

AJUSTE DO MODELO DE SCHUMACHER E HALL E APLICAÇÃO DE REDES NEURAIAS ARTIFICIAIS PARA ESTIMAR VOLUME DE ÁRVORES DE EUCALIPTO¹

Mayra Luiza Marques da Silva², Daniel Henrique Breda Binoti², José Marinaldo Gleriani³ e Helio Garcia Leite³.

RESUMO – Objetivou-se, neste trabalho, avaliar o ajuste do modelo volumétrico de Schumacher e Hall por diferentes algoritmos, bem como a aplicação de redes neurais artificiais para estimação do volume de madeira de eucalipto em função do diâmetro a 1,30 m do solo (DAP), da altura total (Ht) e do clone. Foram utilizadas 21 cubagens de povoamentos de clones de eucalipto com DAP variando de 4,5 a 28,3 cm e altura total de 6,6 a 33,8 m, num total de 862 árvores. O modelo volumétrico de Schumacher e Hall foi ajustado nas formas linear e não linear, com os seguintes algoritmos: Gauss-Newton, Quasi-Newton, Levenberg-Marquardt, Simplex, Hooke-Jeeves Pattern, Rosenbrock Pattern, Simplex, Hooke-Jeeves e Rosenbrock, utilizado simultaneamente com o método Quasi-Newton e com o princípio da Máxima Verossimilhança. Diferentes arquiteturas e modelos (*Multilayer Perceptron* – MLP e *Radial Basis Function* – RBF) de redes neurais artificiais foram testados, sendo selecionadas as redes que melhor representaram os dados. As estimativas dos volumes foram avaliadas por gráficos de volume estimado em função do volume observado e pelo teste estatístico L&O. Assim, conclui-se que o ajuste do modelo de Schumacher e Hall pode ser usado na sua forma linear, com boa representatividade e sem apresentar tendenciosidade; os algoritmos Gauss-Newton, Quasi-Newton e Levenberg-Marquardt mostraram-se eficientes para o ajuste do modelo volumétrico de Schumacher e Hall, e as redes neurais artificiais apresentaram boa adequação ao problema, sendo elas altamente recomendadas para realizar prognose da produção de florestas plantadas.

Palavras-chave: Equações de volume, regressão não linear e redes neurais.

ADJUSTMENT OF THE SCHUMACHER AND HALL MODEL AND APPLICATION OF ARTIFICIAL NEURAL NETWORKS TO ESTIMATE VOLUME OF EUCALYPT TREES

ABSTRACT – This research aimed at evaluating the adjustment of Schumacher and Hall volumetric model by different algorithms and the application of artificial neural networks to estimate the volume of wood of eucalyptus according to the diameter at breast height (DBH), total height (Ht) of the clone. For such, 21 scalings of stands of eucalyptus clones were used with DBH ranging from 4,5 to 28,3 cm and total height ranging from 6,6 to 33,8 m. The Schumacher and Hall volumetric model was adjusted linearly and nonlinearly with the following algorithms: Gauss-Newton, Quasi-Newton, Levenberg-Marquardt, Simplex, Hooke-Jeeves Pattern, Rosenbrock Pattern; Simplex, Hooke-Jeeves, and Rosenbrock, used simultaneously with the Quasi-Newton method and the principle of Maximum Likelihood. Different architectures and models (*Multilayer Perceptron* - MLP and *Radial Basis Function* - RBF) of artificial neural networks were tested and the networks that best represented the data were selected. Estimates of the volumes were evaluated by graphics of estimated volume according to the observed volume and by the L&O statistical test. It was concluded that the adjustment of the Schumacher and Hall model can be used in its linear form, with good representation and without

¹ Recebido em 13.05.2008 e aceito para publicação em 23.06.2009.

² Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal da UFV. E-mail: <mayra_uvf@yahoo.com.br> e <danielbinoti@yahoo.com.br>.

