é o emprego de Redes Neurais Artificiais (RNA), que são aproximações das redes e dos neurônios encontrados nos cérebros biológicos. As RNA são sistemas computacionais paralelos constituídos de várias unidades de processamento simples (neurônios artificiais), conectadas entre si de maneira específica para executar uma determinada tarefa. Essa técnica vem sendo utilizada no setor florestal para auxiliar o manejo de florestas, aprimorando técnicas de inventário florestal e permitindo maior acurácia na estimação da produção, o que dá maior suporte à tomada de decisão. O objetivo deste trabalho foi testar o emprego de RNA para estimação do volume e do afilamento do

fuste de árvores (*taper*), considerando variáveis como *DAP*, altura total (*Ht*), altura comercial, idade, declividade do terreno, projeto, rotação e material genético. Foram utilizados dados de 2.064 árvores-amostra abatidas e cubadas nos povoamentos, compreendendo 128 projetos, de 1 e 38 graus de inclinação do terreno, 22 clones e idades de 4 a 10 anos. Foram treinados dois tipos de redes, analisando o efeito de cada variável na estimação de volume e dos diâmetros ao longo do fuste, utilizando cerca de 30% dos dados. Os resultados das melhores redes foram generalizados para o restante do banco de dados. Os resultados obtidos pelas redes em que somente o *DAP*, a *Ht* e os diâmetros no topo a 0,5, 1,0 e 2 m de altura foram empregados como variáveis de entrada para estimação do volume foram precisos e livres de tendenciosidade. Para *taper*, também foram eficientes as redes que utilizaram essas variáveis de entrada. Os resultados demonstram que as demais variáveis puderam ser excluídas sem prejuízo na precisão das estimativas. A metodologia utilizada foi eficiente na estimação do volume e de diâmetros ao longo do fuste, utilizando somente variáveis facilmente obtidas no inventário florestal.

1. INTRODUÇÃO

A realização de planos de manejo consistentes exige o conhecimento do volume de madeira disponível nos povoamentos florestais. Essa é uma das informações de maior importância para avaliar o potencial produtivo dos povoamentos, haja vista que o volume individual fornece subsídios para a estimativa do estoque de madeira e análise do potencial produtivo das florestas (THOMAS *et al.*, 2006).

Esse volume é quantificado por meio da realização de inventários florestais, sendo obtido por extrapolação dos resultados em nível de parcela (LEITE; ANDRADE, 2002). O volume das parcelas, por sua vez, é obtido com o emprego de equações de volume de árvores individuais.

O volume de árvores individuais é geralmente estimado com o emprego de modelos lineares ou não lineares que o correlacionam com o diâmetro a 1,30 m de altura (*DAP*) e com a altura total (*Ht*) das árvores. Vários autores propuseram modelos eficientes para essa estimativa; no entanto, o de Schumacher e Hall (1933) tem sido o mais utilizado, talvez por suas propriedades estatísticas, uma vez que resulta quase sempre em estimativas não tendenciosas (CAMPOS; LEITE, 2009).

Os dados para ajuste dos modelos volumétricos são obtidos de árvores-amostra abatidas e cubadas nos povoamentos. O método mais utilizado para obtenção do volume sólido dessas árvores consiste no emprego de fórmulas aproximativas, como as de Smalian, Huber e Newton. Considerando os casos em que existem diferentes materiais genéticos, espaçamentos, idades e regimes de corte, têm-se considerável tempo e custo requerido para geração de equações volumétricas.

Além do volume, o afilamento do fuste é geralmente estimado com o emprego de modelos de regressão. Nesse caso, funções sigmoidais ou polinomiais são empregadas para descrever o afilamento (*taper*) dos fustes das árvores. Essas funções são ajustadas utilizando os mesmos dados que são usados para geração de equações de volume (CAMPOS; LEITE, 2009). Os modelos de afilamento podem ser usados para quantificar e estimar multiprodutos da madeira.

O afilamento do tronco das árvores é o decréscimo do diâmetro ao longo do fuste e tem efeito direto no volume das árvores, sendo importante em inventários florestais para multiprodutos da madeira (HUSCH *et al.*, 1983). Os modelos de *taper*, utilizados para descrever o afilamento do fuste, também são alternativas para estimação do volume, que pode ser total ou de qualquer seção do fuste.

As equações de *taper* permitem estimar diâmetros ao longo do fuste, a partir das variáveis *DAP* e altura total (CAMPOS; LEITE, 2009). A variável dependente de uma função de *taper* é a razão entre o diâmetro (d) a uma determinada altura (h), o *DAP* e a altura total (Ht) (CAMPOS; LEITE, 2009), por isto também depende da realização de cubagem de árvores.

Uma alternativa para minimizar ou, em alguns casos, evitar o abate de árvores para a cubagem e, conseqüentemente, reduzir o aumento do custo do inventário é o emprego de técnicas de aprendizado de máquinas, como as Redes Neurais Artificiais (RNA) e Máquinas de Vetores de Suporte. As Máquinas de Vetor de Suporte têm sido utilizadas com sucesso na predição de dados biológicos nas mais diversas áreas, como em diagnose de genes cancerígenos (GUYON *et al.*, 2002) e no reconhecimento de imagens (HEARST *et al.*, 1998; SILVA, 2004).

As Redes Neurais Artificiais são aproximações brutas das redes e dos neurônios encontrados nos cérebros biológicos. Do ponto de vista prático, são um sistema computacional paralelo (camadas) constituído de várias unidades de processamento simples (neurônios artificiais), conectadas entre si de maneira específica para executar uma determinada tarefa (BULLINARIA, 2010, citado por BINOTI, 2012). Essa técnica vem sendo utilizada no setor florestal para auxiliar o manejo de florestas, aprimorando técnicas de biometria e inventário florestal e permitindo maior acurácia na estimação da produção, o que dá maior suporte à tomada de decisão (GÖRGENS *et al.*, 2005; BINOTI, 2009; SILVA *et al.*, 2009; BINOTI, 2012).

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1. Redes Neurais Artificiais

As RNA são sistemas paralelos distribuídos compostos por unidades de processamento simples (nodos) que calculam determinadas funções matemáticas (normalmente não lineares). Essas unidades são dispostas em uma ou mais camadas e interligadas por um grande número de conexões, geralmente unidirecionais (BRAGA, 2000). Essas conexões, em grande parte dos modelos, estão associadas a pesos, que armazenam o conhecimento representado e servem para ponderar a entrada recebida por cada neurônio da rede (BRAGA, 2000).

Segundo Haykin (2001), citado por Binoti (2010), uma RNA é uma máquina projetada para modelar uma tarefa ou função de interesse, com capacidade de armazenar conhecimento experimental e torná-lo disponível para uso, semelhante ao cérebro.

As características importantes das RNA são: 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 e generalização para dados desconhecidos; e analogia neurobiológica (HAYKIN, 2001; BULLINARIA, 2009, citados por BINOTI, 2010).

Braga (2000) afirmou que a capacidade de aprender por meio de exemplos e de generalizar a informação aprendida é o atrativo principal da solução de problemas através de RNA. Para o pesquisador a generalização, que está associada à capacidade de a rede aprender por meio de um conjunto reduzido de exemplos e posteriormente dar respostas coerentes para dados não conhecidos, é uma demonstração de que a capacidade das RNA vai muito além de simplesmente mapear relações de entrada e saída; elas são capazes de extrair informações não apresentadas de forma explícita por meio de exemplos.

