

ESTIMAÇÃO DA ALTURA TOTAL DE ÁRVORES DE IPÊ FELPUDO UTILIZANDO MODELOS DE REGRESSÃO E REDES NEURAIS ARTIFICIAIS

Adriano Ribeiro de MENDONÇA¹
Janiel Cerqueira da SILVA¹
Taíse Severo AOZANI¹
Eth Rocha da SILVA¹
Jeangelis Silva SANTOS¹
Daniel Henrique Breda BINOTI¹
Gilson Fernandes da SILVA¹

- RESUMO: O objetivo deste trabalho foi avaliar a exatidão das estimativas de altura total com a utilização de modelos de regressão e redes neurais artificiais (RNAs) em um plantio puro de ipê felpudo. Foram ajustados quatro modelos de regressão e treinadas redes do tipo Multilayer Perceptron, com dois critérios de treinamento: considerando como variáveis de entrada o DAP, idade e altura dominante e, utilizando apenas o DAP. As RNAs e os modelos de regressão foram avaliados pelas estatísticas Viés (V), Média das diferenças absoluta (MD), Raiz do quadrado médio do erro (RQME) e Coeficiente de correlação (r), além da análise gráfica dos resíduos. A estimação da altura total das árvores com utilização de modelos genéricos de regressão e a RNA com covariáveis apresentou maior exatidão quando comparada aos modelos de regressão e da RNA em função somente do DAP.
- PALAVRAS-CHAVE: Inteligência artificial; relação hipsométrica; exatidão.

1 Introdução

As espécies nativas são muito valorizadas pela qualidade da sua madeira. Isso levou a exploração de matas primárias, causando redução dos estoques existentes. Em decorrência dessa exploração, a legislação para o manejo florestal sustentável das áreas a serem exploradas tornou-se mais rigorosa. Uma alternativa para produzir madeira de espécies nativas visando atender a demanda e diminuir a pressão nas matas primárias, é por meio do plantio dessas espécies (NICODEMO, 2009). Dentro desse contexto, uma espécie com potencial para ser implantada em plantios puros é o ipê felpudo [*Zeyheria tuberculosa* (Vell.) Bur].

O ipê felpudo, é uma espécie nativa do Brasil, pertencente à família Bignoniaceae, pioneira, que possui rápido crescimento, grande porte, boa desrama natural e tem grande

¹ Universidade Federal do Espírito Santo - UFES, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias, Departamento de Ciências Florestais e da Madeira, CEP: 29550-000, Jerônimo Monteiro, ES, Brasil. E-mail: adriano.mendonca@ufes.br; janielc107@gmail.com; taiseaozani@hotmail.com; rochacz@hotmai.com; jeangelis@gmail.com; danielhbbinoti@gmail.com; gilson.silva@pq.cnpq.br

competitividade com outras espécies pioneiras, forma populações homogêneas naturalmente, é de fácil propagação (SOUZA, 2004). A espécie é utilizada no paisagismo e sistemas silvipastoris e sua madeira serve para a construção civil, confecção de cabos de ferramentas e de instrumentos agrícolas, moirões, papel e lenha (VIANA *et al.*, 2002).

O manejo de florestas plantadas de espécies como o ipê felpudo [*Zeyheria tuberculosa* (Vell.) Bur], além de suprir a demanda de madeira para produção, é uma forma importante de preservar as florestas nativas e a biodiversidade local, uma vez que o desmatamento em nível global é uma das grandes preocupações atuais. Entretanto, para que o manejo seja eficiente, é necessário que seja avaliado o crescimento e produção das espécies por meio de inventários florestais.

É comum, nos inventários florestais, a medição dos diâmetros de todas as árvores da parcela, mas somente a altura de algumas delas. Isso se deve ao fato de que a medição do diâmetro a 1,30 m do solo (*DAP*) das árvores é mais fácil de obter que a altura. O crescimento em altura das árvores é uma das variáveis de grande importância para o manejo florestal, visto que essa medida é essencial para o planejamento florestal e tomadas de decisões (SCHNEIDER, 1993).

Como a medição da altura total das árvores é uma atividade onerosa, é comum nos inventários florestais utilizar modelos de regressão para estimar a altura das demais árvores da parcela em função dos diâmetros que foram mensurados. Vários pesquisadores avaliaram o uso de modelos de regressão (MENDONÇA *et al.*, 2015a; MENDONÇA *et al.*, 2015b; NICOLETTI *et al.*, 2016; SOUZA *et al.*, 2016), mas quase sempre para espécies tradicionais (gênero *Pinus* e *Eucalyptus*).

