

**UNIVERSIDADE FEDERAL DO RECÔNCAVO DA BAHIA**

**CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS, AMBIENTAIS E BIOLÓGICAS**

**BACHARELADO EM ENGENHARIA FLORESTAL**

**POTENCIAL DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS E REGRESSÃO NA  
ESTIMATIVA DE VOLUME DE ESPÉCIES NATIVAS**

**LUCAS MOTA AMORIM**

Cruz das Almas, Fevereiro de 2018

LUCAS MOTA AMORIM

POTENCIAL DE REDES NEURAS ARTIFICIAIS E REGRESSÃO NA  
ESTIMATIVA DE VOLUME DE ESPÉCIES NATIVAS

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao Colegiado do Curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia - UFRB pelo estudante LUCAS MOTA AMORIM como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia Florestal, sob a orientação do Prof. ELTON DA SILVA LEITE.

Orientador: Prof. Drº Elton da Silva Leite

Cruz das Almas, Fevereiro de 2018

POTENCIAL DE REDES NEURAIS ARTIFICIAIS E REGRESSÃO NA  
ESTIMATIVA DE VOLUME DE ESPÉCIES NATIVAS

**LUCAS MOTA AMORIM**

Trabalho de conclusão de curso apresentado ao  
Colegiado do Curso de Engenharia Florestal da  
Universidade Federal do Recôncavo da Bahia -  
UFRB pelo estudante LUCAS MOTA AMORIM  
como requisito parcial para obtenção do grau de  
Bacharel em Engenharia Florestal

Aprovado em: 31/01/2018

Comissão examinadora:

Prof. Dr. Elton da Silva Leite / Professor Adjunto/ UFRB  
(Orientador)



Prof. Dr. Liniker Fernandes da Silva / Professor/ UFRB  
(Co-orientador)



Prof. Dr. Deoclides Ricardo de Souza/ Professor Adjunto/ UFRB



## AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por ter me abençoado todos esses anos e me concedido à benção de cursar um ensino superior e obter o diploma de Engenheiro.

Aos meus pais Carlos Francisco e Selma Amorim, por terem me apoiado durante toda minha trajetória de vida, me ajudando em tudo e não deixando eu desistir em momento algum do meus sonhos.

A minha esposa Luciana que apoiou nos bons e maus momentos, concedendo todo seu apoio.

A minha filha Maria Luisa, que é uma benção que Deus colocou na minha vida e me transformou em um homem mais responsável, integro e batalhador.

A minha família: Irmãs, avós, avô, tios, tias, primas e primos, que sempre estiveram presentes na minha vida, fazendo parte da minha história.

Aos meus amigos irmãos Everaldo Pereira, Jônathan Fontoura, Luise Torres e Júlio Neto, pelo apoio e demonstração de carinho e amizade construída durante todos esses 6 anos.

Aos meus amigos da turma 2012.1, que tem uma parcela de contribuição nessa jornada.

Ao curso de Engenharia Florestal da Universidade Federal do Recôncavo da Bahia, pela minha formação.

Ao meu orientador Prof. Dr. Elton Silva Leite, pela orientação e apoio dado durante todo o curso.

Aos Professores Deoclides, Liniker, José Mauro e Andrea Mendonça pelas orientações e conselhos.

Aos professores que compõem o Curso de Engenharia Florestal no qual tive a oportunidade de adquirir conhecimentos;

Aos amigos do projeto de pesquisa pela ajuda e pelo compartilharam conhecimento comigo durante esses 5 anos de projeto.

Aos demais aqui não citados que me ajudaram diretamente e indiretamente;

Muito obrigado!

## Sumário

AGRADECIMENTOS .....	iv
Resumo .....	i
Abstract.....	ii
1. Introdução.....	3
2. Materiais e Métodos .....	4
2.1 Caracterização da área de estudo.....	4
2.2 Espécies avaliadas e coleta de dados .....	4
2.3 Modelagem volumétrica por regressão.....	5
2.4 Modelagem volumétrica por RNAs.....	6
3. Resultados e Discussão.....	7
3.1 Regressão.....	7
3.2 Redes Neurais Artificiais.....	12
3.3 Comparativo entre a regressão e RNAs.....	16
4. Referências Bibliográficas.....	18

## Resumo

A compreensão do potencial produtivo madeireiro de espécies nativas contribui para o manejo sustentável. Desta forma, objetivou-se com este trabalho avaliar o potencial de redes neurais artificiais e regressão na estimativa de volume de madeira em povoamentos homogêneos de *Anadantera macrocarpa*, *Genipa americana* e *Mimosa caesalpinifolia*. Os métodos de regressão e de redes neurais artificiais apresentaram aplicabilidade para a estimativa do volume individual dos povoamentos homogêneos em diferentes espaçamentos e aos sete anos de idade. O modelo de regressão de Spurr obteve melhores resultados estatísticos e dispersão dos erros não tendenciosos para as espécies *Anadantera macrocarpa* e *Genipa americana*, já o modelo proposto por Shumacher e Hall obteve maior precisão de volumes da espécie *Mimosa Caesalpinifolia*. As RNAs com dois neurônios na camada intermediária obtiveram os melhores ajustes para as espécies. As redes neurais artificiais são recomendadas para estimar os volumes individuais das espécies avaliadas e evidenciaram maior precisão em relação à regressão na estimativa de volume.

Palavras-chaves: Volume, Regressão, RNAs.

## **Abstract**

Understanding the productive potential of native species contributes to sustainable management. The objective of this work was to evaluate the potential of artificial neural networks and regression in the estimation of wood volume in homogenous stands of *Anadantera macrocarpa*, *Genipa americana* and *Mimosa caesalpinifolia*. The regression methods and artificial neural networks presented applicability for estimating the individual volume of homogeneous stands at different spacings and at seven years of age. The Spurr regression model obtained better statistical results and dispersion of non-biased errors for the species *Anadantera macrocarpa* and *Genipa americana*, whereas the model proposed by Shumacher and Hall obtained greater precision of the volumes of the species *Mimosa Caesalpinifolia*. The RNAs with two neurons in the middle layer obtained the best adjustments for the species. Artificial neural networks are recommended to estimate the individual volumes of the evaluated species and showed greater precision in relation to the regression in the volume estimation.

Key words: Volume, Regression, RNAs.

## 1. Introdução

A estimativa do volume de madeira de um povoamento normalmente é realizada por meio de inventário florestal, utilizando-se um conjunto de dados como base para se realizar inferências sobre as variáveis de altura, volume e número de árvores por hectare (MACHADO *et al.*, 2000). Na literatura os trabalhos relacionados com volumetria em povoamentos de espécies nativas ainda são escassos e necessita conhecer o manejo, planejamento e sustentabilidade da produção.

Diversas espécies nativas tem potencial econômico produtivo em sua localidade de ocorrência natural. Algumas dessas espécies podem ser citadas, como: *Anadenanthera macrocarpa* Bent., destacando-se pelo uso madeireiro no mercado pelos mais diferentes ramos, desde a construção rural até produção de lenha de carvão (CARVALHO, 2003). A *Mimosa caselpinifolia* Bent. destaca-se pela produção de madeira para estacas, fonte energética pelo seu alto poder calorífico, forrageiro para bovinos, caprinos e ovinos e em programas de recuperação de áreas degradadas (LORENZI, 1992; RIBASKI *et al.*, 2003; VIEIRA *et al.*, 2005; MAIA, 2004; BARBOSA, 2008). A madeira de *Genipa americana* L. é utilizada na produção de diversos produtos, como peças curvadas, carpintaria em geral, construção civil e naval e sucos e bebidas (LORENZI, 2002).