³ Departamento de Engenharia Florestal da Universidade Federal de Viçosa (UFV). E-mail: <hglete@ufv.br> e <gleriani@ufv.br>.

presenting bias of the data; the Gauss-Newton, Quasi-Newton and Levenberg-Marquardt algorithms were effective in the adjustment of Schumacher and Hall volumetric model. The artificial neural networks showed good adequacy to the problem and are highly recommended to perform production prognoses of planted forests.

Keywords: Volume equations, nonlinear regression and neural networks.

1. INTRODUÇÃO

O emprego de equações volumétricas constitui uma das principais ferramentas para quantificação da produção de povoamentos florestais, sendo base para o manejo sustentável de plantações florestais (LEITE e ANDRADE, 2003). O volume de árvores cubadas rigorosamente é correlacionado com variáveis de fácil mensuração do povoamento, como altura total e diâmetro a 1,30 m do solo (DAP).

Entre os vários modelos existentes para expressarem o volume de madeira em função do diâmetro e da altura, o modelo proposto por Schumacher e Hall (1933) é um dos mais difundidos na área florestal, devido às suas propriedades estatísticas, uma vez que resulta em estimativas quase sempre não tendenciosas (LEITE e ANDRADE, 2002; CAMPOS e LEITE, 2006). Na maioria das vezes, esse modelo volumétrico tem sido ajustado na forma aproximada (linearizado por transformação logarítmica) pelo Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MMQO). Quando o ajuste é feito por Método dos Mínimos Quadrados Não Lineares, os algoritmos Levenberg-Marquardt e Gauss-Newton têm sido os mais utilizados. O ajuste de modelos não lineares pode ser feito utilizando diferentes algoritmos ou métodos iterativos. Para garantir maior eficiência na modelagem, estimativas iniciais dos pontos de controle podem ser obtidas usando-se os enfoques discutidos em Drapper e Smith (1998).

Alternativa atrativa para representar relações não lineares em relação aos métodos estatísticos tradicionais tem sido a aplicação de Redes Neurais Artificiais (RNA) (LEK et al., 1996; PENG e WEN, 1999). 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., 1998). A aplicação dessa ferramenta computacional no manejo de florestas

aprimorando técnicas de biometria e inventário florestal permite maior acurácia na estimação da produção, dando maior suporte à tomada de decisão (PENG e WEN, 1999; CASTELLANOS et al., 2007).

Diamantopoulou (2005) comprovou a superioridade das RNA em relação aos algoritmos de regressão não linear para estudar o volume de casca em *Pinus* e concluiu que as RNA têm grande potencial para muitas aplicações em modelagem florestal, sendo útil como alternativa às tradicionais. Gorgens (2006), utilizando dados de cubagem de diferentes empresas florestais, testou algumas formas de pré-processamento dos dados e arquiteturas de RNA para estimar volume de árvores de eucalipto (*Eucalyptus* spp.) e teca (*Tectona grandis* L.f.). Silva (2008) obteve redes neurais que estimaram, de maneira precisa, os diâmetros sem casca e do cerne ao longo do fuste para árvores de teça, superando os resultados obtidos por modelo de *taper* (Kozak).

Neste estudo foram avaliadas diferentes alternativas para obter as estimativas dos parâmetros do modelo de Schumacher e Hall na forma não linear, pelos algoritmos iterativos: Gauss-Newton, Quasi-Newton, Levenberg-Marquardt, Simplex, Hooke-Jeeves Pattern, Rosenbrock pattern; Simplex, Hooke-Jeeves e Rosenbrock simultaneamente com o método Quasi-Newton e pelo princípio da Máxima Verossimilhança. Também, foi objetivo avaliar o desempenho de Redes Neurais Artificiais (RNA) na estimação do volume de madeira em função do DAP, altura total e clone.

2. MATERIALE MÉTODOS

Os dados foram obtidos em povoamentos de clones de eucalipto com DAP variando de 4,5 a 28,3 cm e altura total (Ht) oscilando de 6,6 a 33,8 m. O banco de dados foi composto de 21 cubagens cada uma, compreendendo um tipo de clone e com informações como data da cubagem (mês e ano), DAP, Ht, alturas de cada seção e correspondentes diâmetros com e sem casca. Todos os dados foram avaliados com relação à consistência, através de gráficos de $V = f(\text{DAP})$ e $V = f(\text{Ht})$, sendo eliminados os *outliers*.