Outra possibilidade de estimar a altura, e que vem sendo difundida, é o uso de Redes Neurais Artificiais. Segundo Haykin (2001), as *RNAs* são sistemas computacionais paralelos constituídos por unidades de processamento simples, também denominadas neurônios artificiais ou nodos, conectadas entre si de maneira específica para desempenhar determinada tarefa. Existem casos em que as *RNAs* têm apresentado desempenho superior aos modelos de regressão (HAYKIN, 2001). Vários fatores contribuem para esse resultado, como: apresentar estrutura em camadas; resolver problemas complexos, pois tem a habilidade de aprender e generalizar; são tolerantes a falhas e ruídos; podem modelar diversas variáveis e suas relações não lineares; a possibilidade de modelagem com variáveis categóricas; e analogia neurobiológica (HAYKIN, 2001).

Alguns pesquisadores utilizaram *RNAs* na estimação da altura total de árvores em inventários florestais: Binoti *et al.* (2013a), Binoti *et al.* (2013b), Martins *et al.* (2016) e Vendruscolo *et al.* (2015) em povoamentos de eucalipto; Campos *et al.* (2016) em diferentes espécies de eucalipto e pinus; e Vendruscolo *et al.* (2017) em plantios de teca. Entretanto, ainda não foram encontrados trabalhos para o ipê felpudo.

Diante disso, o presente trabalho teve como objetivo avaliar a exatidão das estimativas de altura total com a utilização de modelos de regressão e *RNAs*, em um plantio puro de ipê felpudo.

2 Material e métodos

2.1 Caracterização da área de estudo

A pesquisa foi realizada em uma área de plantio puro de ipê felpudo, pertencente a Reserva Natural da Vale, no município de Linhares, Espírito Santo, entre as coordenadas 19°06' a 19°18'S e 39°45' a 40°19'W. O plantio foi feito numa parcela de observação de 784 m² em espaçamento 2×2 m. Anualmente foram medidos os diâmetros a 1,30 m do solo (*DAP*) e as alturas totais (*H*) das árvores, entre as idades de 7 a 16 anos. A base de dados foi dividida aleatoriamente em 70% para o ajuste dos modelos de regressão e treinamentos das *RNAs* e 30 % para validação dos métodos analisados. Na Tabela 1 são apresentadas as estatísticas descritivas relacionadas às variáveis dos povoamentos onde foram coletados os dados.

Tabela 1 - Estatísticas descritivas do povoamento de ipê felpudo

Variáveis	Min	Méd	Max	CV %
<i>DAP</i> (cm)	5,89	12,45	21,65	24,47
<i>H</i> (m)	5,50	8,44	13,00	16,11
<i>I</i> (anos)	7,00	10,98	16,00	25,50
<i>N</i> (árvores×parcela ⁻¹)	61,00	87,11	101,00	17,18
<i>Hd</i> (m)	8,75	10,15	12,31	11,76

Em que: *DAP* = diâmetro a 1,30 m do solo (cm); *H* = altura total (m); *I* = idade (anos); *N* = número de indivíduo; *Hd* = altura total dominante (m); Min = mínimo; Méd = média; Max = máximo; CV = coeficiente de variação.

2.2 Ajuste dos modelos de regressão e treinamento das redes neurais artificiais

Foram analisados quatro modelos hipsométricos: Curtis (1), Amateis *et al.* (1995) (2), Lenhart (1968) (3) e Logístico (4). Para o ajuste desses modelos, foi utilizado o *software* R, versão 3.3.0 (R CORE TEAM, 2017). Para o ajuste do modelo não linear (2) foi utilizado o algoritmo de Gauss-Newton (função *nls*).

$$\text{Log}H = \beta_0 + \beta_1 \frac{I}{DAP} + \varepsilon \quad (1)$$

$$\ln(H) = \beta_0 + \beta_1 \frac{I}{I} + \beta_2 \ln(Hd) + \beta_3 \ln G + \beta_4 \ln N + \beta_5 \frac{I}{DAP} + \varepsilon \quad (2)$$

$$\ln(H) = \beta_0 + \beta_1 \ln(Hd) + \beta_2 \frac{I}{I} + \beta_3 \ln(N \cdot DAP) + \beta_4 \ln \frac{I}{I \cdot DAP} + \varepsilon \quad (3)$$

$$H = \frac{\beta_0}{1 + e^{\left(\frac{\beta_1 - DAP}{\beta_2}\right)}} + \varepsilon \quad (4)$$

em que nas equações de (1) a (4): H = altura total da árvore (m); DAP = diâmetro a 1,30 m do solo (cm); Hd = altura média das árvores dominantes (m); I = idade (anos); N = número de indivíduos por hectare; ln = logaritmo neperiano; β_i = parâmetros dos modelos e ε = erro aleatório.