O potencial econômico madeireiro destas espécies é mensurado a partir de estimadores volumétricos. A regressão pode ser amplamente utilizada nas estimativas e prognoses da produção madeireira, constituindo um procedimento eficiente (SANTANA & ENCINAS, 2004; MACHADO *et al.*, 2002). Entretanto, estas espécies apresentam muitas bifurcações e irregularidades que dificultam a determinação de volume, sendo necessário o ajuste de equações específicas para cada situação de povoamento (BINOTI *et al.*, 2013).

As redes neurais artificiais (RNA's) surgem como novas tecnologias aplicadas às estimativas de volumes de madeira (GORGENS *et al.*, 2009; LEITE *et al.*, 2010). O uso de ferramentas de inteligência artificial na modelagem de crescimento e produção ainda é um assunto novo e pouco explorado no Brasil. Em Ciência Florestal, diversos tópicos podem ser potencialmente tratados por RNAs, entre eles a modelagem do volume de árvores, relações hipsométricas e equações de TAPER, obtendo resultados expressivos (GARBER 2003; BINOTI *et al.*, 2013; BINOTI *et al.*, 2012a; BINOTI *et al.*, 2012b; BINOTI, 2010; LEITE *et al.*, 2010; SILVA *et al.*, 2009; DIAMANTOPOULOU, 2005).



Pela necessidade de conhecimentos volumétricos das espécies *Anadantera macrocarpa* Bent., *Genipa americana* L. e *Mimosa caesalpinifolia* Bent., objetivou-se com este trabalho avaliar o potencial de redes neurais artificiais e regressão na estimativa de volume de espécies nativas.

## 2. Materiais e Métodos

### 2.1 Caracterização da área de estudo

O presente estudo foi desenvolvido na Universidade Federal do Recôncavo da Bahia no Campus experimental da cidade de Cruz das Almas – BA, em área composta por três povoamentos de espécies nativas.

A área apresenta clima tropical quente com chuvas de inverno (As) segundo a classificação de (KÖPPEN, 1948). O regime de chuvas possui uma média de 1224 mm por ano, sendo o período entre março e junho de maior incidência de chuvas. Possui cerca de 80% de umidade relativa do ar e a temperatura média anual de 24,5°C. O solo foi classificado de acordo com o sistema brasileiro de classificação dos solos, como Latossolo Amarelo Álico Coeso (EMBRAPA, 2006).

### 2.2 Espécies avaliadas e coleta de dados

Os dados foram coletados de três povoamentos homogêneos de espécies nativas: 1) *Anadantera macrocarpa* (Angico vermelho), com 384 indivíduos distribuídos nos espaçamentos 6,0x1,5m, 6,0x2,0m, 6,0x2,5m e 6,0x3,0m; 2) *Genipa americana* (Jenipapo) com 500 indivíduos distribuídos nos espaçamentos 3,0x1,5m, 3,0x2,0m, 3,0x2,5m, 3,0x3,0m, 3,0x3,5m; e 3) *Mimosa caesalpinifolia* (Sabiá) com 720 indivíduos distribuídos nos espaçamentos 3,0x1,5m, 3,0x2,0m, 3,0x2,5m, 3,0x3,0m, 3,0x3,5m.

As mudas foram produzidas a partir de sementes de árvores matrizes e apresentava 0,25 a 0,30 m de altura. O preparo foi o plantio direto, a partir de covas de 0,30 x 0,30 x 0,30 m adubada com 120g de superfosfato simples. A adubação de cobertura foi realizada aos 90 dias após o plantio com 120 g de NPK 20-0-20 por planta. Foram realizados os tratos culturais de controle de formigas periodicamente e no controle das plantas daninhas, foram realizadas três capinas manuais nas linhas de plantio e três gradagens nas entrelinhas.

A mensuração de altura e circunferência à 1,3 m de altura foram obtidas por mira e fita métrica, respectivamente. O diâmetro a 1,3 m de altura (DAP) foi obtido partir da circunferência a partir das classes selecionadas.

As classes de diâmetros foram determinadas pelo método prático, visando obter a quantidade necessária de árvores a serem cubadas para cada povoamento. Para definir o número e amplitude de classes define-se primeiramente a classe central e a partir dela são obtidas as demais (Equação 1).

$$LI = M - (X * DP)$$

$$LS = M + (X * DP) \quad \text{Equação (1)}$$

Onde: LI= Limite Inferior; LS= Limite Superior; X= valores aleatórios que variam de 0 a 10; DP= Desvio Padrão; M= média dos diâmetros.

A cubagem foi realizada pelo método não destrutiva, utilizando a equação de Smalian (Equação 2) para a determinação dos volumes individuais, utilizando distâncias de 1,0 metro de comprimento para cada secção. Para o povoamento de *Genipa americana* e *Mimosa caesalpinifolia* foram cubadas 25 árvores, já para o *Anadantera macrocarpa* foram cubadas 45 árvores.

$$V = \frac{G_1 + G_2}{2} \times L \quad \text{Equação (2)}$$

Em que: V= volume da secção pelo método Smalian (m<sup>3</sup>); G<sub>1</sub>= área seccional da base (m<sup>2</sup>); G<sub>2</sub>= Área seccional do topo (m<sup>2</sup>); L= comprimento da secção (m).

### 2.3 Modelagem volumétrica por regressão

A modelagem volumétrica por regressão foi realizada com base nos cinco modelos lineares mais utilizados (SOARES *et al.*, 2011; SILVA *et al.*, 2016; ROCHA *et al.*, 2015) no qual apresentam como variável dependente o volume (V) em função das variáveis independentes, diâmetro a 1,3 m do nível do solo (DAP) e/ou altura total (H) (Tabela 1).

**Tabela 1.** Modelos volumétricos testados por regressão.

<b>Autor</b>	<b>Modelo</b>
Spurr	$V = \beta_0 + \beta_1 DAP^2 * HT + \varepsilon$
Shumacher e Hall (Log)	$\ln(V) = \beta_0 + \beta_1 \ln(H) + \beta_2 \ln(DAP) + \varepsilon$
Brenac	$\ln(V) = \beta_0 + \beta_1 \ln(DAP) + \beta_2 \left(\frac{1}{DAP}\right) + \varepsilon$
Hush	$\ln(V) = \beta_0 + \beta_1 \ln(DAP) + \varepsilon$
Hohenald-Krenm	$V = \beta_0 + \beta_1 DAP + \beta_2 DAP^2 + \varepsilon$

Onde: V= Volume;  $\beta_i$  = coeficientes dos modelos; DAP = diâmetro com casca a 1,30 m do nível do solo (cm); H = altura total (m); Ln = Logaritmo neperiano;  $\varepsilon$ = erro da estimativa.

As equações foram ajustadas utilizando o software EXCEL. Para a seleção das equações, as estatísticas consideradas foram: coeficiente de determinação ( $R^2$ ) no qual os melhores valores foram os mais próximos de 100%; raiz quadrada do erro médio (RMSE%) em que os menores percentuais apresentam melhores estimativas; e distribuição gráfica de resíduos para verificar se os modelos selecionados possuem homogeneidade na distribuição residual.

#### 2.4 Modelagem volumétrica por RNAs

A modelagem de redes neurais artificiais (RNAs) foi obtida pelas etapas de treino, teste e validação estimadas por meio do programa STATISTICA 10.0. O treinamento foi executado em dois métodos distintos.