Um neurônio artificial é uma unidade de processamento de informação de uma Rede Neural Artificial (BINOTI, 2010). Ele é constituído de várias entradas e uma saída. A ativação do neurônio é obtida por meio da aplicação de uma “função de ativação”, que ativa ou não a saída, dependendo do valor da soma ponderada das suas entradas (BRAGA, 2000). Existem três tipos básicos de função de ativação: função de limiar, linear por partes e função sigmoide (BINOTI, 2010).

A arquitetura de uma RNA consiste na maneira como os neurônios estão estruturados e suas conexões, ou seja, número de camadas da rede, número de neurônios em cada camada e tipo de conexão entre os neurônios e a topologia da rede. Esses parâmetros definem o tipo de problema que pode ser tratado pela rede (BRAGA *et al.*, 2000).

As Redes Neurais Artificiais têm sido muito usadas no manejo florestal. Guan e Gertner (1991a; 1991b; 1995), citados por Binoti (2010), utilizaram-nas para modelar a sobrevivência de árvores. Görgens (2006) testou algumas formas de pré-processamento dos dados e das arquiteturas de RNA para estimar volume de árvores de eucalipto (*Eucalyptus* spp.) e de teca (*Tectona grandis* L.f.). Binoti (2010) avaliou a eficiência de Redes Neurais Artificiais para realizar a prognose da produção de povoamentos equiâneos de clones de eucalipto. Binoti (2012) utilizou-as para estimação de altura, projeção dos parâmetros da função Weibull, cubagem de árvores e modelos de distribuição de diâmetros, além de testar diferentes configurações de redes com o intuito de buscar a parametrização para estimar o volume de árvores.

2.2. Volume

O manejo florestal sustentável requer estimativas precisas de estoque de crescimento, para auxiliar os gestores florestais na análise econômica dos projetos florestais, elaboração e execução de planos de manejo (BINOTI, 2012). Esse estoque é obtido por meio de modelos que utilizam o DAP e a altura total para estimar o volume do povoamento.

Fórmulas aproximativas de volume como as de Huber, Newton e Smalian são usadas para calcular o volume sólido da árvore, que é obtido por meio da soma do volume de cada seção do tronco. Para isso, são utilizados dados de cubagem de árvores-amostra, que devem ser colhidas em toda a área da população, para que essa seja bem representada (CAMPOS; LEITE, 2013). Nos plantios de eucalipto, o ideal é a utilização de equações específicas por clone ou espécie, espaçamento, classe de idade e regime de corte (BINOTI, 2012).

Para obtenção do volume de parcelas, são utilizados modelos volumétricos, cujos parâmetros são obtidos por regressão. Dentre esses modelos, o de Schumacher e Hall (1933) é o mais difundido (CAMPOS; LEITE, 2013).

Segundo Thomas *et al.* (2006), vários pesquisadores ajustaram e compararam diversos modelos que expressam o volume para diferentes espécies, sítios e regimes de manejo, entre eles: Silva *et al.* (1978), que construíram tabelas de volume comercial para *Eucalyptus spp.*; Schneider (1984), que calcularam o volume com casca para *Pinus elliottii*; Machado *et al.* (2002), que modelaram o volume de *Pinus oocarpa* em diferentes idades e regimes de desbaste; Santana e Encinas (2004), que desenvolveram equações para *Eucalyptus saligna*, entre outros.

2.3. Taper

Um dos fatores que influenciam diretamente o volume das árvores é o afilamento do fuste (*taper*), que consiste no decréscimo natural do diâmetro ao longo do tronco, conforme mencionado por Husch *et al.* (1993), citados por Scavinski *et al.* (2012). Husch *et al.* (1993) ainda afirmaram que ao considerar o fuste inteiro de uma árvore ele pode ser comparado a sólidos geométricos do tipo neiloide, paraboloide ou cone.

Os estudos de *taper* baseiam-se em equações que permitem estimar o diâmetro em qualquer altura ao longo do fuste, a partir das variáveis DAP e altura total. Conseqüentemente, as equações de *taper* servem, também, para estimar a altura em que determinado diâmetro pode ocorrer e o volume de partes do fuste, ou seja, elas quantificam os multiprodutos da madeira (CAMPOS; LEITE, 2013).

Para o ajuste dos modelos de *taper* são abatidas árvores-amostras ao longo do plantio, de modo que a amostragem represente toda a variação existente. Essas árvores são cubadas, sendo medidos os diâmetros com e sem casca ao longo do fuste, além das posições em que estes ocorrem e a altura total (CAMPOS; LEITE, 2013).

Os modelos de *taper* podem ser separados em dois grupos principais: modelos simples, que descrevem as mudanças do diâmetro da árvore do solo até o topo com uma única função; e os modelos segmentados, que utilizam diferentes subfunções para as diferentes partes do fuste (KOZAK, 1988, citado por SOUZA, 2013).

A vantagem dos modelos simples é modelar o fuste inteiro com uma única equação, tendo o ajuste e o emprego facilitados. Segundo Prodan *et al.* (1997), citados por Campos e Leite (2013), esses modelos integram-se com facilidade, o que permite transformá-los em equações de volume, podendo ainda ser reordenados para o cálculo de alturas comerciais. No entanto, podem apresentar erros de tendência na estimação do diâmetro em certa porção do fuste (CAMPOS; LEITE, 2013). Alguns exemplos citados por Souza (2013) são os modelos de Schoepfer (1966), Kozak (1969), Demaerchalk (1972), Omerod (1973) e Garay (1979).

Os modelos segmentados são mais difíceis de ser trabalhados e constituem uma variação dos modelos chamados polinomiais, sendo ajustados por duas ou três seções do fuste (CAMPOS; LEITE, 2013). Ainda segundo esses autores, os modelos segmentados podem ajudar a diminuir erros de tendências nas estimações dos diâmetros ao longo do fuste, porém não cumprem plenamente esse objetivo.

3. OBJETIVOS

O objetivo deste trabalho foi testar o emprego de Redes Neurais Artificiais para estimação do volume e do afilamento do fuste de árvores de eucalipto, utilizando variáveis facilmente obtidas em inventários florestais com as árvores em pé, sem a necessidade de abatê-las, o que acarreta em diminuição dos custos gerados por essa operação.

4. MATERIAL E MÉTODOS

4.1. Descrição dos dados

Neste estudo foi utilizado um banco de dados histórico de árvores-amostra abatidas e cubadas em plantios de clones de eucalipto, localizadas em cinco diferentes regiões do estado de Minas Gerais. No total, 2.064 árvores foram abatidas e cubadas rigorosamente para o cálculo do volume. O banco de dados foi composto por 128 projetos, em locais com declividade entre 1 e 38°, contemplando 22 materiais genéticos (clones), cuja idade variou de 4 a 10 anos. O *DAP* das árvores variou de 8,00 a 34,00 cm e a altura total, entre 15,00 e 44,00 m. Informações como rotação e diâmetros com casca medidos ao longo do fuste também compuseram o banco de dados (Tabela 1).

As árvores-amostra foram cubadas com medição do diâmetro com casca e da espessura da casca nas posições 0 (altura de corte), 0,50, 1,00, 2,00, 4,00 m, e assim sucessivamente, até a altura onde o diâmetro com casca fosse de cerca de 4,00 cm.