Além dos modelos de regressão, também foram utilizadas *RNAs* para estimar a altura total de árvores de ipê felpudo. Para o treinamento das *RNAs*, foram utilizados dois critérios de treinamento. Para o 1º critério, foram treinadas cinco redes que utilizaram como variáveis de entrada o DAP , a idade, a altura dominante e o número de árvores por hectare. No 2º critério, foram treinadas cinco redes utilizando apenas o DAP como variável de entrada. Selecionou-se, para cada critério, a rede que obteve o menor valor da raiz do quadrado médio do erro (*RQME*) e maior valor de correlação (r) como em Binoti *et al.* (2013b).

As *RNAs* treinadas foram do tipo *Multilayer Perceptron (MLP)*. A rede treinada foi configurada com uma camada de entrada, com número de neurônios igual ao número de variáveis preditoras; uma camada intermediária com oito neurônios; e uma camada de saída, com apenas um neurônio. A função de ativação utilizada nos neurônios foi sigmoide (Eq. 5).

$$\phi(x) = \frac{1}{1 + e^{-x}} \quad (5)$$

O treinamento das redes foi do tipo *Resilient Propagation*, não havendo taxa de aprendizagem estabelecida. Como critério de parada, foram considerados 3.000 ciclos de aprendizagem. Para o treinamento e a validação das *RNAs* foi utilizado o *software* NeuroForest® 3.3.

2.3 Avaliação da exatidão dos modelos de regressão e das redes neurais artificiais

A avaliação da exatidão dos modelos de regressão e das redes neurais artificiais se deu por meio das estatísticas Viés (V, Eq. 6), Média das Diferenças (MD, Eq. 7), Raiz do Quadrado Médio do Erro (RQME, Eq. 8). De acordo com o valor obtido na estatística em questão, foi feito um *ranking* conforme aplicado por Silva *et al.* (2012). Neste método de avaliação, são atribuídas notas aos valores obtidos de cada uma das estatísticas. Assim, foi atribuída nota 1 (um) para o modelo/RNA com menor valor absoluto da estatística, até a nota 6 (seis) para o de maior valor. Desta forma, foi selecionado o modelo com menor valor do somatório dessas estatísticas.

$$V = \frac{\sum_{i=1}^n y_i - \sum_{i=1}^n \hat{y}_i}{n} \quad V(\%) = \frac{V}{\bar{y}} \cdot 100 \quad (6)$$

$$MD = \frac{\sum_{i=1}^n |y_i - \hat{y}_i|}{n} \quad MD(\%) = \frac{MD}{\bar{y}} \cdot 100 \quad (7)$$

$$RQME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{n}} \quad RQME(\%) = \frac{RQME}{\bar{y}} \cdot 100 \quad (8)$$

em que nas equações de (6) a (8): y_i = altura total observada da i -ésima árvore (m); \hat{y}_i = altura total estimada da i -ésima árvore (m); n = número de árvores amostradas; \bar{y} = média das alturas totais (m).

Para as estatísticas V , MD e $RQME$, quanto mais próximo de zero, mais exato é o método avaliado de estimação de altura total. Além dessas estatísticas, foram utilizados os gráficos da dispersão dos erros (Eq. 9), em porcentagem, em função das alturas estimadas.

$$Erro(\%) = 100 \frac{y - \hat{y}}{y} \quad (9)$$

3 Resultados e discussão

3.1 Ajuste dos modelos de regressão e treinamento das redes neurais artificiais na estimação da altura total das árvores de ipê felpudo

Na Tabela 2 estão as estimativas dos parâmetros das equações de regressão testadas para estimar a altura total das árvores de ipê felpudo em um plantio puro em Linhares, ES. Verifica-se que apenas o modelo de Curtis apresenta todas as estimativas dos parâmetros significativas. No modelo de Amateis *et al.* (1995), os parâmetros relacionados à idade do povoamento (β_1) e ao número de árvores por hectare (β_4) apresentaram estimativas não significativas. Já para o modelo de Lenhart (1968), a interação de número de árvores por hectare e o DAP apresentou estimativa não significativa, além do intercepto.

