

## CALIBRAÇÃO DE EQUAÇÕES DE VOLUME EM NÍVEL DE POVOAMENTO E PARCELA PARA ACÁCIA NEGRA

### CALIBRATION OF VOLUME EQUATIONS BY STAND AND PLOT LEVEL IN STANDS OF BLACK WATTLE

Amanda Pereira Santos<sup>1</sup>, Henrique Soares Koehler<sup>2</sup>, Carlos Roberto Sanquetta<sup>3</sup>,  
Sylvio Péllico Netto<sup>4</sup>, Abel Soares Siqueira<sup>5</sup>, Alexandre Behling<sup>6</sup>

<sup>1, 2, 3, 4, 5</sup> Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil – [aman\\_daps@hotmail.com](mailto:aman_daps@hotmail.com),  
[koehler@ufpr.br](mailto:koehler@ufpr.br), [carloosanquetta@gmail.com](mailto:carloosanquetta@gmail.com), [sylviopelliconetto@gmail.com](mailto:sylviopelliconetto@gmail.com),  
[abel.s.siqueira@gmail.com](mailto:abel.s.siqueira@gmail.com) & [alexandre.behling@yahoo.com.br](mailto:alexandre.behling@yahoo.com.br)

#### RESUMO

Os dados obtidos com a cubagem de diversas árvores é o método mais utilizado para estimar o volume em novos povoamentos usando-se da regressão dos mínimos quadrados (método tradicional). A cubagem é uma prática onerosa, portanto, faz-se necessária a utilização de técnicas alternativas com o intuito de obter estimativas comparáveis com aquelas que utilizam diversas árvores para a estimativa de volume (método tradicional), para reduzir a amostragem de árvores. A calibração da equação mista se destaca entre as alternativas. O objetivo da pesquisa foi ajustar o modelo de volume de Schumacher-Hall em dois níveis (povoamento e parcela) e calibrar esta equação utilizando a modelagem mista, comparando-a com as equações obtidas por meio do método tradicional. Os dados são provenientes de plantios de *Acacia mearnsii* De Wild. nos municípios de Cristal, Encruzilhada do Sul e Piratini, no estado do Rio Grande do Sul, Brasil. A calibração foi avaliada utilizando nove métodos diferentes. A base de dados é composta por 670 árvores com idades variando de 1 a 10,75 anos. As variáveis mensuradas foram diâmetro à altura do peito, altura total e volume do fuste. As estatísticas utilizadas para a avaliação foram o coeficiente de determinação, erro padrão da estimativa, análise de resíduos e análise gráfica da relação entre o volume observado e estimado. A calibração das equações mistas com apenas três árvores, possibilitou a obtenção de estimativas próximas as do método tradicional, entretanto, com uma redução considerável do número de árvores amostradas para a efetuação da cubagem. A inclusão do nível parcela na modelagem mista, não revelou ganhos consideráveis na acurácia, apenas o nível povoamento apresentou resultados satisfatórios para o presente estudo.

**PALAVRAS-CHAVE:** Agrupamentos, Cubagem, Efeito aleatório, Modelos mistos.

#### ABSTRACT

Data obtained by scaling several trees is the most used method to estimate volume in new stands using least squares regression (traditional method). Scaling is an expensive practice, therefore, it is necessary to use alternative techniques to obtain estimates comparable to those that use several trees for volume estimation (traditional method), to reduce the sampling of trees. The mixed equation calibration stands out among the alternatives. The objective of this study was to fit the Schumacher-Hall volume model at two levels (stand and plot) and calibrate this equation using mixed modeling, comparing it to the equations obtained by the traditional method. The database is from *Acacia mearnsii* De Wild. plantations in the municipalities of Cristal, Encruzilhada do Sul, and Piratini, in the state of Rio Grande do Sul, Brazil. Calibration was evaluated using nine different methods. The database is composed of 670 trees with ages from one to 10,75 years. The variables measured were diameter at breast height, total height, and stem volume. The statistics used to evaluate the models were the coefficient of determination, standard error of the estimate, residual analysis, and graphical analysis of the relationship between observed and estimated volume. The calibration of the mixed equations with three trees allowed to obtain estimates as reliable as those obtained from the traditional method, however, with a considerable reduction in the number of trees sampled for the scaling. The inclusion of the plot level in the mixed modeling did not provide considerable increases in accuracy, only the stand level presented satisfactory results for this study.

**KEYWORDS:** Clusters, Scaling, Random effects, Mixed models.

## INTRODUÇÃO

O volume do fuste é uma das variáveis essenciais para conhecer o volume de madeira dos plantios florestais. Esta variável fornece subsídios para a avaliação do estoque de madeira e a análise do potencial de rendimento sustentável das florestas (LIU et al., 2019) e também fornece informações importantes sobre o crescimento, a produção estimada e valor econômico de um povoamento, portanto, é essencial estimá-lo com um alto nível de confiabilidade (DE AZEVEDO et al., 2011; MIGUEL et al., 2018). Existem vários métodos para estimar o volume das árvores, entre eles: os fatores de forma, os quocientes de forma, as equações de volume, multi-volumes e as equações de afilamento (BURKHART & TOMÉ, 2012; ADAMEC et al., 2019; DE AZEVEDO et al., 2020).

As equações de volume são comumente usadas para estimar o volume de árvores em procedimentos de inventário florestal, devido à precisão de suas estimativas. Nestas equações o volume da madeira é estimado em função de outras variáveis dendrométricas, geralmente o diâmetro à altura do peito (*dap*) e a altura (*h*) (CAMPOS & LEITE, 2017).