Os volumes individuais foram obtidos pela aplicação da fórmula de Smalian. O diâmetro mínimo comercial com casca foi de 4 cm e as seções ao longo do fuste, com intervalos de 1 m.

O modelo volumétrico adotado foi proposto por Schumacher e Hall (1933), sendo:

$$V = \beta_0 * DAP^{\beta_1} * Ht^{\beta_2} * \varepsilon \quad (1)$$

em que:

V = volume, m³;

DAP = diâmetro a 1,3 m de altura, cm;

Ht = altura total da árvore, m;

β_i = parâmetros; e

ε = erro aleatório, $\varepsilon \sim \text{NID}(0, \sigma^2)$.

Para obter a estimativa dos parâmetros pelo Método dos Mínimos Quadrados Ordinários, procedeu-se à aproximação linear do modelo de Schumacher e Hall, por transformação logarítmica:

$$\ln V = \beta_0 + \beta_1 * \ln DAP + \beta_2 * \ln Ht + \varepsilon \quad (2)$$

Todos os ajustes, não lineares e RNA, foram feitos com o auxílio do programa *STATISTICA 7.0*; somente o método da máxima verossimilhança foi ajustado com o auxílio do programa *KY PLOT*, versão 2.15 beta.

Na construção e treinamento das RNA, utilizou-se a ferramenta *Intelligent Problem Solver*, do *STATISTICA 7.0*. Essa ferramenta realiza a mineração dos dados, ou seja, normaliza os dados no intervalo entre 0-1, testa diferentes arquiteturas e modelos (*Multilayer Perceptron* – MLP ou *Radial Basis Function* – RBF) de redes e seleciona as redes que melhor representem os dados. Nas redes MLP, a função de ativação (não linear), aplicada a cada neurônio, utiliza como argumento o produto escalar do vetor de entrada (x) e do vetor de peso (w) associado a esse nodo, possui pelo menos uma camada oculta de processamento e alto grau de conectividade entre os neurônios, a qual é definida pelos pesos sinápticos. Nas redes RBF, a função de ativação tem como argumento a distância entre seus vetores de entrada e de peso, e a arquitetura baseia-se em uma camada de entrada, uma camada de saída e uma única camada intermediária. O treinamento de ambos os tipos de rede, MLP e RBF, é do tipo *feedforward* e ocorre pelo método supervisionado.

Ajustaram-se nove RNA utilizando como variáveis de entrada o DAP e a altura total. E outras nove redes incluíram, também, a variável categórica clone. Nos dois casos, a variável de saída foi o volume total com casca (VTCC).

Os volumes estimados pelas equações obtidas usando os diferentes métodos de ajuste e as arquiteturas ajustadas com as RNA foram comparados com os correspondentes volumes observados. Essa comparação foi feita utilizando-se o teste estatístico (L&O) proposto por Leite e Oliveira (2002).

Gráficos do volume estimado em função do observado foram elaborados visando identificar possíveis discrepâncias ou tendências nas estimativas de volume.

3. RESULTADOS

Na análise gráfica dos ajustes do modelo de Schumacher e Hall (Figura 1), o modelo linearizado ajustado pelo método dos mínimos quadrados ordinários apresentou melhor ajuste aos dados. Os algoritmos Gauss-Newton, Quasi-Newton, Levenberg-Marquardt, Simplex, Hooke-Jeeves e Rosenbrock, simultaneamente com o método Quasi-Newton e o princípio da Máxima Verossimilhança, apresentaram ajuste semelhante e bom. Os algoritmos Simplex, Hooke-Jeeves Pattern e Rosenbrock Pattern não promoveram ajustes satisfatórios do modelo.

As arquiteturas das redes neurais artificiais ajustadas, dos tipos *Radial Basis Function* (RBF) e *Multilayer Perceptron* (MLP), são resumidas na Tabela 1, tendo como arquitetura genérica uma camada de entrada com as variáveis DAP, Ht ou DAP, Ht e clone, uma camada oculta com *n* neurônios e uma camada de saída com apenas um neurônio estimando o VTCC.