Na Figura 1 é apresentado o gráfico de resíduos para os métodos de estimativa da altura total das árvores. Pode-se observar que, para todos os métodos avaliados, não houve tendência clara nas estimativas e a dispersão residual ficou, em sua maioria, contida no intervalo de $\pm 20\%$. Ao comparar com a variação das alturas totais observadas, verifica-se que o modelo de Curtis foi aquele que se diferenciou dos demais modelos de regressão e das RNAs. Ressalta-se que ao treinar a RNA com covariável, a variável número de árvores

por hectare não influenciou na relação hipsométrica do ipê felpudo, assim como nos modelos de regressão (Tabela 3).

Tabela 2 - Parâmetros dos modelos hipométricos ajustados para a estimativa de altura total das árvores de ipê felpudo em um plantio puro em Linhares, ES

Parâmetro	Curtis	Logístico	Amateis	Lenhart
β_0	1,125239*	80,365 ^{ns}	1,80310*	-0,40295 ^{ns}
β_1	-2,388767*	57,562 ^{ns}	0,16834 ^{ns}	0,88927*
β_2	-	20,977*	0,53200*	-1,57963*
β_3	-	-	0,31735*	0,08422 ^{ns}
β_4	-	-	0,05700 ^{ns}	0,29695*
β_5	-	-	2,76702*	-

* significativo a 5% de significância. ^{ns} não significativo a 5% de significância.

As estatísticas viés (V), média das diferenças (MD), raiz do quadrado médio do erro ($RQME$) e coeficiente de correlação (r) para os métodos avaliados de estimativa de altura são apresentadas na Tabela 2. Observa-se que o modelo genérico Amateis foi o mais exato, seguido da RNA com covariáveis e o modelo genérico Lenhart. O modelo Logístico e a RNA sem covariáveis apresentaram exatidão semelhante. Já o modelo de Curtis foi o de menor exatidão, assim como observado na Figura 1.

Em um estudo realizado por Mendonça *et al.* (2015b), analisando modelos tradicionais e genéricos para estimar a altura de árvores de *Pinus caribaea var. hondurensis*, também observaram que o modelo genérico Amateis foi o modelo mais exato. Já o modelo de Curtis, que neste trabalho foi o menos exato, apresentou resultados semelhantes ao estudo realizado por Mendonça *et al.* (2015b). Em um estudo realizado por Ribeiro *et al.* (2010) avaliando o desempenho de três modelos tradicionais e dois modelos genéricos para a estimativa de altura de árvores em plantios de *Eucalyptus sp.*, também detectaram que os modelos genéricos apresentaram os melhores resultados do que os modelos tradicionais, assim como em Mendonça *et al.* (2015a). Tal fato mostra que há um ganho de exatidão ao considerar outras variáveis além do DAP para estimar a altura total de árvores, principalmente em povoamentos com diferentes idades e densidades. Sendo assim, recomenda-se a utilização de variáveis como a altura dominante, índice de sítio e número de árvores por hectare, no ajuste de modelos para estimativas e previsões de altura de árvores.