Tabela 1 – Análise descritiva dos dados utilizados

Região	Número de Árvores	Número de Clones	Parâmetros estatísticos	DAP (cm)	Altura (H)	Volume (m ³)
1	425	9	Média	20,0	28,7	0,5226
			Desvio-padrão	7,5	8,0	0,4847
			Mínimo	8,5	12,6	0,0403
			Máximo	39,4	49,9	2,3664
2	672	13	Média	18,6	27,5	0,4313
			Desvio-padrão	6,5	6,4	0,3841
			Mínimo	8,7	15,1	0,0474
			Máximo	37,8	47,6	2,3597
3	411	7	Média	19,9	29,5	0,5064
			Desvio-padrão	7,1	7,0	0,4333
			Mínimo	8,6	14,1	0,0394
			Máximo	38,2	48,1	2,0684
4	634	10	Média	19,2	26,9	0,4446
			Desvio-padrão	7,1	7,2	0,4081
			Mínimo	8,1	12,7	0,0327
			Máximo	40,1	45,4	1,9962
5	462	6	Média	19,6	28,5	0,4807
			Desvio-padrão	7,0	7,1	0,4178
			Mínimo	8,4	15,2	0,0393
			Máximo	37,6	48,4	2,0691

4.2. Volume

O volume individual com casca de cada árvore foi calculado pela fórmula de Smalian, sendo obtido pela soma dos volumes individuais das seções:

$$V = \frac{AS_1 + AS_2}{2} \cdot L$$

em que

V = volume da seção, com ou sem casca, em m³;

AS₁ e AS₂ = áreas seccionais, com ou sem casca, das extremidades da seção, em m²; e

L = comprimento da seção, em m.

Para o treinamento das Redes Neurais Artificiais, utilizou-se a ferramenta do software STATISTICA 10.0, *Intelligent Problem Solver* (IPS), que, simultaneamente, separa parte dos dados e treina várias arquiteturas de rede, cujas funções de ativação podem ser do tipo Linear, *Multilayer Perceptron* (MLP) ou *Radial Basis Function* (RBF). Após o treinamento, o IPS generaliza para o restante do banco de dados e seleciona as melhores redes.

Como variáveis de entrada foram utilizados o projeto (P), a rotação (R), a declividade (D), a idade (I), o clone, o diâmetro a 1,30 m (DAP), a altura total (Ht) e os diâmetros medidos a 0,00; 0,50; 1,00; e 2,00 m (d0,00; d0,50; d1,00; e d2,00). Para verificar a influência dessas variáveis na estimação do volume, foram ajustadas redes de modo que em cada ajuste uma variável fosse eliminada, seguindo a seguinte ordem:

1. Utilizaram-se, primeiramente, todas as variáveis citadas como entradas contínuas, exceto o clone, que entrou como variável categórica.
2. procedeu-se da mesma maneira, porém retirou-se a variável “rotação”.
3. eliminou-se, em seguida, a variável “declividade”.
4. retirou-se, após a eliminação da declividade, a variável categórica “espécie”.
5. eliminou-se, por último, a variável “idade”, restando apenas as variáveis contínuas: projeto, DAP, Ht e diâmetros a 0,00; 0,50; 1,00; e 2,00 m.

Para cada configuração citada, foram treinadas 100 redes, sendo retidas as cinco melhores. Os volumes estimados por essas redes foram comparados aos obtidos pela fórmula de Smalian, de modo a avaliar a exatidão das estimativas geradas por cada rede e, assim, escolher a que apresentou menor erro.

4.3. Taper

Com o propósito de estimar os diâmetros ao longo do fuste, o banco de dados foi separado para realizar as análises. A primeira parte, com 300 árvores, foi utilizada para o treinamento das RNA, tomando o cuidado de garantir que todas as características presentes fossem representadas.

Assim como para estimar o volume, utilizou-se a ferramenta *Intelligent Problem Solver* (IPS) do software Statistica 10.0 para o ajuste das RNA.

As variáveis contínuas de entrada foram o projeto (P), a rotação (R), a classe de declividade (CD), a classe de idade (CI), o diâmetro a 1,39 m de altura (DAP), a altura total (Ht) e as posições cujos diâmetros foram medidos (h). Como categórica utilizou-se somente o clone. A configuração das redes foi alterada, seguindo a mesma ordem utilizada na estimação do volume. Assim, a primeira rede utilizou todas as variáveis de entrada e a última, somente DAP, Ht e h.

Para cada configuração, foram treinadas 100 redes, sendo retidas as cinco melhores. Analisaram-se os resíduos de todas as RNA, e a melhor foi escolhida para generalizar para o restante dos dados.

Paralelamente, ajustou-se o modelo de Garay para cada combinação de projeto, rotação e material genético.

Após a escolha da melhor rede, utilizando a configuração mais simples (somente DAP, Ht e h como variáveis de entrada), os resultados foram comparados aos obtidos pelo modelo de Garay (1979):

$$ddap^{-1} = \beta_0 \left(1 + \beta_1 * \ln(1 - \beta_2 * h^{\beta_3} * Ht^{-\beta_3}) \right) + \varepsilon$$

4.4. Análise das estimativas

A análise dos resultados gerados pelas redes foi feita por meio da correlação, de histogramas com a distribuição dos resíduos e de gráficos de dispersão.

$$resíduo = 100 \times \frac{(\hat{Y}-Y)}{Y},$$

em que \hat{Y} é a saída estimada pela RNA e Y é a saída observada.

Gráficos de dispersão também foram utilizados, a fim de comparar os resultados estimados e observados.

A raiz do erro quadrado médio (RMSE%) avalia a diferença quadrática média entre os valores observados e os valores estimados (BINOTI, 2010).

$$RMSE (\%) = \frac{100}{\bar{Y}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n}}$$

em que

\bar{Y} é a média da saída observada; e

n é o número total de dados.

Quanto menor o RMSE%, melhor a precisão da estimativa (MEHTÄTALO *et al.*, 2006, citados por BINOTI, 2010).

Os valores estimados e observados também foram comparados pelo procedimento estatístico proposto por Leite e Oliveira (2002).

5. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 2 estão as descrições das RNA selecionadas, bem como as respectivas estatísticas de treinamento. A correlação entre os volumes observados e os estimados e a raiz do erro quadrado médio também estão nessa tabela.

A avaliação das estatísticas das redes mostra que todas apresentaram alta correlação e baixos RMSE (%), o que comprova que as estimativas geradas são precisas.

Pode-se observar que em todos os casos analisados a maior parte dos erros encontrou-se em $\pm 10\%$, o que comprova que os resultados gerados por meio de RNA foram satisfatórios.

Os resultados obtidos evidenciam que não houve perda na exatidão das estimativas de volume à medida que as variáveis utilizadas como entrada pelas RNA foram excluídas.

Os histogramas com a frequência dos erros percentuais (eixo y) em função da classe de erros (eixo x) estão apresentados na Figura 1.

Na Tabela 3 estão os resultados do procedimento estatístico proposto por Leite e Oliveira (2002) para as diferentes configurações de redes, em que foi avaliada a hipótese H_0 : As estimativas de volume obtidas por meio de RNA são iguais aos volumes observados ($\alpha = 5\%$).