No primeiro método as RNAs foram treinadas separadamente para cada espécie em estudo, a entrada de dados foi realizada através da variável alvo, obtida no processo de cubagem (volume), e as variáveis numéricas DAP e altura. O banco de dados foi dividido aleatoriamente, destinando 70% dos dados para treino, 15% para a etapa de teste e 15% para validação das RNAs. A camada de entrada foi constituída por dois neurônios, sendo um neurônio para cada variável numérica preditora. As redes foram constituídas de ½ ou 1 camada oculta para cada variável numérica, em que o número de neurônios nessa camada foi igual a um ou dois, logo, a arquitetura da rede foi 2-2-1 e 2-1-1, como função de ativação utilizou-se os modelos logístico e exponencial.

Já o segundo método treinou-se uma única RNA, cujo objetivo de estimar o volume de todas as espécies trabalhadas e foi adicionado uma variável categórica na entrada dos dados

composta pelas espécies. Devido a adição da variável categórica, houve mudança na arquitetura da RNA, sendo cinco neurônios na camada de entrada, um ou dois para a camada intermediária e uma para a saída (volume).

Por meio das RNAs foi possível realizar o treinamento para diversas espécies em um único modelo, vantagem que as RNAs apresenta em relação a regressão, que, geralmente, as equações devem individualizadas para cada espécie, clone, povoamento ou sítio produtivo (BINOTI et al., 2013).

Treinou-se 200 redes do tipo perceptrons de múltiplas camadas, comumente conhecidas como MLP (Multilayer Perceptron). A sua notoriedade fundamenta-se no fato de ser a generalização de formas, traçados e padrões a sua principal aplicação.

As quatro melhores RNAs foram escolhidas com base nos seguintes fatores: correlação entre o volume observado, no qual descreve o comportamento entre o volume real em função do comportamento do volume estimado pelas redes; gráfico de dispersão de resíduos em função do volume estimado, que mostra a existência ou não tendenciosidade nas estimativas e raiz quadrada do erro médio (RMSE%), em que menores percentuais apresentam melhores estimativas.

### **3. Resultados e Discussão**

#### **3.1 Regressão**

Para a espécie *Anadanteria macrocarpa*, os modelos propostos por Spurr e Hohenald-Krenm apresentaram melhores ajustes e as equações de Shumacher e Hall, Brenac e Hush obtiveram resultados de  $R^2$  e RMSE % foram similares (tabela 2). O modelo de Spurr apresentou melhores ajustes para a espécie *Genipa americana*, as demais equações obtiveram elevados valores de raiz quadrada do erro médio (RMSE %), chegando próximos a 50%. O modelo de Shumacher e Hall apresentou melhores ajustes para a espécie *Mimosa caesalpinifolia* e os outros modelos apresentaram baixos valores de coeficiente de determinação ( $R^2$ ) e valores acima de 40% de raiz quadrada do erro médio (RMSE %).

**Tabela 2.** Coeficientes estimados e estatísticas de precisão das equações volumétricas ajustadas para as espécies *Anadantera macrocarpa*, *Genipa americana* e *Mimosa caesalpinifolia* aos sete anos de idade, sobre diferentes espaçamentos no município de Cruz das Almas, Bahia.

Modelo	$\beta_0$	$\beta_1$	$\beta_2$	R <sup>2</sup> %	RMSE (%)
<i>Anadantera macrocarpa</i> Bent.					
Spurr	0,01176 (0,01 > p)	0,00003 (0,08)		87,9	31,56
Shumacher e Hall (Log)	-8,60458 (0,01 > p)	0,45913 (0,18)	1,80458 (0,01 > p)	82,8	29,83
Brenac	-8,26207 (0,01 > p)	1,95163 (0,01 > p)	-0,16443 (0,926)	79,8	31,11
Hush	-8,33343 (0,01 > p)	1,9723 (0,01 > p)		80,6	30,99
Hohenald-Krenm	0,0058 (0,702)	-0,00098 (0,63)	0,00026 (0,01 > p)	88,6	30,38
<i>Genipa americana</i> L.					
Spurr	0,00029 (0,566)	0,00002 (0,01 > p)		86,2	41,88
Shumacher e Hall (Log)	-9,7054 (0,01 > p)	1,70072 (0,01 > p)	1,0821 (0,01 > p)	79,9	44,2
Brenac	-9,6727 (0,01 > p)	2,14012 (0,01 > p)	-2,3189 (0,402)	61,8	51,39
Hush	-11,069 (0,01 > p)	2,65894 (0,01 > p)		75,4	47,83
Hohenald-Krenm	0,00051 (0,752)	-0,0003 (0,338)	0,0001 (0,01 > p)	80	49,64
<i>Mimosa caesalpinifolia</i> Bent.					
Spurr	0,00029 (0,01 > p)	0,00002 (0,118)		10,3	41,88
Shumacher e Hall (Log)	-9,70542 (0,01 > p)	1,70072 (0,01 > p)	1,0821 (0,756)	60,2	44,2
Brenac	-9,67272 (0,967)	2,14012 (0,296)	-2,3189 (0,085)	25,3	51,39
Hush	-11,0693 (0,01 > p)	2,65894 (0,01 > p)		30,1	47,83
Hohenald-Krenm	0,00051 (0,605)	-0,00031 (0,046)	0,00011 (0,089)	22,9	49,64

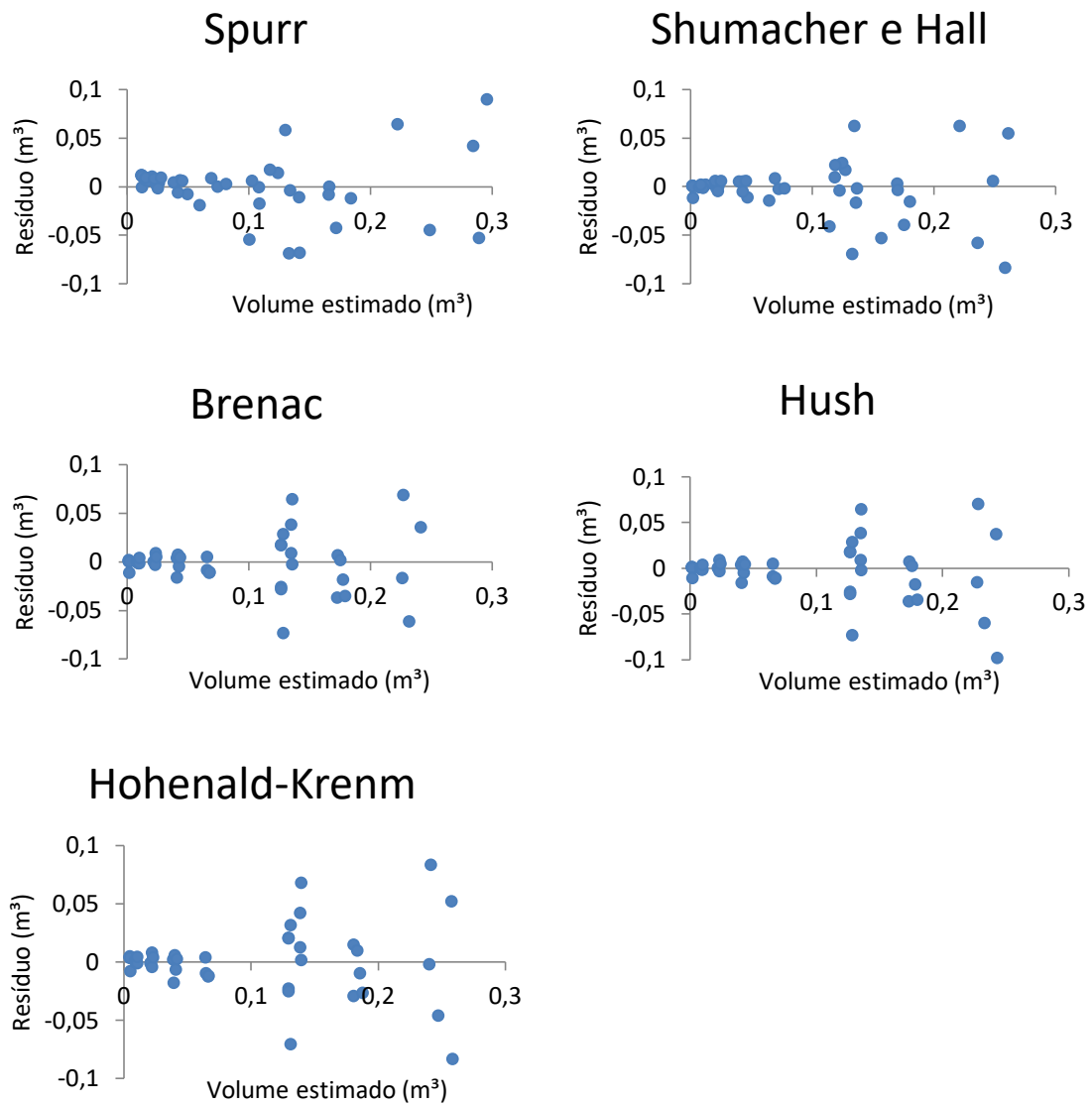
Legenda: (R<sup>2</sup>)=Coeficiente de Determinação; (RMSE %)=Raiz Quadrada do erro médio;  $\beta_i$ = Coeficientes estimados; Valores entre parênteses representam o nível de significância do parâmetro ajustado.