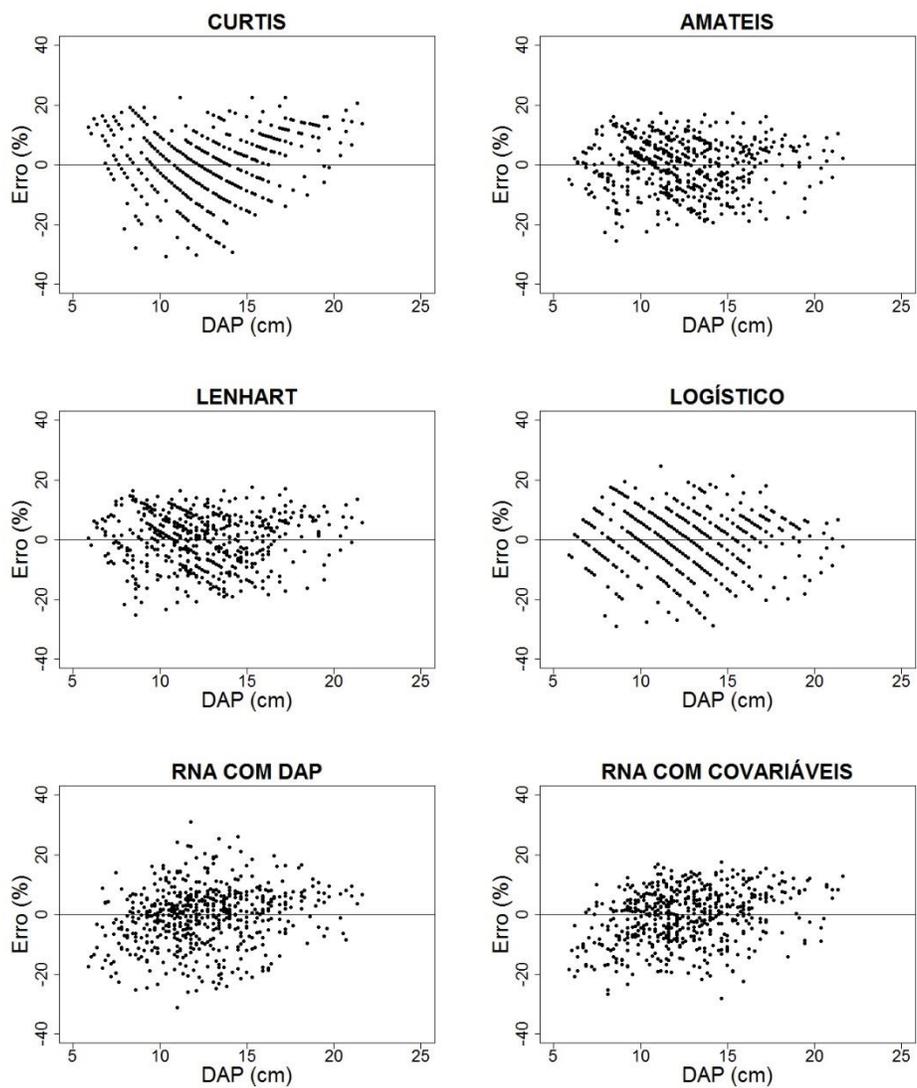


Figura 1 - Distribuição dos resíduos percentuais, em função do DAP, para os modelos hipsométricos e as RNAs.

Tabela 3 - Estatística viés (*V*), média das diferenças absolutas (*MD*), raiz do quadrado médio do erro (*RQME*) e coeficiente de correlação (*r*) para estimativa da altura total de ipê felpudo

Estatísticas	Curtis	Amateis	Lenhart	Logístico	RNA DAP	RNA COV
<i>V</i> (%)	0,54 (4)	0,37 (5)	0,37 (6)	$1,33 \cdot 10^{-3}$ (2)	$5,82 \cdot 10^{-4}$ (1)	0,17 (3)
<i>MD</i> (%)	7,97 (6)	6,95 (1)	7,07 (3)	7,22 (4)	7,42 (5)	7,06 (2)
<i>RQME</i> (%)	10,11 (6)	8,38 (1)	8,51 (2)	9,09 (5)	9,40 (4)	8,57 (3)
<i>r</i>	0,78 (6)	0,85 (1)	0,85 (2)	0,83 (4)	0,81 (5)	0,85 (3)
Total	22	8	13	15	15	11

O bom desempenho das *RNAs*, para a estimativa de altura das árvores, também foi encontrado por Binoti *et al.* (2013b), em que para árvores de eucalipto obtiveram coeficientes de correlação superiores a 0,99. Esses valores superiores de *r* encontrados por estes autores, em relação a este trabalho, pode ter ocorrido por se tratar de povoamentos clonais, que apresentam padrões de crescimento semelhantes. Além disso, utilizaram outras variáveis de entrada como o material genético e características do solo.

Özçelik *et al.* (2013) compararam *RNAs* com modelos mistos e genéricos para estimar a altura de árvores de zimbro na região sudoeste da Turquia. De acordo com esses autores, as redes se mostraram superiores aos demais modelos pela maior capacidade de generalização. Vendruscolo *et al.* (2015) avaliaram a estimação da altura de eucalipto pelo o modelo não linear de Gompertz e diferentes configurações de *RNAs*. Os autores encontraram valores de *RQME* muito próximos no treino (Gompertz: 9,46%, *RNA*: 9,34%) e na validação (Gompertz: 9,57%, *RNA*: 9,47%).