Os volumes estimados pelas RNA com duas entradas (DAP e Ht) e com três entradas (DAP, Ht e Clone) em função do volume observado resultaram em tendência semelhante para ambas as opções de variáveis de entrada, porém com ligeira melhora ao incluir a variável clone, conforme ilustrado, respectivamente, nas Figuras 2 e 3.

No resultado do teste L&O, consideraram-se apenas as redes 2 e 8 de três entradas (DAP, Ht e clone), com os modelos RBF e MLP, respectivamente, com valores observados estatisticamente iguais aos estimados. Verificou-se tendência em todos os ajustes, tanto para redes quanto para Schumacher e Hall, de superestimação para árvores com DAP inferior a 10 cm.

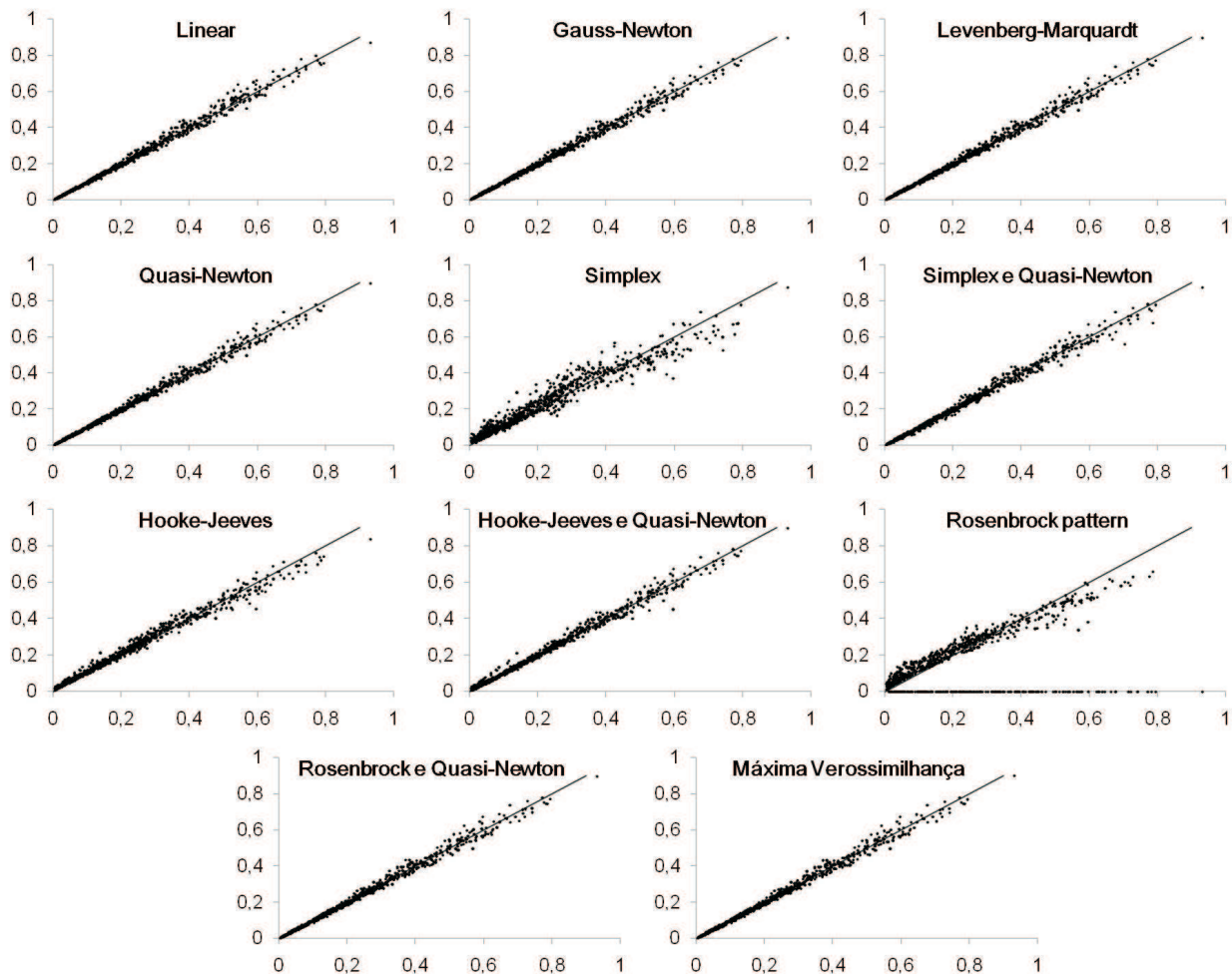


Figura 1 – Análise gráfica do ajuste do modelo de Schumacher e Hall por diferentes algoritmos, com $VTCC_{\text{estimado}} = f(VTCC_{\text{observado}})$.
Figure 1 – Graphic analysis of the adjustment of the Schumacher and Hall model by different algorithms, with $VTCC_{\text{estimated}} = f(VTCC_{\text{observed}})$.

Na comparação das estimativas de volume pelo modelo linearizado e pelas redes neurais 2 e 8, que consideram DAP, Ht e clone como variáveis de entrada (Figura 4), verificou-se que não existem grandes diferenças em termos de tendenciosidade. Isso permite inferir que não há risco em utilizar o modelo de Schumacher e Hall na sua forma linearizada.

4. DISCUSSÃO

Entre os algoritmos utilizados para ajustar o modelo de Schumacher e Hall, os métodos Simplex, Hooke-Jeeves e Rosenbrock Pattern apresentaram os piores ajustes, apesar de serem computacionalmente mais simples e apresentarem menor número de interações.

Por meio do teste L&O, confirmou-se que a utilização de RNA com três variáveis de entrada e arquiteturas RBF: 15-42-1 e MLP: 15-1-1 foi a melhor opção para se ter uma máxima precisão nas estimativas de volume. Esse resultado é de grande auxílio ao modelador, visto que não seria necessário o ajuste dos modelos volumétricos por clone e tendo o ajuste de RNA representativo para todos os clones da empresa (HAYKIN, 2001).

A obtenção da arquitetura adequada da rede neural depende de inúmeras tentativas, a fim de gerar resultados satisfatórios, uma vez que esse processo é aleatório, ou seja, o número de neurônios por camadas não se baseia em nenhum critério, apenas em tentativa. Assim, os resultados deste trabalho servem como ponto de partida para pesquisas posteriores.