Tabela 2 – Descrição das Redes Neurais Artificiais e estatísticas das estimativas de volume

RNA	Entradas numéricas	Entradas categóricas	Função de ativação	Arquitetura	Índice do treino	Índice da seleção	Índice da avaliação	$r_{y\hat{y}}$	RMSE (%)
1	P, R, D, I, DAP, Ht, d0,0 d0,5, d1,0, d2,0	Clone	MLP	4-1-1	0,08	0,08	0,07	0,9970	6,94
2	R, D, I, DAP, Ht, d0,0, d0,5, d1,0, d2,0	Clone	MLP	2-1-1	0,08	0,07	0,08	0,9970	7,01
3	D, I, DAP, Ht, d0,0, d0,5, d1,0, d2,0	Clone	RBF	30-75-1	0,04	0,05	0,05	0,9989	4,15
4	I, DAP, Ht, d0,0, d0,5, d1,0, d2,0	Clone	MLP	4-2-1	0,08	0,08	0,08	0,9971	6,87
5	I, DAP, Ht, d0,0, d0,5, d1,0, d2,0	-	MLP	4-2-1	0,08	0,07	0,07	0,9972	6,76
6	DAP, Ht, d0,0 d0,5, d1,0, d2,0	-	MLP	4-3-1	0,08	0,07	0,07	0,9971	6,79

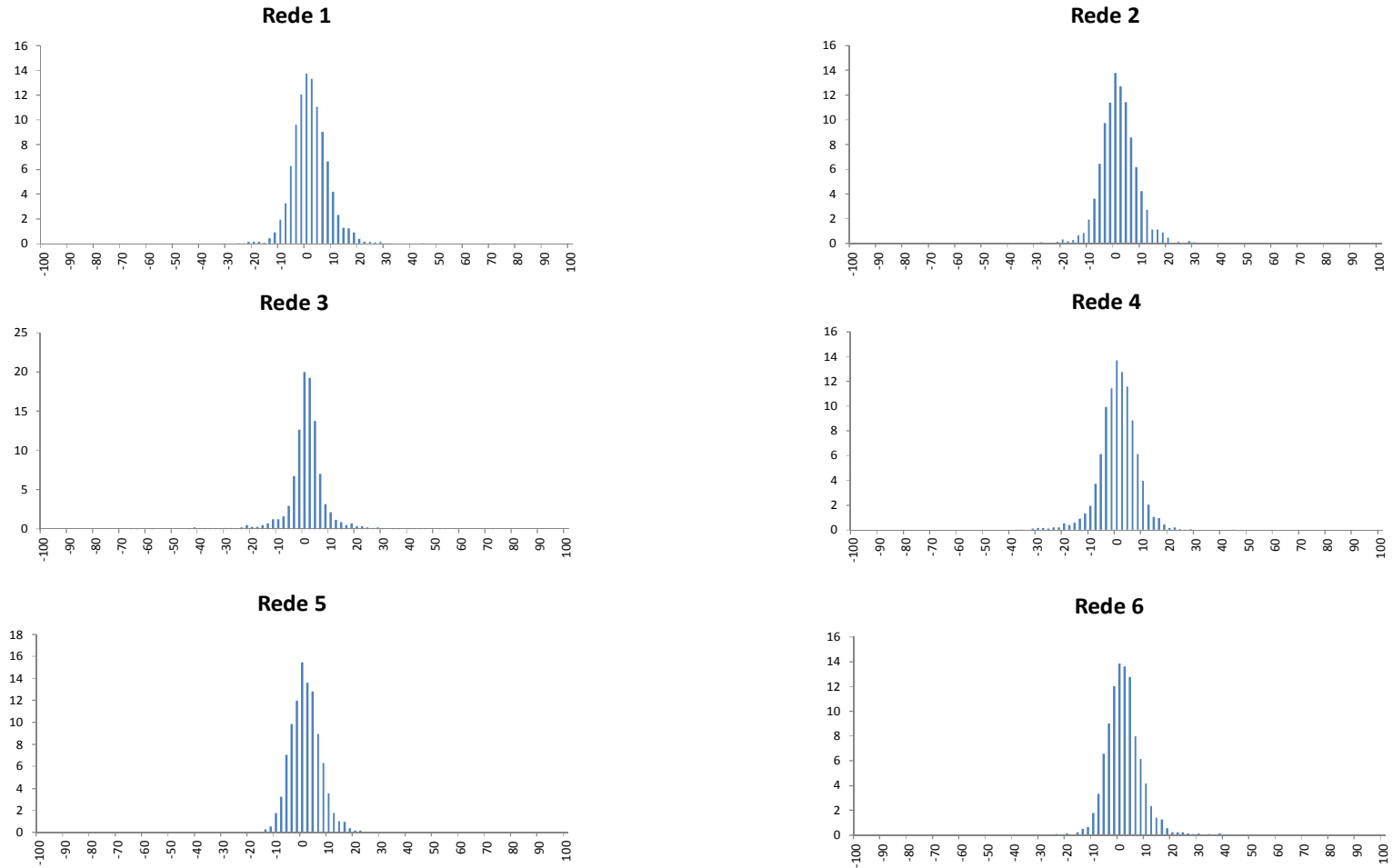


Figura 1 – Histogramas com a frequência dos erros percentuais em função da classe de erros.

Tabela 3 – Resultados do teste L&O comparando as redes estimadas para obtenção do volume e os volumes observados

Estatística	RNA 1	RNA 2	RNA 3	RNA 4	RNA 5	RNA 6
F(Ho)	*	*	ns	*	*	*
t(e)	*	ns	ns	*	*	*
$r_{y_j, y_1} \geq 1 - \bar{e} $	sim	não	sim	sim	não	sim
Erro médio (e)	0,0052	0,0026	-0,0015	-0,0045	0,0025	0,0063
Conclusão	Diferente	Diferente	Igual	Diferente	Diferente	Diferente

As Figuras 2 e 3 mostram os gráficos com a distribuição dos valores observados e estimados pelas redes em função do diâmetro a 1,30 m (DAP) e da altura total (Ht), respectivamente. Observa-se que os resultados obtidos por meio das RNA mantiveram a mesma distribuição dos valores observados para volume, o que significa que não houve distorções nas estimativas.

Os resultados demonstram que a utilização somente das variáveis de entrada DAP, Ht e os diâmetros medidos na base a 0,50; 1,00; e 2,00 m de altura são suficientes para estimar o volume com precisão.

O fato de a variável idade ter sido excluída, sem prejuízo na exatidão do volume, é importante e comprova a tese de que a cubagem de árvores, em inventário florestal contínuo, pode ser feita apenas com a complementação de árvores por classe de diâmetro ao longo do tempo, conforme Campos e Leite (2009).

A variável projeto não influenciou as estimativas e pôde ser excluída sem prejuízos. Porém, por ser uma informação geralmente disponível no cadastro, deve ser usada sempre que possível, uma vez que plantios em locais diferentes possuem características distintas e diretamente influenciadas pelo clima, pelo relevo, pela temperatura e pela capacidade produtiva, o que afeta o volume. O mesmo ocorre com as variáveis declividade e rotação.