Rocha *et al.* (2015), Silva *et al.* (2016), Mazzonetto *et al.* (2012) e Melo *et al.* (2013), em estudos com equações volumétricas para a espécie *Genipa americana*, *Khaya ivorensis*, *P. taeda* e *P. caribaea*, respectivamente, em povoamento homogêneo, concluíram que o modelo de Spurr obteve melhores ajustes para volume, com pequena variação e menores tendências. Estes resultados foram similares para as espécies *Genipa americana* e *Anadantera macrocarpa*, evidenciando valores de  $R^2$  próximos aos encontrados. Entretanto, resultados diferentes foram estimados para *Mimosa caesalpinifolia*, obtendo baixos valores e apenas um modelo com  $R^2$  acima de 50%, explicado pela elevada quantidade de bifurcações existentes.

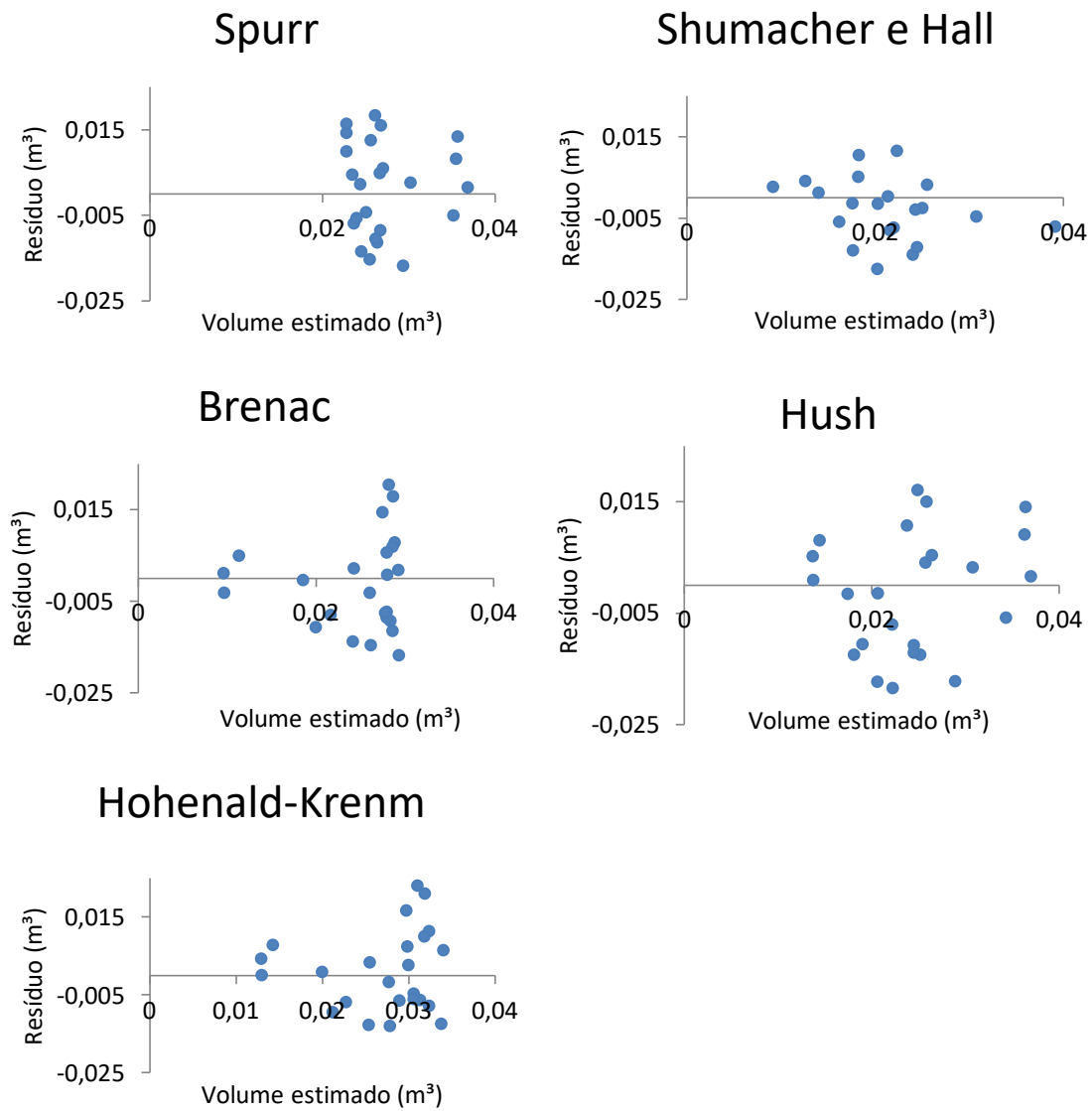
Para os modelos das espécies *Anadantera macrocarpa* e *Genipa americana*, não verificou relação entre os valores de  $R^2$  e os valores de RMSE%, embora seja comum verificar correlação entre estas estatísticas, no qual o elevado desempenho de um fator implica diretamente na melhoria do outro (BARROS *et al.*, 2002). De forma semelhante ao observado no trabalho de (SCOLFORO *et al.*, 2004). Este fato pode evidenciar características arquitetônicas diferentes entre as espécies quando estimadas pela modelagem de regressão.

As análises de distribuição residual de *Anadantera macrocarpa* (Figura 1), *Mimosa caesalpinifolia* (Figura 2) e *Genipa americana* (Figura 3) mostraram que todos modelos obtiveram dispersões sem tendenciosidade. Apesar das irregularidades na forma dos fustes, resultados similares aos observados por Silva *et al.* (2016) para a espécie *Khaya ivorensis*.