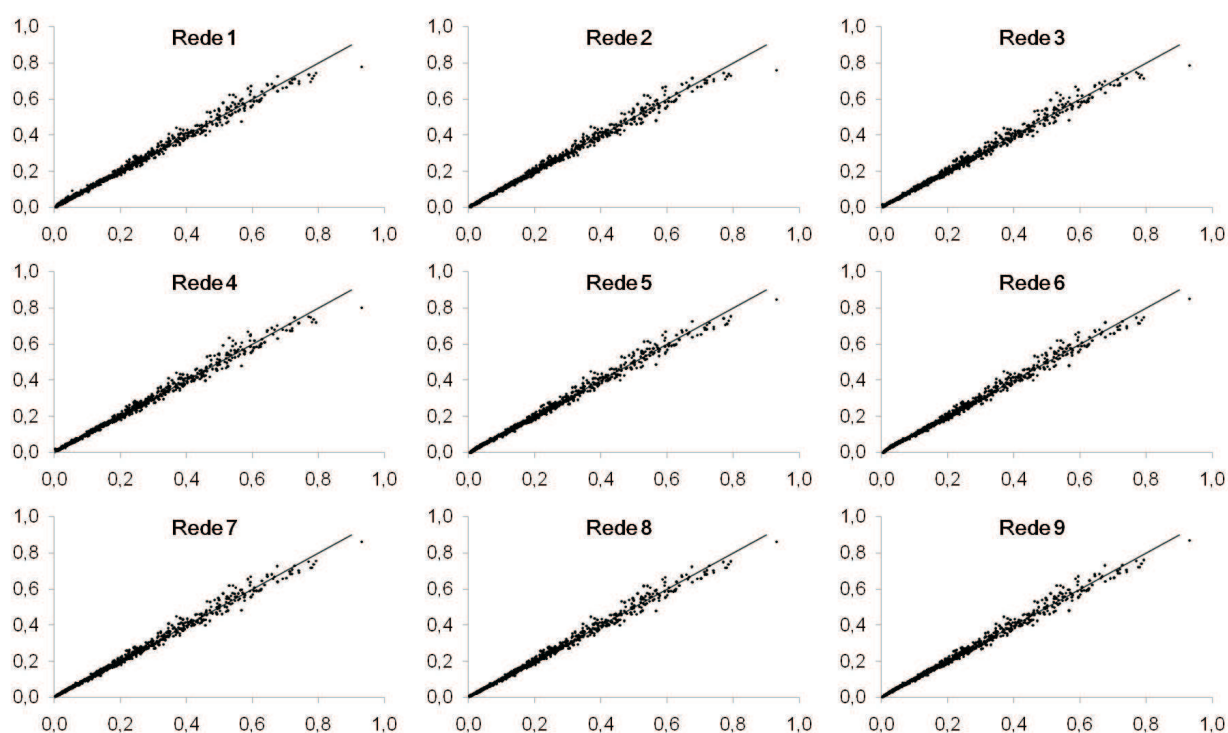


Figura 2 – Análise gráfica do ajuste das redes com variáveis de entrada DAP e Ht, sendo $VTCC_{estimado} = f(VTCC_{observado})$.
Figure 2 – Graphic analysis of the adjustment of networks with the input variables DBH and Ht, with $VTCC_{estimated} = f(VTCC_{observed})$.

Tabela 1 – Arquitetura das Redes Neurais Artificiais ajustadas para obtenção do volume a partir das variáveis DAP, Ht e clone.
Table 1 – Architecture of Artificial Neural Networks adjusted for obtaining volume from DAP variables, and Ht clone.

Rede	Variáveis de entrada	Variável de saída	Tipo	Número de neurônios		
				Camada 1	Camada 2	Camada 3
Rede 1	DAP, Ht, clone	VTCC	RBF	15	74	1
Rede 2	DAP, Ht, clone	VTCC	RBF	15	42	1
Rede 3	DAP, Ht, clone	VTCC	RBF	15	64	1
Rede 4	DAP, Ht, clone	VTCC	RBF	15	48	1
Rede 5	DAP, Ht, clone	VTCC	MLP	15	3	1
Rede 6	DAP, Ht, clone	VTCC	MLP	15	1	1
Rede 7	DAP, Ht, clone	VTCC	MLP	15	1	1
Rede 8	DAP, Ht, clone	VTCC	MLP	15	1	1
Rede 9	DAP, Ht, clone	VTCC	MLP	15	3	1
Rede 1	DAP, Ht	VTCC	RBF	2	16	1
Rede 2	DAP, Ht	VTCC	RBF	2	27	1
Rede 3	DAP, Ht	VTCC	RBF	2	21	1
Rede 4	DAP, Ht	VTCC	RBF	2	14	1
Rede 5	DAP, Ht	VTCC	MLP	2	1	1
Rede 6	DAP, Ht	VTCC	MLP	2	6	1
Rede 7	DAP, Ht	VTCC	MLP	2	4	1
Rede 8	DAP, Ht	VTCC	MLP	2	5	1
Rede 9	DAP, Ht	VTCC	MLP	2	3	1