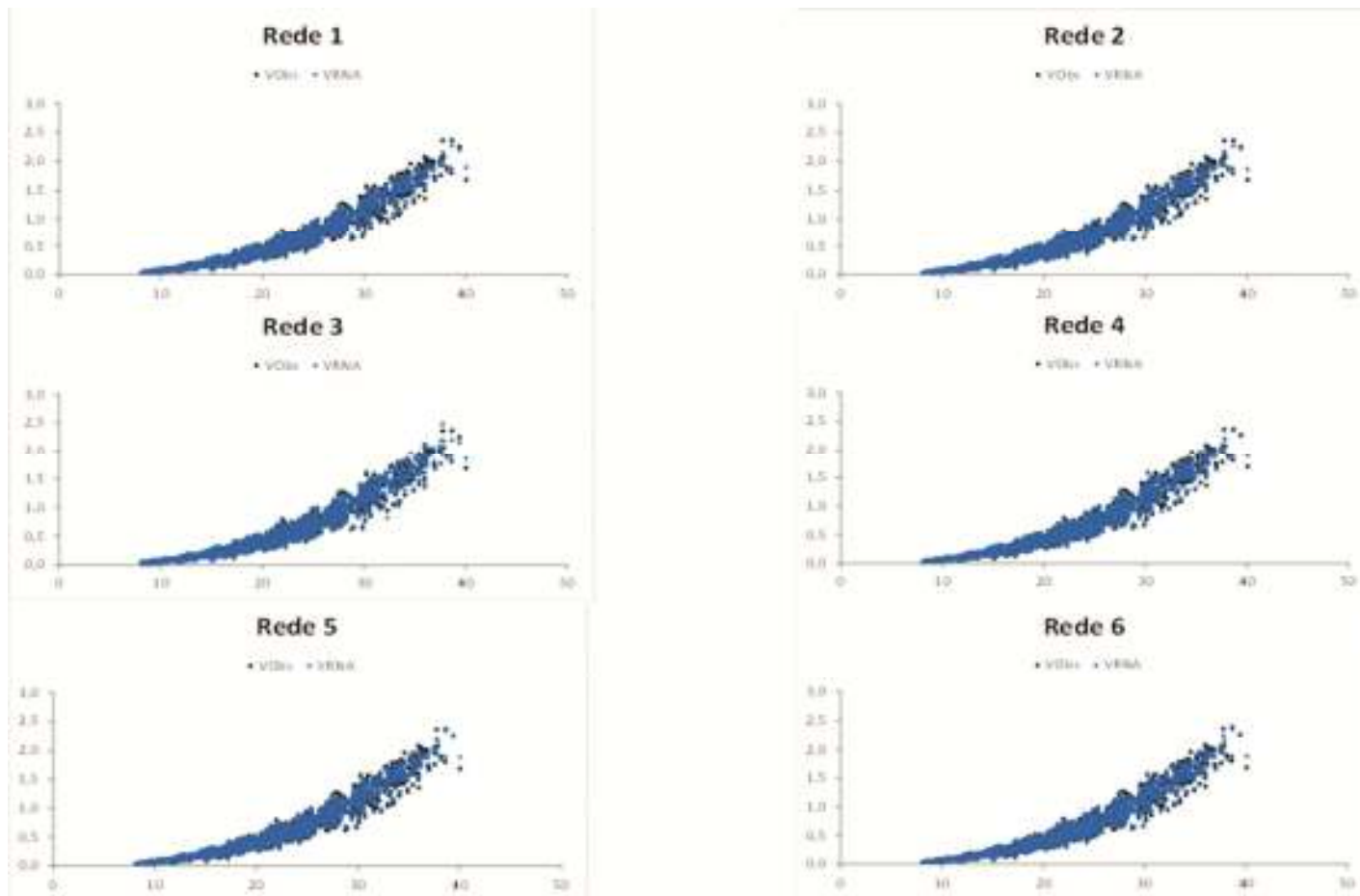


Figura 2 – Distribuição dos volumes observados e estimados (eixo y) em função do DAP (eixo x).

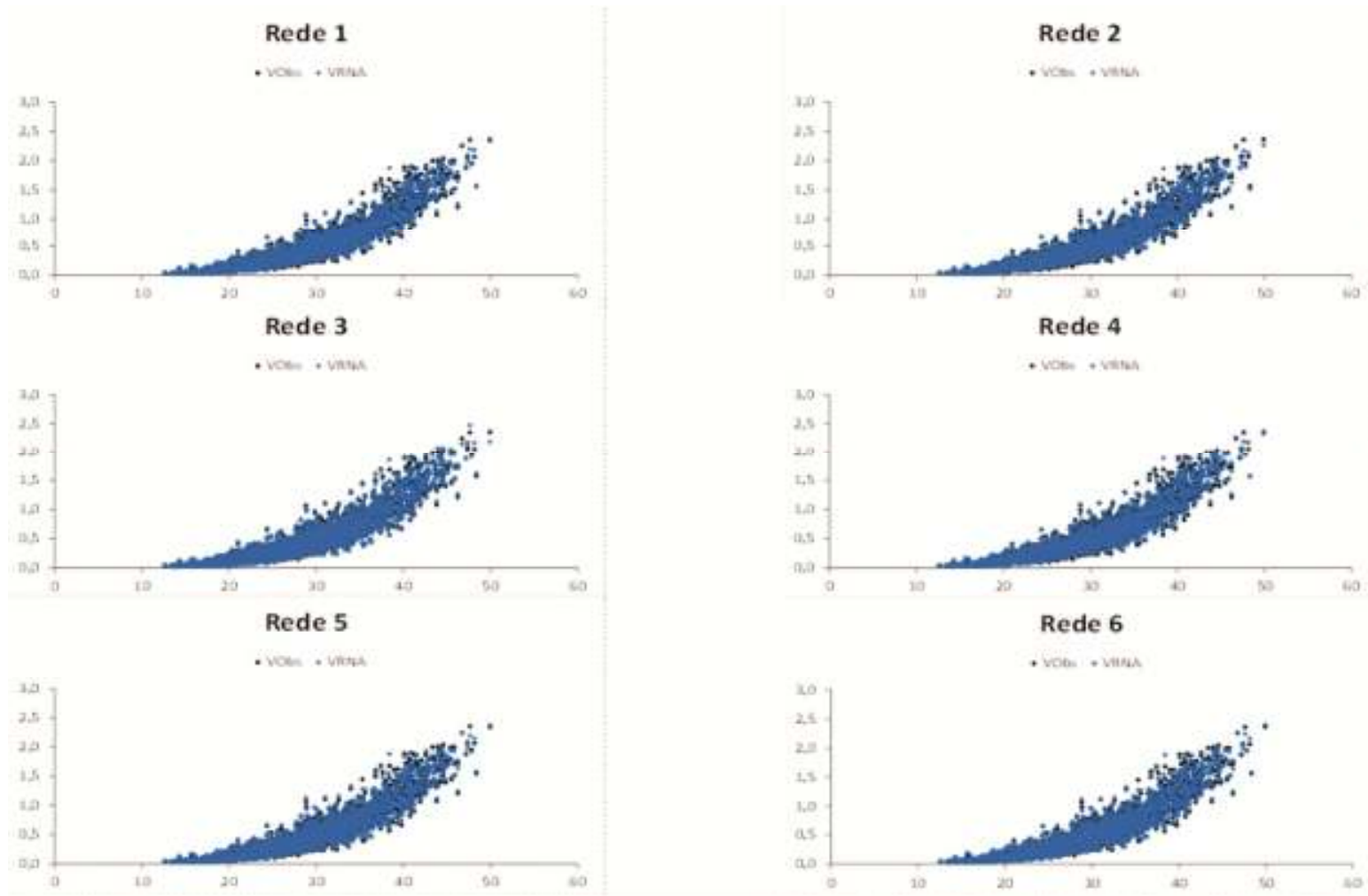


Figura 3 – Distribuição dos volumes observados e estimados (eixo y) em função da Ht (eixo x).

O emprego das variáveis de entrada d0,00; d0,50; d1,00; e d2,00 (diâmetros medidos com as árvores em pé até 2,00 m de altura) juntamente com o DAP e a altura Ht mostrou que é possível empregar as RNA para estimar o volume de clones sem o abate prévio de árvores-amostra, o que é importante no caso de pesquisa, como testes clonais, em que as árvores não podem ser abatidas ao longo da condução do experimento. Nesse caso, a RNA seria treinada com o banco de dados de cubagem do plantio comercial e aplicada aos experimentos. Para as estimativas de volume dos experimentos serem eficientes é necessário que o banco de dados seja suficiente para comportar árvores com diferentes tamanhos e formas.