Para a espécie *Mimosa caesalpinifolia* o modelo proposto por Hush obteve maior uniformidade para a distribuição dos resíduos. Encinas *et al.* (2008), em determinado estudo no bioma cerrado, um dos locais de ocorrência natural da espécie, ajustando modelos para 49 espécies do bioma, concluiu que modelo volumétrico proposto por Rezende *et al.* (2006) obteve dispersão homogênea dos resíduos, descrevendo que os indivíduos arbóreos possuem concentrações de biomassa bem próximas visualizadas através da distribuição gráfica dos resíduos.

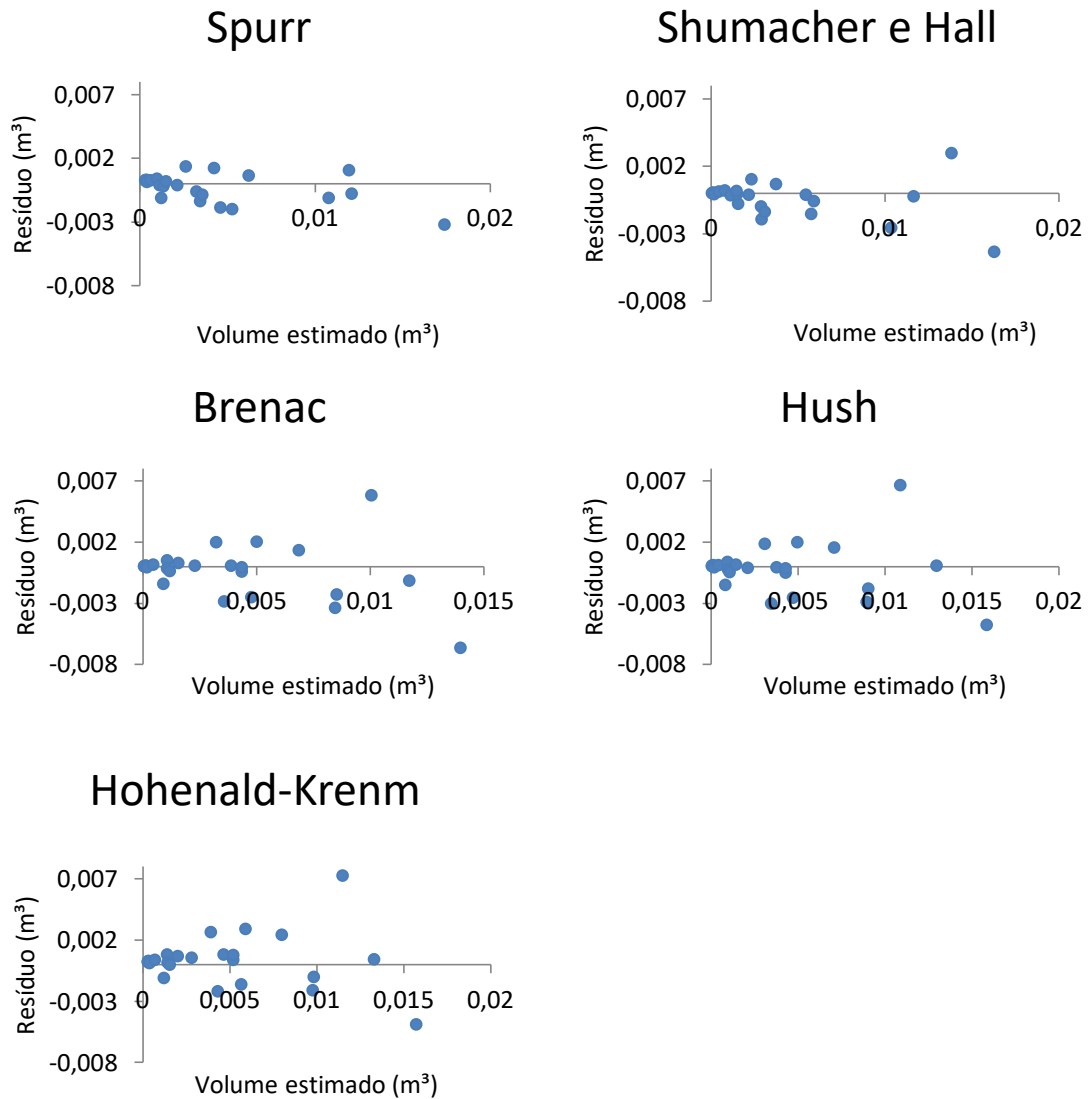


**Figura 1** - Distribuição residual em função do volume estimado das equações volumétricas de *Anadartera macrocarpa* aos sete anos de idade.



**Figura 2** - Distribuição residual em função do volume estimado das equações volumétricas de *Mimosa caesalpinifolia*, aos sete anos de idade.





**Figura 3** - Gráfico de distribuição residual em função do volume estimado das equações volumétricas de *Genipa americana* aos sete anos de idade.

### 3.2 Redes Neurais Artificiais

Todas as RNAs obtiveram resultados estatísticos de correlação e Raiz Quadrada do erro médio (RMSE %) aceitáveis para a estimativa dos volumes individuais do povoamento de *Anadantera macrocarpa*, *Genipa americana*, *Mimosa caesalpinifolia* (Tabela 3), resultados similares ao observado por (SILVA *et al.*, 2009) ajustando RNAs para clones de eucalipto.

**Tabela 3** – Redes neurais artificiais (RNAs) selecionadas para estimar o volume individual de espécies *Anadantera macrocarpa*, *Genipa americana*, *Mimosa caesalpinifolia*.

<i>Anadantera macrocarpa</i>							
RNAs	Arquitetura	Coeficiente de Correlação %			RMSE%		
		Treino	Teste	Validação	Treino	Teste	Validação
1	MLP 2-2-1	93,8	96,7	99,6	29,33	17,39	12,52
2	MLP 2-2-1	93,8	96,9	99,6	29,36	17,25	12,50
3	MLP 2-2-1	93,8	96,4	99,7	29,34	17,46	12,90
4	MLP 2-1-1	93,8	97,0	99,6	29,44	17,46	12,86

<i>Genipa americana</i>							
RNAs	Arquitetura	Correlação %			RMSE%		
		Treino	Teste	Validação	Treino	Teste	Validação
1	MLP 2-2-1	91,5	99,0	99,9	40,68	19,54	28,36
2	MLP 2-2-1	90,9	96,6	99,9	42,64	23,37	27,36
3	MLP 2-2-1	91,6	99,5	99,9	40,70	19,10	23,56
4	MLP 2-1-1	91,9	98,5	99,9	37,43	18,68	20,34

<i>Mimosa caesalpinifolia</i>							
RNAs	Arquitetura	Correlação %			RMSE%		
		Treino	Teste	Validação	Treino	Teste	Validação
1	MLP 2-2-1	80,8	93,1	99,9	30,75	12,44	34,27
2	MLP 2-2-1	80,2	92,4	99,9	32,12	10,62	49,81
3	MLP 2-2-1	81,9	98,8	99,9	27,93	14,10	39,82
4	MLP 2-1-1	78,0	88,7	99,9	32,14	12,44	43,64

Legenda: (RMSE %) - raiz quadrada do erro médio.