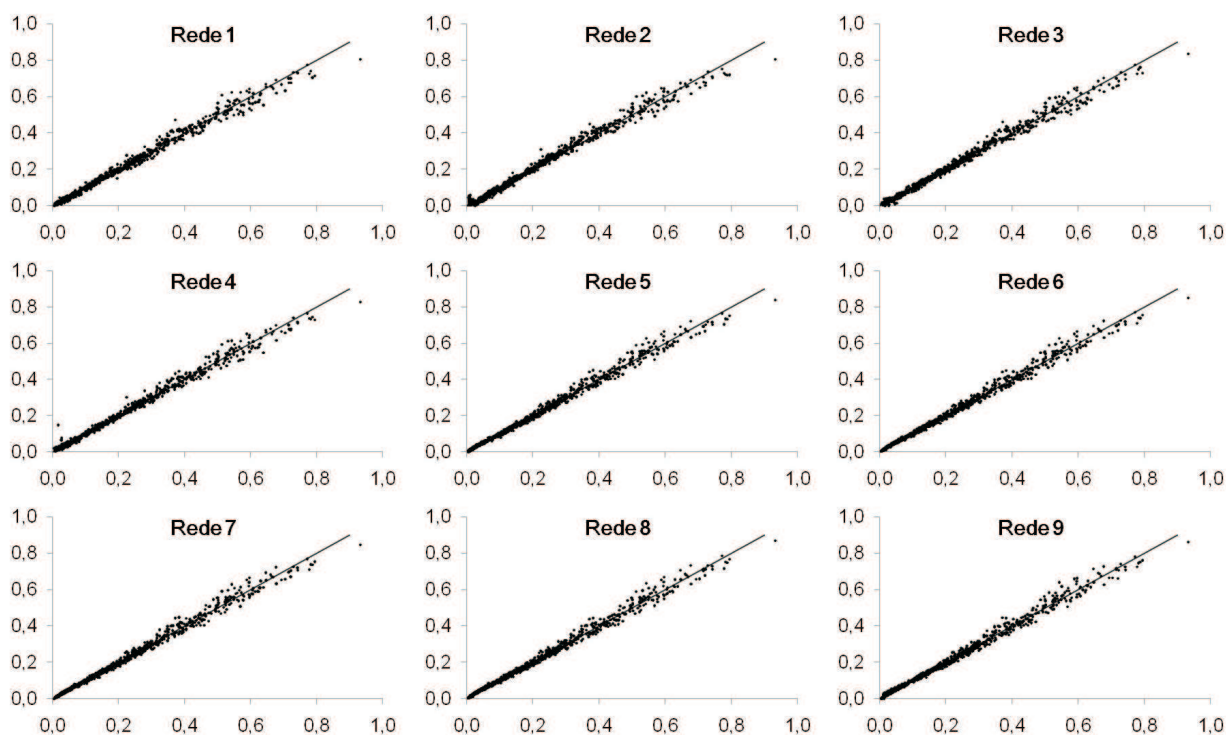


Figura 3 – Análise gráfica do ajuste das redes com variáveis de entrada DAP, Ht e clone, sendo $VTCC_{estimado} = f(VTCC_{observado})$.
Figure 3 – Graphical analysis of the adjustment of networks with the input variables DBH, Ht and clone, with $VTCC_{estimated} = f(VTCC_{observed})$.