Além disso, em plantios comerciais, pode resultar em economia considerável com o abate de árvores, uma vez que o emprego de equações demandaria amostragens específicas para cada combinação de variáveis de entrada. No caso do emprego de redes, é necessário apenas ter a variabilidade representada na amostra, não sendo requerida a frequência exigida ao empregar as equações específicas por estrato.

Os resultados obtidos para estimação dos diâmetros ao longo do fuste foram semelhantes aos obtidos para volume. Na Tabela 4 estão as descrições das RNA selecionadas, bem como as respectivas estatísticas de treinamento, a correlação entre os diâmetros observados e estimados e a raiz do erro quadrado médio. Na Tabela 5 estão os resultados do procedimento estatístico L&O para as diferentes configurações de redes, cuja hipótese avaliava foi H_0 : As estimativas dos diâmetros ao longo do fuste obtidas por meio de RNA são iguais aos observados ($\alpha = 5\%$).

Tabela 4 – Descrição das redes neurais artificiais e estatísticas das estimativas dos diâmetros ao longo do fuste

RNA	Entradas numéricas	Entradas categóricas	Função de ativação	Arquitetura	Índice do treino	Índice da seleção	Índice da avaliação	r_{yy}	RMSE (%)
1	P, R, CD, CI, DAP, Ht, h	Clone	RBF	26-626-1	0,09	0,12	0,12	0,9943	4,69
2	R, CD, CI, DAP, Ht, h	Clone	RBF	26-1072-1	0,07	0,12	0,13	0,9954	4,44
3	CD, CI, DAP, Ht, h	Clone	RBF	24-114-1	0,16	0,16	0,17	0,9864	7,57
4	CI, DAP, Ht, h	Clone	RBF	23-577-1	0,09	0,11	0,12	0,9949	4,66
5	CI, DAP, Ht, h	-	RBF	3-38-1	0,12	0,13	0,12	0,9925	5,63
6	DAP, Ht, h	-	RBF	3-212-1	0,10	0,11	0,11	0,9943	4,91

Tabela 5 – Resultados do teste L&O comparando estimativas geradas por redes e pelo modelo de Garay para obtenção dos diâmetros ao longo do fuste e os diâmetros observados

Estatística	RNA 1	RNA 2	RNA 3	RNA 4	RNA 5	RNA 6	Garay
F(Ho)	*	*	*	*	*	*	*
t(e)	*	ns	*	*	*	*	*
$r_{y,y_1} \geq 1 - \bar{e} $	não	não	sim	não	não	sim	não
Erro médio (e)	0,0031	0,0006	0,0166	0,0021	0,0049	0,0068	-0,0028
Conclusão	Diferente	Diferente	Diferente	Diferente	Diferente	Diferente	Diferente

Do mesmo modo que ocorreu com o volume, as redes neurais apresentaram altas correlações e baixos RMSE, indicando que as estimativas dos diâmetros ao longo do fuste foram precisas.

O procedimento estatístico L&O mostrou que tanto os resultados obtidos pelas redes em todas as configurações testadas quanto os obtidos pelo ajuste do modelo de Garay foram diferentes estatisticamente dos diâmetros observados, considerando 5% de probabilidade. Apesar disso, os histogramas (Figura 4) com frequência dos erros percentuais em função da classe de erros evidenciaram que a concentração dos erros resultantes da estimação dos diâmetros pelos dois métodos está no intervalo de $\pm 10\%$, o que é considerado satisfatório.

Na Figura 5 estão os gráficos de dispersão dos diâmetros observados e estimados pelas RNA (eixo x), em função das posições em que foram medidos (h) (eixo y). Constatou-se que em todas as configurações testadas os diâmetros estimados têm o mesmo comportamento dos diâmetros observados, o que evidencia a precisão encontrada pelas RNA.

Constatou-se que quando foram utilizadas somente as variáveis de entrada diâmetro a 1,3 m de altura (DAP), a altura total (Ht) e as posições ao longo do fuste (h) os resultados obtidos para estimação dos diâmetros foram satisfatórios. Como são variáveis facilmente mensuráveis em campo, o abate de árvores é evitado, o que simplifica as operações de inventário, otimiza o tempo de realização e reduz custos.

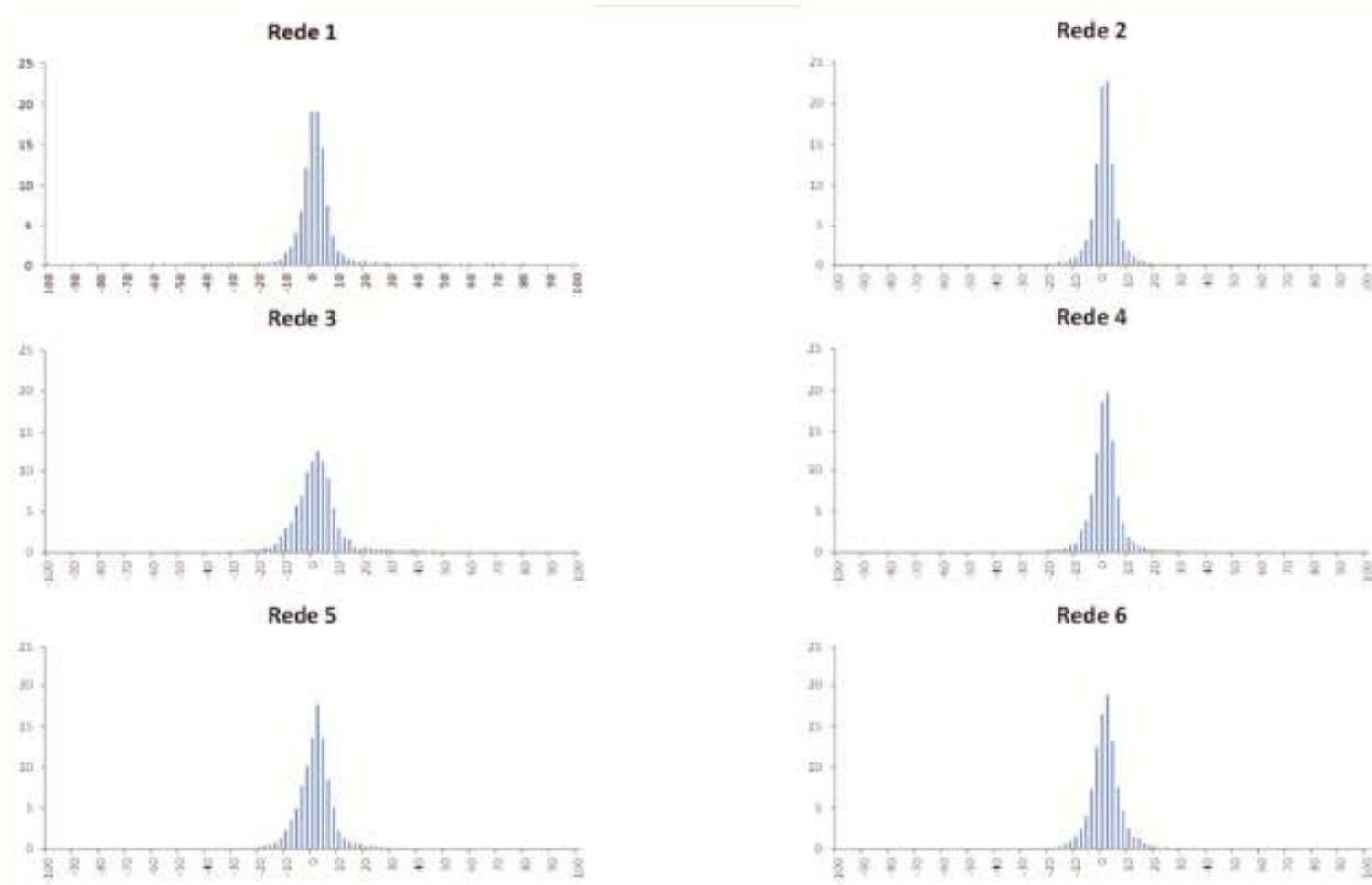


Figura 4 – Histogramas com a frequência dos erros percentuais em função da classe de erros.