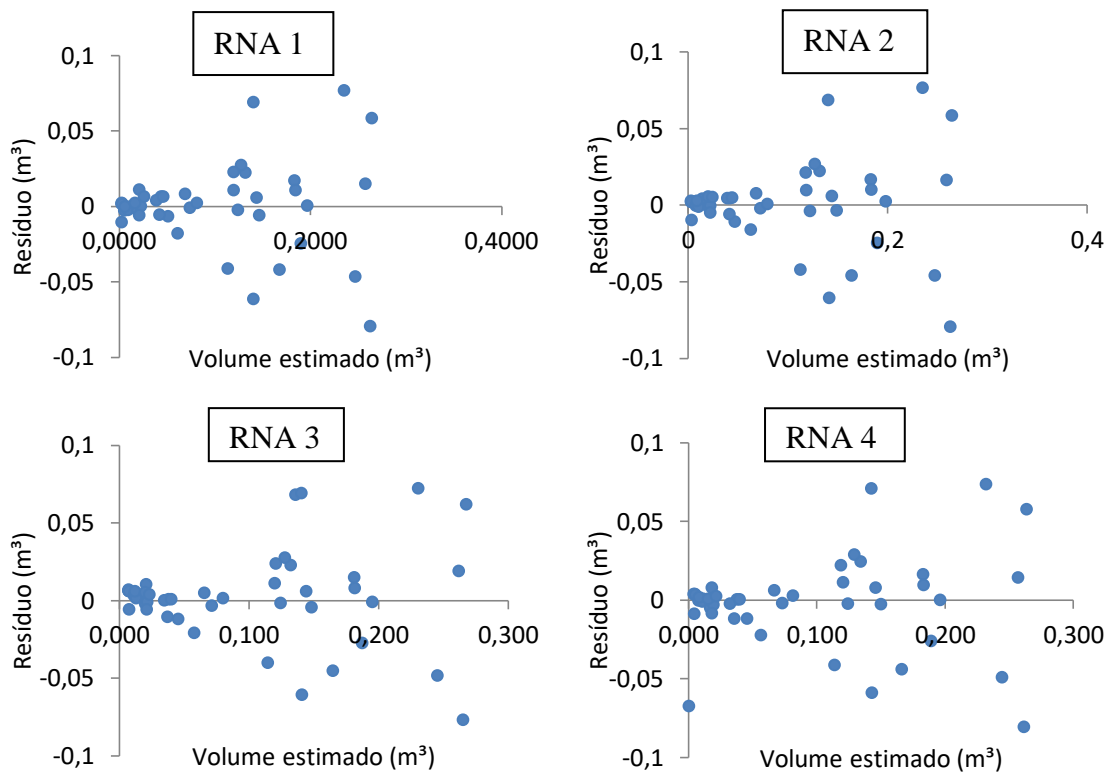
A tabela 4 apresenta os resultados estatísticos de correlação e raiz quadrada do erro médio (RMSE %) das RNAs treinadas para as três espécies. Os melhores resultados foram obtidos na RNA 3, contendo estatísticas superiores as demais, essa diferença pode ser explicada devido a presença de dois neurônios na camada intermediária, diferentes das demais que possuem um neurônio, similar aos resultados obtidos por (BINOTI *et al.*, 2013) trabalhando com clones de eucaliptos.

**Tabela 4** – Redes neurais artificiais (RNAs) selecionadas para estimar o volume individual de espécies nativas em povoamentos homogêneos aos sete anos de idade.

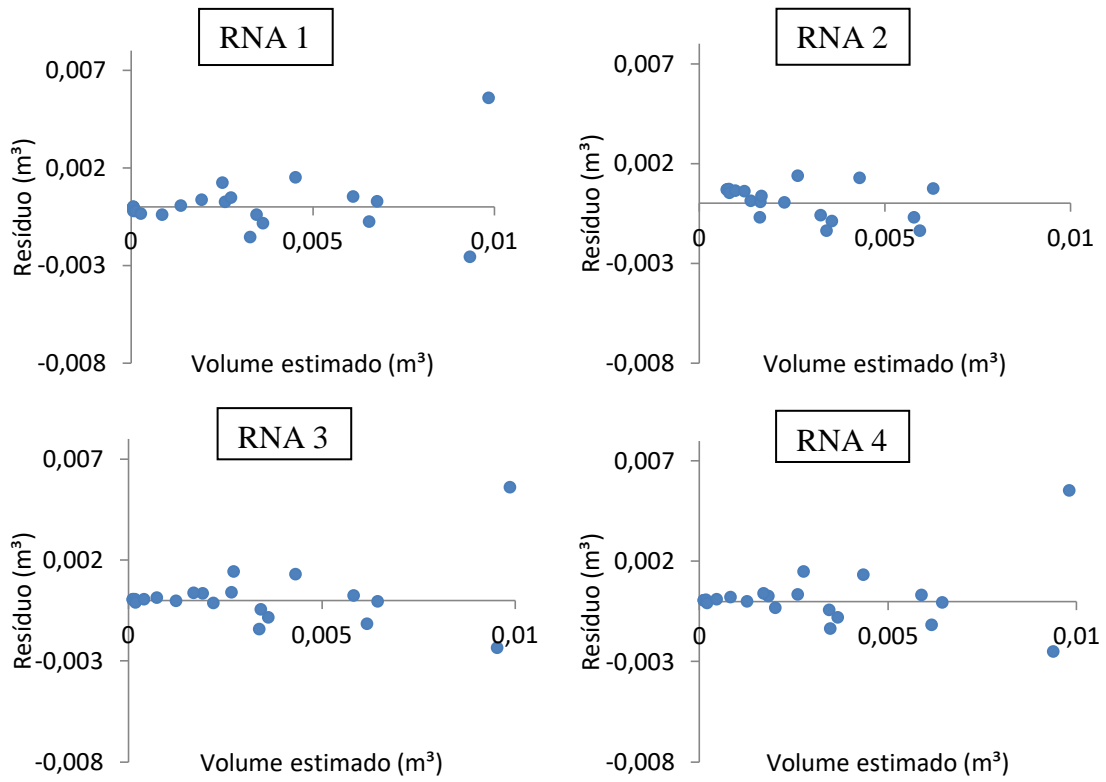
RNAs	Arquitetura	Correlação %			RMSE%		
		Treino	Teste	Validação	Treino	Teste	Validação
1	MLP 5-1-1	84,2	87,1	92,9	78,94	75,24	86,34
2	MLP 5-1-1	83,7	87,0	92,8	69,13	77,60	91,23
3	MLP 5-2-1	95,6	97,9	98,6	22,70	39,51	33,97
4	MLP 5-1-1	84,2	86,5	92,8	93,66	73,62	79,07

Legenda: (RMSE %) Raiz Quadrada do erro médio.