Binoti *et al.* (2013) analisaram o potencial do uso das *RNAs* para reduzir o número de alturas mensuradas no inventário florestal e, conseqüentemente, reduzir o seu custo de execução. Os autores concluíram que a medição da altura de 10% das árvores permitiu uma redução de 20% no tempo de execução dos inventários florestais, sem que houvesse perda da precisão das estimativas. Além disso, os autores sugerem que, uma vez obtida a *RNA* para estimar a altura, o próximo inventário pode ser realizado apenas com a medição do DAP e das alturas das árvores dominantes, que são necessárias para a classificação da capacidade produtiva.

Avaliando modelos lineares, não lineares e diferentes configurações de *RNAs* para estimar a altura de teca em quatro diferentes espaçamentos, Vendruscolo *et al.* (2017) concluíram que as redes foram superiores aos demais métodos, com *RQME* inferior a 10% em todos os casos.

Diante do exposto, fica evidente que a utilização das redes neurais artificiais pode ser uma alternativa viável para a estimação de variáveis dendrométricas, possibilitando uma maior precisão nas estimativas.

3.2 Validação métodos analisados na estimação da altura total das árvores de ipê felpudo

Na Figura 2 é apresentada a análise gráfica de resíduos para a validação dos métodos de estimação da altura total das árvores de ipê felpudo. Observa-se, também, que para os

dados de validação, todos os modelos e as RNAs não apresentaram tendência clara nas estimativas e a maior parte dos resíduos ficou contida no intervalo de $\pm 20\%$.

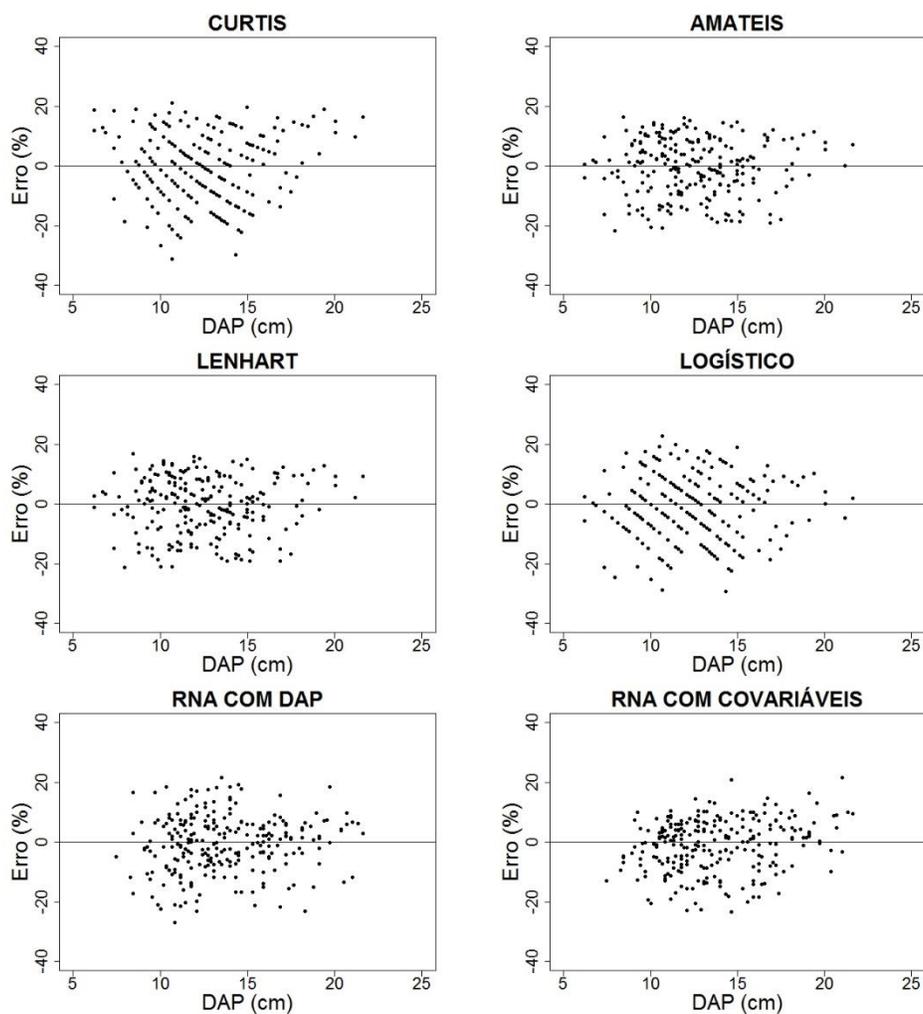


Figura 2 - Análise gráfica dos resíduos para os dados de validação.