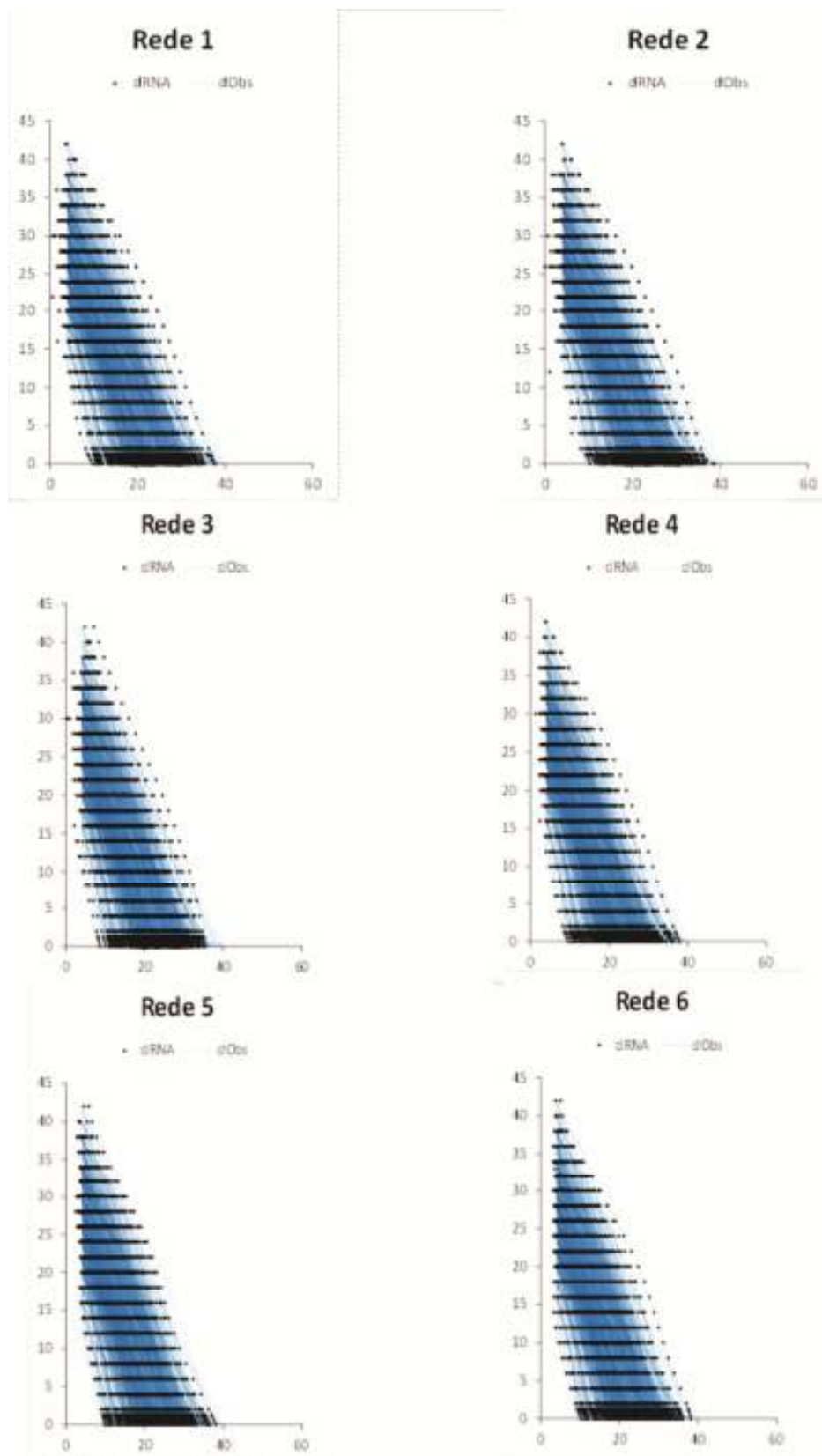


Figura 5 – Gráficos de dispersão dos diâmetros estimados pelas RNA (linha) e dos observados (ponto) (eixo x) em função das posições em que foram medidos (eixo y).

Assim como para volume, as demais variáveis puderam ser excluídas sem prejuízo na precisão das estimativas dos diâmetros ao longo do fuste.

Os resultados das estimações utilizando o modelo de Garay apresentaram o mesmo comportamento observado que os gerados por meio de RNA. Na Figura 6 estão o histograma com a frequência dos erros porcentuais em função da classe de erros e o gráfico de dispersão dos diâmetros estimados pelas RNA e dos observados em função das posições em que foram medidos.