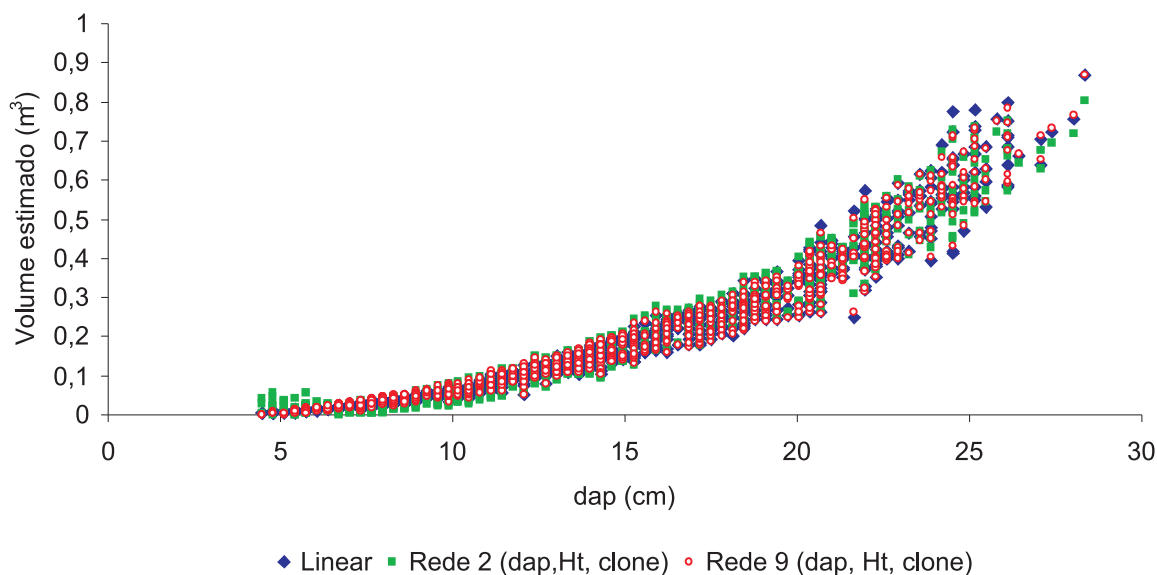


Figura 4 – Estimativa volumétrica pelo modelo linearizado de Schumacher e Hall e por duas arquiteturas de redes neurais que consideram como variáveis de entrada clone, DAP e Ht.

Figure 4 – Volumetric estimates by the linear model of Schumacher and Hall and two architectures of neural networks that consider clone, dbh and Ht as input variables.

6. CONCLUSÕES

O ajuste do modelo de Schumacher e Hall pode ser usado na sua forma linear, com boa representabilidade e sem apresentar tendenciosidade.

Os algoritmos Gauss-Newton, Quasi-Newton e Levenberg-Marquardt mostraram-se eficientes para o ajuste do modelo volumétrico de Schumacher e Hall.

A tecnologia das RNAs apresentou boa adequação ao problema, sendo esta altamente recomendada para previsão volumétrica da produção de florestas plantadas.

7. REFERÊNCIAS

- CASTELLANOS, A.; BLANCO, A. M.; PALENCIA, V. Applications of radial basis neural networks for area forest. **International Journal Information Theories and Applications**, v.14, p.218-222, 2007.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 2.ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2006. 470p.
- 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.
- DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis**. 3.ed. New York: Wiley, 1998. 706p.
- GORGENS, E. **Estimação do volume de árvores utilizando redes neurais artificiais**. 2006. 84f. Tese (Mestrado em Ciência Florestal) - Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2006.
- HAYKIN, S. **Redes neurais: princípios e prática**. 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. 900p.
- 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.; ANDRADE, V. C. L. Importância das variáveis altura dominante e altura total em equações hipsométricas e volumétricas. **Revista Árvore**, v.27, n.3, p.301-310, 2003.
- LEITE, H. G.; OLIVEIRA, F. H. T. Statistical procedure to test the identity of analytical methods. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 33, n.7/8, p.1105-1118, 2002.
- LEK, S.; DELACOSTE, M.; BARAN, P.; DIMOPOULOS, I.; LAUGA, J.; AULAGNIER, S. Application of neural networks to modelling nonlinear relationships in ecology. **Ecological Modelling**, v.90, n.1, p.39-52, 1996.
- PENG, C.; WEN, X. Recent applications of artificial neural networks in forest resource management: an overview. In: AMERICAN ASSOCIATION FOR ARTIFICIAL INTELLIGENCE WORKSHOP, 1999, Orlando. Disponível em: <<http://www.aaai.org/Library/Workshops/1999/ws99-07-003.php>>. Acesso em: 13 de março, 2008.
- SCHUMACHER, F. X.; HALL, F. S. Logarithmic expression of timber-tree volume. **Journal of Agricultural Research**, v.47, n.9, p.719-734, 1933.
- SILVA, M. L. M. **Estimação do diâmetro sem casca e diâmetro do cerne para árvores de *Tectona grandis* Linn. utilizando redes neurais artificiais**. 2008. 47f. Monografia (Exigência para conclusão do curso de Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2008.