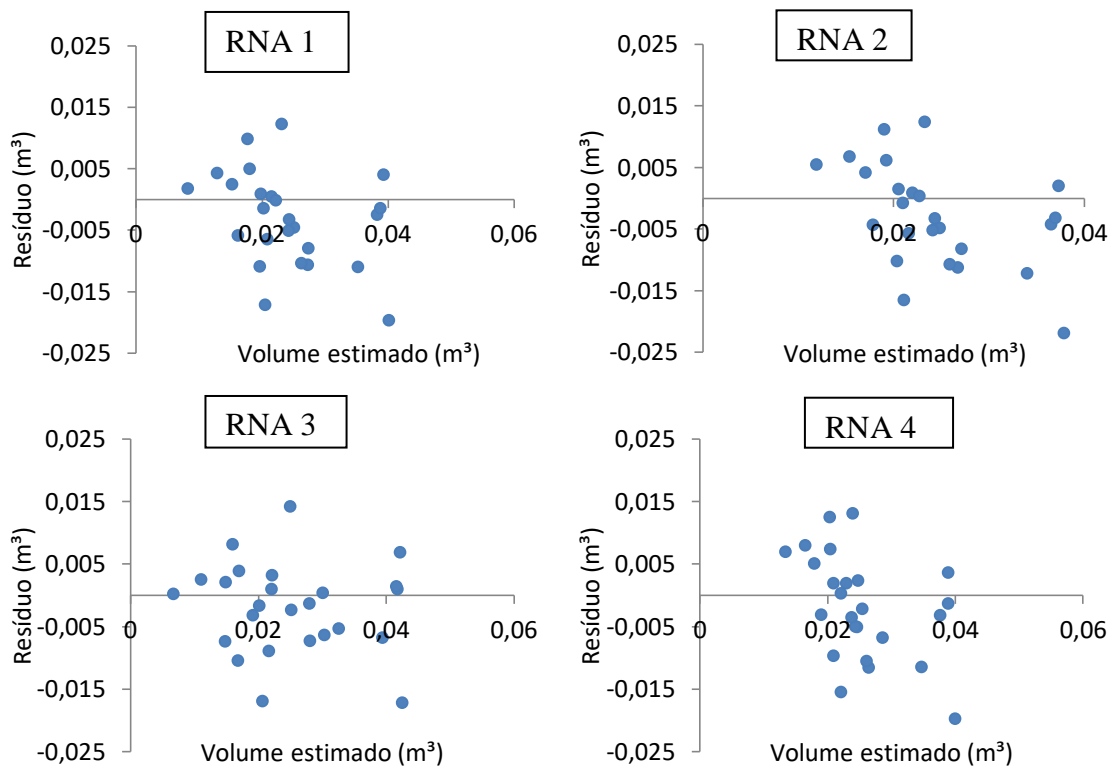
As distribuições dos resíduos dos volumes estimados das espécies *Anadantera macrocarpa* (Figura 4), *Genipa americana* (Figura 5), *Mimosa caesalpinifolia* (Figura 6), sendo que todas as RNAs escolhidas possuíam potencial para ajuste dos volumes das espécies. Para a espécie *Anadantera macrocarpa* não observou diferenças nas dispersões entre as RNAs. Para a *Genipa americana* foi escolhida a RNA 2 com melhor estimador de volume individual da espécie. Para a espécie *Mimosa caesalpinifolia* os melhores resultados foram obtidos pela RNA 3.



**Figura 4** – Dispersão dos erros absolutos das estimativas do volume individual pelas redes neurais artificiais da espécie *Anadantera macrocarpa* aos sete anos de idade.

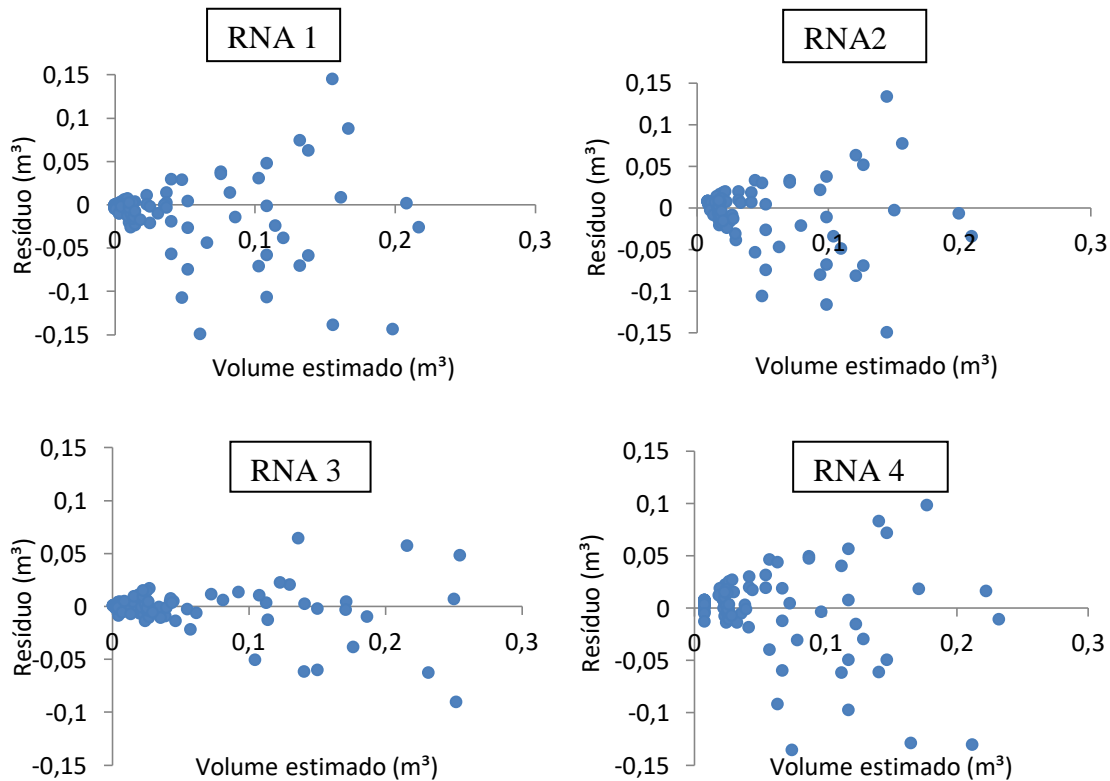


**Figura 5** – Dispersão dos erros absolutos das estimativas do volume individual pelas redes neurais artificiais da espécie *Genipa americana* aos sete anos de idade.



**Figura 6** – Dispersão dos erros absolutos das estimativas do volume individual pelas redes neurais artificiais da espécie *Mimosa caesalpinifolia* aos sete anos de idade.

Na Figura 7 estão organizados a dispersão dos erros da estimativa para as RNAs selecionadas para as três espécies, não sendo observado tendenciosidade. A RNA 3 obteve o melhor ajuste, apresentando melhor distribuição dos erros para as três espécies avaliadas. Resultado similar aos encontrados por Gorgens *et al.*, (2009), Binoti *et al.*, (2013) em experimentos utilizando espécies exóticas de diferentes locais, espécies e clones.



**Figura 7** – Dispersão dos erros absolutos das estimativas do volume individual pelas redes neurais artificiais de espécies nativas em povoamentos homogêneos de sete anos de idade.

### 3.3 Comparativo entre a regressão e RNAs

A Tabela 5 exhibe valores comparativos dos resultados de correlação e (RMSE %) obtidos pela regressão e RNAs e observou benefícios da melhoria das estimativas das RNAs, evidenciando seu uso em volumetria aplicado a ciência florestal, resultado similar aos encontrados por Leal *et al.*, (2015). Desta forma, os modelos proposto pelas RNAs apresentou maior proximidade com os dados observados, similar os resultados obtidos por Rodrigues *et al.* (2010) para a espécie *Schizolobium amazonicum*.

**Tabela 5** – Melhores equações volumétricas de regressão e de redes neurais artificiais (RNAs) para estimar o volume individual das espécies *Mimosa caesalpinifolia*, *Genipa americana* e *Anadantera macrocarpa*.

Ferramentas/Espécies		Correlação %			RMSE%*		
		Treino	Teste	Validação	Treino	Teste	Validação
RNAs	<i>Anadantera macrocarpa</i>	93,8	96,9	99,6	29,36	17,25	12,5
	<i>Genipa americana</i>	91,9	98,5	99,9	37,43	18,68	20,34
	<i>Mimosa Caesalpinifolia</i>	80,8	93,1	99,9	30,75	12,44	34,27
	Todas as espécies	95,6	97,9	98,6	22,7	39,51	33,97
Regressão	<i>Anadantera macrocarpa</i>	94,1			30,30		
	<i>Mimosa Caesalpinifolia</i>	63,4			41,80		
	<i>Genipa americana</i>	92,8			44,20		

\* (RMSE %) - raiz quadrada do erro médio.