As estatísticas viés (V), média das diferenças (MD), raiz do quadrado médio do erro ($RQME$) e coeficiente de correlação (r) dos métodos avaliados para a estimativa de altura dos dados de validação são apresentadas Tabela 3. Observa-se que o modelo genérico de Amateis e a RNA em que foi utilizada as covariáveis apresentaram maior exatidão, assim como encontrada para os dados de ajuste (Tabela 2). Considerando os métodos analisados, a maior exatidão encontrada foi para a RNA com covariáveis. Nota-se que a diferença de exatidão entre o melhor modelo hipsométrico (Amateis) e a melhor RNA (com covariáveis) foi de 0,37 pontos percentuais (4,31%).

Tabela 3 - Estatística viés (*V*), médias das diferenças absolutas (*MD*), raiz do quadrado médio do erro (*RQME*) e coeficiente de correlação (*r*) para estimação da altura total de ipê felpudo com os dados de validação

Estatísticas	Curtis	Amateis	Lenhart	Logístico	RNA DAP	RNA COV
<i>V</i> (%)	0,58 (6)	0,40 (4)	0,41 (5)	$-2,36.10^{-3}$ (2)	$-2,29.10^{-5}$ (1)	-0,23 (3)
<i>MD</i> (%)	8,77 (6)	7,36 (2)	7,41 (3)	8,26 (5)	7,51 (4)	7,07 (1)
<i>RQME</i> (%)	10,90 (6)	8,95 (2)	9,01 (3)	10,26 (5)	9,42 (4)	8,58 (1)
<i>r</i>	0,75 (6)	0,84 (2)	0,84 (3)	0,78 (5)	0,82 (4)	0,84 (1)
Total	24	10	14	17	13	6

Conclusões

A estimação da altura total de árvores com utilização de *RNAs* com covariáveis e modelos de regressão genéricos apresentaram mais exatos se comparados com as estimativas geradas pelo ajuste dos modelos tradicionais e a das *RNAs* utilizando somente do *DAP* como variável preditora.

Os modelos de regressão e as redes neurais artificiais são alternativas viáveis para estimar da altura da espécie em estudo.

Agradecimentos

A Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela concessão da bolsa de estudos e aos dois revisores e editores pelos comentários e sugestões.

MENDONÇA, A. R.; SILVA, J. C.; AOZANI, T. S.; SILVA, E. R.; SANTOS, J. S.; BINOTI, D. H. B.; SILVA, G. F. Estimation of the total height of ipê felpudo trees using regression models and artificial neural networks. *Rev. Bras. Biom.*, Lavras. v.36, n.1, p.128-139, 2018.

- **ABSTRACT:** *The aim of this work was to evaluate the accuracy of total height estimation with regression models and artificial neural networks (ANNs) in a pure ipê felpudo plantation. We adjusted four regression models and trained Multilayer Perceptron artificial neural networks, with two training criteria: considering the input variables DBH, age and dominant height, and only DBH. The ANNs and regression models were evaluated by the statistical analysis of bias (V), Mean of Absolute Differences (MD), Root Mean Square Error (RMSE) and Correlation Coefficient (r). The estimation of the total height of the trees with generic regression models and ANN with covariates presented a greater accuracy when compared to the regression models and ANN with DBH only.*
- **KEYWORDS:** *Artificial intelligence; height-diameter relationship; accuracy.*