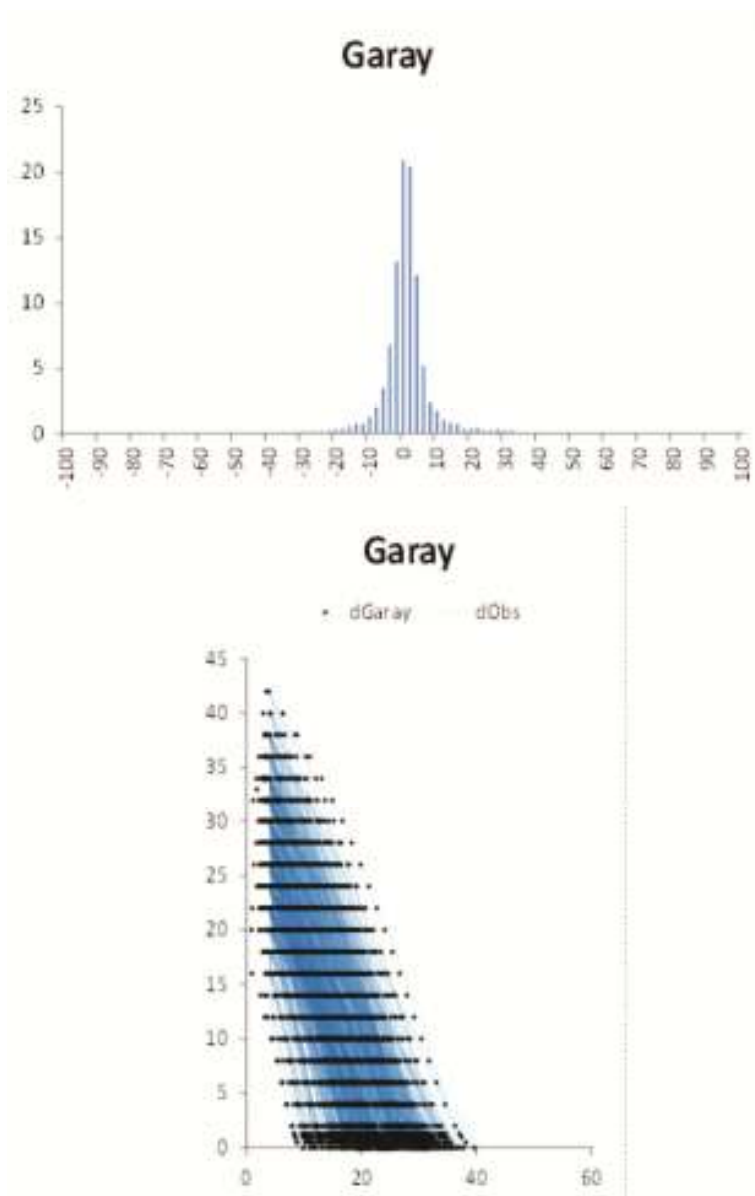


Figura 6 – Histograma com a frequência dos erros porcentuais em função da classe de erros e gráfico de dispersão dos diâmetros estimados pelo modelo de Garay e observados em função das posições em que foram medidos.

Ao comparar os resultados obtidos pela estimação dos diâmetros ao longo do fuste utilizando o modelo de Garay com os gerados pela última rede, que utilizou somente as variáveis DAP, Ht e h, observa-se que a correlação do modelo foi 0,9951 e o da RNA foi de 0,9943, o que demonstra que as estimativas geradas pela rede foram próximo às geradas pelo modelo. Além disso, o histograma com a frequência dos erros percentuais em função da classe de erros para o modelo de Garay mostrou que os erros encontrados também estão concentrados entre $\pm 10\%$.

Esses resultados também evidenciam a possibilidade de simplificação dos procedimentos a serem seguidos para quantificação de multiprodutos da madeira. É possível estimar com precisão o afilamento ao longo do fuste utilizando somente variáveis facilmente obtidas com a árvore em pé. Ao contrário das Redes Neurais Artificiais, o emprego de equações de *taper* demanda maior quantidade de amostragens e de análises estatísticas, resultando em maior custo.

Para que as estimativas de volume de plantios florestais possuam maior exatidão, devem-se empregar equações de volume, de razão volumétrica ou de *taper* compatíveis com a variação da população a ser inventariada. Para isso, é preciso utilizar equações específicas por espécie, espaçamento, idade e por regime de corte (CAMPOS; LEITE, 2009). Ainda segundo esses autores, as árvores-amostra devem ser colhidas por toda a população, o que significa que é necessário cubar árvores em diferentes lugares para garantir que a população seja bem representada. A exatidão necessária nesses processos é obtida por meio de maior estratificação, o que aumenta o custo de amostragem (BINOTI, 2012).

A metodologia proposta neste estudo mostrou-se eficiente para estimar o volume e os diâmetros ao longo do fuste, utilizando somente variáveis facilmente obtidas nas operações de inventário florestal, sem a necessidade de derrubar árvores.

6. CONCLUSÃO

As Redes Neurais Artificiais são eficientes para estimar o volume de árvores individuais.

As Redes Neurais Artificiais são eficientes e potencialmente úteis para estimar com exatidão o afileamento do fuste de árvores individuais.

As Redes Neurais Artificiais podem ser empregadas para estimar o volume de árvores com exatidão, sem a necessidade do abate de árvores, desde que um banco de dados com variabilidade e informações de diâmetro nas alturas até 2,00 m esteja disponível. Esse fato é extremamente importante em plantios experimentais, uma vez que o abate de árvores é limitado.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

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

BINOTI, M. L. M. da S. *Redes neurais artificiais aplicadas ao manejo florestal*. 2012. 128 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, MG, 2012.

BRAGA, Antônio de Pádua; LUDEMIR, Teresa Bernarda; CARVALHO, André Ponce de Leon F. de. *Redes neurais artificiais: Teoria e aplicações*. 1. ed. Rio de Janeiro, RJ: LTC, 2000.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. *Mensuração florestal: perguntas e respostas*. 3. ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2009. 470 p.

CAMPOS, João Carlos Chagas; LEITE, Helio Garcia. *Mensuração florestal*. 3. ed. Viçosa: Editora UFV, 2009.

GARAY, L. Tropical forest utilization system. VIII. A taper model for entire stem profile including buttressing. Seattle: **Coll. Forest Res.**, Inst. Forest Prod. Univ. Wash., 1979. 64 p. (Contrib. 36).

GÖRGENS, Eric Bastos; LEITE, Helio Garcia; SANTOS; Heleno do Nascimento; GLERIANI, José Marinaldo. Estimção do volume de árvores utilizando redes neurais artificiais. *Revista Árvore*, v. 33, n. 6, p. 1141-1147, 2005.

GUYON, Isabele; WESTON, Jason; BARNHILL, Stephen; VAPNIK, Vladimir. Gene selection for cancer classification using support vector machines. Edição: Nello Cristianini. *Machine Learning*, n. 46, p. 389-422, 2002.

HEARST, Martin A.; DUMAIS, Susan T; OSUNA, Edgar; PLATT, John; SCHOLKOPF, Bernhard. Trends and controversies - support vector machines. *IEEE Intellig Systems*, v. 13, n. 4, p. 18-28, 1998.

LEITE, H. G.; ANDRADE, V. C. L. Um método para condução de inventários florestais sem o uso de equações volumétricas. *Revista Árvore*, v. 26, n. 3, p. 321-328, 2002.

LEITE, H. G.; OLIVEIRA, F. H. T. Statistical procedure to test identity between analytical methods. **Communications in soil science and plant analysis**, v.33, n. 7 e 8, p.1105-1118, 2002.

MENDONÇA, A. R. de; SILVA, G. F. da; OLIVEIRA, J. T. da S.; NOGUEIRA, G. S. Avaliação de funções de afilamento visando a otimização de fustes de *Eucalyptus* sp. para multiprodutos. *Cerne*, Lavras, v. 13, n. 1, p. 71-82, jan./mar. 2007.

SILVA, Mayra Luiza Marques da; BINOTI, Daniel Henrique Breda; GLERIANI, José Marinaldo; LEITE, Helio Garcia. Ajuste do modelo de Shumacher e Hall e aplicações de redes neurais artificiais para estimar volume de árvores de eucalipto. *Revista Árvore*, v. 33, n. 6, p. 1133-1139, 2009.

SCAVINSKI, V.; FIGUEIREDO FILHO, A; RETSLAFF, F. A. S.; DIAS, A. N.; RETSLAFF, F. M. S.. AJUSTE DE FUNÇÕES DE AFILAMENTO PARA *Pinus elliottii* NA FLONA DE IRATI. In: 4º Congresso Florestal Paranaense 2012, 2012, Curitiba. Anais do 4º Congresso Florestal Paranaense 2012, 2012.

SILVA, Patrícia Guedes. *Detecção de mudanças em áreas de floresta tropicais sob exploração madeireira através da técnica análise do vetor de mudança*. São José dos Campo: INPE, 2004.

SOUZA, R. R. *Estudo da forma do fuste de árvores de Eucalyptus sp. em diferentes densidades de plantio*. 2013. 113 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha e Mucuri, Diamantina, 2013.

THOMAS, C.; ANDRADE, C. M.; SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G. Comparação de equações volumétricas ajustadas com dados de cubagem e análise de tronco. *Ciência Florestal*, Santa Maria, RS, v. 16, n. 3, p. 319-327, 2006.