#### 4. Conclusão

Os métodos de regressão e de redes neurais artificiais apresentaram aplicabilidade para a estimativa do volume individual dos povoamentos homogêneos de *Mimosa caesalpinifolia*, *Genipa americana* e *Anadantera macrocarpa* em diferentes espaçamentos e aos sete anos de idade.

O modelo de regressão de Spurr obteve melhores resultados estatísticos e dispersão dos erros não tendenciosos para as espécies *Anadantera macrocarpa* e *Genipa americana*, já o modelo proposto por Shumacher e Hall obteve maior precisão de volumes da espécie *Mimosa Caesalpinifolia*.

Os melhores ajustes das RNAs foram evidenciados nas arquiteturas com dois neurônios na camada intermediária para os dois métodos propostos.

As redes neurais artificiais são recomendadas para estimar os volumes individuais das espécies avaliadas e evidenciaram maior precisão em relação à regressão na estimativa de volume.

#### 4. Referências Bibliográficas

BARBOSA, T. R. L.; SILVA, M. P. S.; BARROSO, D. G. Plantio do sabiazeiro (*Mimosa caesalpiniiifolia*) em pequenas e médias propriedades. Programa Rio Rural, Niterói, **Manual Técnico** nº 2, ISSN 1983-5671, 2008.

BARROS, D. A.; MACHADO, S. A.; ACERBI JUNIOR, F. W.; SCOLFORO, J. R. S. Comportamento de modelos hipsométricos tradicionais e genéricos para plantações de *Pinus oocarpa* em diferentes tratamentos. **Boletim Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 45, p. 3-28, 2002.

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.

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

BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M. S.; LEITE, H. G.; SILVA, A.; SANTOS, A. C. A. Modelagem da distribuição diamétrica em povoamentos de eucalipto submetidos a desbaste utilizando autômatos celulares. **Revista Árvore**, v.36, n.5, p.931-939, 2012b.

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

CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Colombo: Embrapa-CNPQ; Brasília, D.F.: Embrapa-SPI, 2003, 1039p.

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.

EMBRAPA - EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUÁRIA. **Sistema Brasileiro de Classificação de Solos**. Brasília: EMBRAPA, 2006, 306 p.

ENCINAS, J. et al. Equações de volume de madeira para o cerrado de Planaltina de Goiás. **Revista Floresta**, v.39, p.107-116, 2009.

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.

GORGENS, E. B. et al. Estimação do volume de árvores utilizando redes neurais artificiais. **Revista Árvore**, v.33, n.6, p.1141-1147, 2009.

KÖPPEN, W.; GEIGER, R. **Klimate der Erde**. Gotha: Verlag Justus Perthes, 1948.

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.234-250, 2015.

LEITE, H. G. et al. 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, 2010.

LORENZI, H.; Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. Nova Odessa: **Plantarum**, 1992, 382 p.

LORENZI, H.; Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil. 4. Ed, Nova Odessa: **Instituto Plantarum**, 2002, 367 p.



MACHADO, S. A.; CONCEIÇÃO, M. B.; FIGUEIREDO FILHO, A. Modelagem do volume individual para diferentes idades e regimes de desbaste em plantações de *Pinus oocarpa*. Guarapuava, **Ciências Exatas e Naturais**, v. 4, n. 2, p. 41- 50, 2002.

MACHADO, S. A.; MELLO, J. M.; BARROS, D. A. Comparação entre métodos para avaliação de volume total de madeira por unidade de área para o pinheiro do Paraná na região sul do Brasil. **Cerne**, Lavras-MG, v. 6. n. 2, p. 55-66, 2000.

MAIA, G. N. Caatinga: árvores e arbustos e suas utilidades. 1. ed. São Paulo: **D&Z Computação Gráfica e Editora**. 2004. 413p.

MAZZONETTO, C. R.; FRACASSO, R. M.; FORTES, F. Avaliação de modelos na estimativa de volume de *Pinus taeda*. In: CONGRESSO FLORESTAL ESTADUAL DO RS; SEMINÁRIO MERCOSUL DA CADEIA MADEIRA, 2., Nova Prata, Rio Grande do Sul. **Anais...** Nova Prata: UFSM/DCFL, 2012. p. 562-567.

MELO, L. C.; BARRETO, P. A. B.; OLIVEIRA, F. G. R. B.; NOVAES, A. B. Estimativas volumétricas em povoamentos de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* no Sudoeste da Bahia. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 33, n. 76, p. 379-386, 2013.

REZENDE, A. V.; VALE, A. T.; SANQUETTA, C. R.; FIGUEIREDO FILHO, A.; FELFILI, J. M. Comparação de modelos matemáticos para estimativa do volume biomassa e estoque de carbono da vegetação lenhosa de um cerrado *sensu stricto* em Brasília. DF. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, n. 71, p. 65-76, 2006.

RIBASKI, J. et al. Sabiá (*Mimosa caesalpiniiifolia*): árvore de múltiplo uso no Brasil. Colombo: **Embrapa Florestas**, 2003, 4p.

ROCHA, M. B.; BARRETO-GARCIA, P. A. B.; PRADO, W. B.; PAULA, A.; JÚNIOR, V. C. Volumetria de *Genipa americana* em plantio homogêneo no Sudoeste da Bahia. **Pesquisa Florestal Brasileira**. Colombo, v. 35, n. 84, p. 419-425, out./dez. 2015.

RODRIGUES, E. F.; OLIVEIRA, T. F.; MADRUGA, M. R.; SILVEIRA, A. M. Um método para determinar o volume comercial do *Schizolobium amazonicum* (huber) ducke utilizando redes neurais artificiais. **Revista Brasileira Bioma.**, São Paulo, v.28, n.1, p.16-23, 2010.

SANTANA, O. A.; ENCINAS, J. I. Equações volumétricas para uma plantação de *Eucalyptus urophylla* destinada a produção de lenha. In: Simpósio Latino-Americano sobre manejo florestal, 3. **Anais...** Santa Maria: UFSM/PPGEF, 2004, p. 107-111.

SCOLFORO, J. R. S.; PÉREZ, J. F. M.; MELLO, J. M. de; OLIVEIRA, A. D. de; CAMOLESI, J. F.; BORGES, L. F. R.; ACERBI JÚNIOR, F. W. Estimativas de volume, peso seco, peso de óleo e quantidade de moirões para a Candeia (*Eremanthus erythropappus* (DC.) MacLeish). **Cerne**, Lavras, v. 10, p. 87-102,2004.

SILVA, et al. 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, L. F. da; FERREIRA, G. L.; SANTOS, A. C. A.; LEITE, H. G.; SILVA, M. L. Equações Hipsométricas. Volumétricas e de Crescimento para *Khaya ivorensis* Plantada em Pirapora. **Floresta Ambiente**, vol.23 no.3 Seropédica July/Sept, 2016, Epub Apr, 29. 2016.

SOARES, C. P. B.; PAULA NETO, F.; SOUZA, A. L. Dendrometria e inventário florestal, 2. Ed. Viçosa. MG: **Editora da UFV**, 2011, 270 p.

VIEIRA, E. L.; CARVALHO, F. F. R.; BATISTA, A. M. V.; FERREIRA, R. L. C.; SANTOS, M. V. F.; LIRA, M. A.; SILVA, M. J.; SILVA, E. M. B. Composição química de forrageiras e seletividade de bovinos em bosque de sabiá (*Mimosa caesalpiniaefolia* Benth.) nos períodos chuvoso e seco. **Revista Brasileira de Zootecnia**, v. 34, n. 5, p. 1505-1511, 2005.