Referências

- AMATEIS, R. L.; BURKHART, H.E; ZHANG, S. *Trulob: Tree Register Updating for Loblolly Pine: an individual tree growth and yield model for managed loblolly pine plantations*. Lacksburg: Virginia Polytechnic Institute and State University, Department of Forestry, Loblolly Pine Growth and Yield Cooperative, 1995.
- BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M. S.; LEITE, H. G. Redução dos custos em inventário de povoamentos equiâneos. *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, Recife, v.8, p.125-129, 2013a.
- 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.4, n.37, p.639-645, 2013b.
- CAMPOS, B. P. F.; SILVA, G. F.; BINOTI, D. H. B.; MENDONÇA, A. R. Predição da altura total de árvores em plantios de diferentes espécies por meio de redes neurais artificiais. *Pesquisa Florestal Brasileira*, Colombo, v.36, n.88, p.375-385, 2016.
- CURTIS, R. O. Height diameter and height diameter age equations for second growth Douglas-fir. *Forest Science*, Bethesda, v.4, n.13, p.365-375, 1967.
- HAYKIN, S. *Redes neurais: princípios e prática*. 2.ed. Porto Alegre: Bookman, 2001. 900p.
- LENHART, J. *Yield of old-field loblolly pine plantations in the Georgia piedmont*. 1968. Tese (Doutorado) – University of Georgia, Georgia, 1968.
- MARTINS, E. R.; BINOTI, M. L. M. S.; LEITE, H. G.; BINOTI, D. H. B.; DUTRA, G. C. Configuração de redes neurais artificiais para estimação da altura total de árvores de eucalipto, *Revista Brasileira de Ciências Agrárias*, Recife, v.11, n.2, p.117-123, 2016.
- MENDONÇA, A. R.; CARVALHO, S. P. C.; CALEGARIO N. Modelos hipsométricos generalizados mistos na predição da altura de *eucalyptus* sp. *Cerne*: Lavras, v.21, n.1, p.107-115, 2015a.
- MENDONÇA, A. R.; CORANDIN, C. M.; PACHECO, G. R.; VIEIRA, G. C.; ARAÚJO, M. S.; INTERAMNENSE, M. T. Modelos hipsométricos tradicionais e genéricos para *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. *Pesquisa Florestal Brasileira*, Colombo, v.81, n.35, p.47-54, 2015b.
- NICODEMO, M. L. F.; PORFIRIO-DA-SILVA, V.; SANTOS, P. M.; VINHOLIS, M. M. B.; FREITAS, A. R.; CAPUTTI, G. Desenvolvimento inicial de espécies florestais em sistema silvipastoril na Região Sudeste. *Pesquisa Florestal Brasileira*, Colombo, v.60, n.1, p.89-92. 2009.
- NICOLETTI, M. F.; SOUSA, K.; SILVESTRE, R.; FRANÇA, M. C.; ROLIM, F. A. Hipsometric Rate for *Pinus taeda* L. at different stages of the cutting cycle. *Floresta e Ambiente*, Seropédica, v.23, n.1, p.80-89, 2016.
- 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.

R CORE TEAM. *R: A language and environment for statistical computing*. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. 2017.

RIBEIRO, A.; FERRAZ, F. A. C.; MELLO, J. M.; ZÉLIA, F. M.; MARTINS, L. P. M.; SOARES, S. J. R. Estratégias e metodologias de ajuste de modelos hipsométricos. *Cerne*, Lavras, v.16, n.1, p.22-31, 2010.

SCHNEIDER, P. R. *Introdução ao manejo florestal*. Santa Maria: FACOS UFSM, 1993. 348p.

SILVA, G. F.; CURTO, R. A.; SOARES, C. P. B.; PIASSI, L. C. Avaliação de métodos de medição de altura em florestas naturais. *Revista Árvore*, Viçosa-MG, v.36, n.2, p.341-348, 2012.

SOUZA, C. C. *Modelo de crescimento, com variáveis ambientais, para o Ipê felpudo com diferentes espaçamentos*. 2004. 96f. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais) – Escola Superior de Agricultura Luiz de Queiroz, Universidade de São Paulo, Piracicaba-SP, 2004.

SOUZA, H. S.; FILHO, A. A. T.; VENDRUSCOLO, D. G. S.; CHAVES, A. G. S.; MOTTA, A. S. L. Modelos hipsométricos para eucalipto em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta. *Nativa*, Sinop, v.4, n.1, p.11-14, 2016.

VENDRUSCOLO, D. G. S.; CHAVES, A. G. S.; MEDEIROS, R. A.; SILVA, R. S.; SOUZA, H. S.; DRESCHER, R.; LEITE, H. G. Estimativa da altura de árvores de *Tectona grandis* L.f. utilizando regressão e redes neurais artificiais. *Nativa*, Sinop, v.5, n.1, p.52-58, 2017.

VENDRUSCOLO, D. G. S.; DRESCHER, R.; SOUZA, H. S.; MOURA, J. P. V. M.; MAMORÉ, F. M. D.; SIQUEIRA, T. A. S. Estimativa da altura de eucalipto por meio de regressão não linear e redes neurais artificiais. *Revista Brasileira de Biometria*, São Paulo, v.4, n.33, p.556-569, 2015.

VIANA, V. M.; MAURÍCIO, R. M.; MATTA-MACHADO, R.; PIMENTA, I. A. Manejo de la regeneración natural para la formación de sistemas agroflorestales ganaderos. *Agroforesteria en las Américas*, Catie, v.9, n.33, 2002.

Recebido em 05.07.2016

Aprovado após revisão em 25.08.2017