A regressão dos mínimos quadrados ordinários (OLS) em modelos lineares, é o método estatístico mais comumente utilizado para a obtenção dos parâmetros na estimativa das equações de volume, porém este não considera a estrutura hierárquica dos dados em que, as árvores medidas estão alocadas dentro das parcelas e estas por sua vez estão agrupadas em povoamentos, o que ocasiona em uma correlação natural dos dados. Além disso, existem diversos fatores que afetam a forma e, conseqüentemente, o volume das árvores como, a idade, o clima, a região, os fatores topográficos, entre outros (VER PLANCK & MACFARLANE, 2014; OU et al., 2016; FORD et al., 2017; XIANG et al., 2021).

O modelo de efeitos mistos é uma ferramenta muito eficaz para analisar dados hierárquicos (PINHEIRO & BATES, 2000). Cada modelo misto tem duas partes - efeitos fixos, que são idênticos para toda a população e efeitos aleatórios que se relacionam a cada um dos níveis hierárquicos como por exemplo, as parcelas e os povoamentos. Os efeitos fixos descrevem a influência das covariáveis individuais ou efeitos do tratamento em toda a população e os efeitos aleatórios explicam a aleatoriedade e heterogeneidade dos dados causados por fatores conhecidos e desconhecidos (ADAMEC et al., 2019). Esta abordagem de modelagem

permite analisar dados estruturados hierarquicamente de forma mais eficaz do que outras abordagens e pode aumentar a precisão das estimativas (HAO et al., 2015).

Uma das vantagens da utilização dos modelos de efeitos mistos é a inclusão de dados dos povoamentos de interesse visando calibrar o modelo para uma determinada área (ADAMEC et al., 2019) usando o EBLUP (*Estimated Best Linear Unbiased Predictor*). Esta técnica permite realizar estimativas de variáveis da floresta com precisão satisfatória a partir de poucas medições adicionais, reduzindo a amostragem nos inventários florestais, bem como os custos e o tempo de operação.

Devido à suas vantagens, a calibração dos modelos mistos está sendo cada vez mais estudada à modelagem florestal como nos trabalhos de Maltamo et al., (2012), que utilizaram a calibração em uma equação mista de volume, Hao et al., (2015), que utilizaram a calibração do modelo misto para descrever a largura da copa de árvores de *Cunninghamia lanceolata* e Han et al. (2021), que utilizaram a calibração da equação mista em uma relação hipsométrica.

Sendo assim, as seguintes hipóteses foram propostas neste estudo: a calibração do modelo misto de volume produz estimativas adequadas e semelhantes à abordagem tradicional (em que são cubadas muitas árvores)? Quantas e quais árvores devem ser amostradas para calibrar as equações de volume? E quais níveis de agrupamentos devem ser estabelecidos?

A *Acacia mearnsii* De Wild., popularmente conhecida como acácia-negra, apresenta elevado valor econômico, sendo utilizada na forma de celulose, carvão e principalmente taninos (HIGA et al., 2009). A espécie também apresenta relevância social, pois é plantada por diversas famílias, geralmente em pequenas e médias propriedades que detêm aproximadamente 60 - 80% das plantações, no estado do Rio Grande do Sul, Brasil (CHAN et al., 2015). A floresta alcança sua produção máxima nas idades entre 7 a 10 anos (rotação da cultura).

O objetivo geral do trabalho foi calibrar o modelo misto de volume de Schumacher-Hall e comparar o resultado com equações obtidas pela abordagem tradicional. Os objetivos específicos foram: 1) ajustar o modelo de volume de Schumacher-Hall para cada povoamento pelo método tradicional; 2) ajustar o modelo de volume de Schumacher-Hall pelo efeito fixo da modelagem mista; 3) calibrar o modelo misto em nível de povoamento e de parcela dentro do

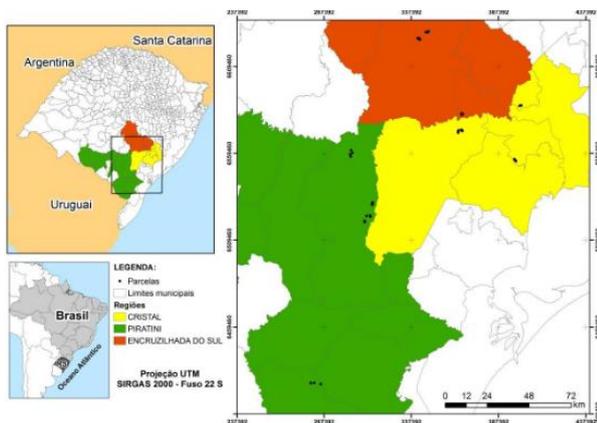
povoamento, utilizando nove métodos de seleção de árvores.

## MATERIAIS E MÉTODOS

### Caracterização dos dados

Os dados utilizados no estudo abrangem três regiões do estado do Rio Grande do Sul: o município de Cristal, Piratini e Encruzilhada do Sul (Figura 1), que foram caracterizados pelo clima, relevo e solo (MOCHIUTTI, 2007). Cada povoamento é caracterizado por uma condição de solo, um período de exposição aos elementos meteorológicos e pela competição entre as plantas e esses fatores condicionam as características dos povoamentos no presente estudo e influenciam na alometria das árvores.

A amostragem abrangeu 12 povoamentos e em cada povoamento foram instaladas aleatoriamente, quatro parcelas circulares, com área de 78,54 m<sup>2</sup> cada uma. Os parâmetros dendrométricos para cada região são apresentados na Tabela 1.



**Figura 1.** Área de cultivo de acácia-negra nas regiões de Cristal, Encruzilhada do Sul e Piratini, no estado do Rio Grande do Sul.

**Tabela 1.** Parâmetros dendrométricos dos plantios comerciais de acácia-negra nas regiões de Cristal, Encruzilhada do Sul e Piratini, estado do Rio Grande do Sul.

Região	<i>dap</i> (cm)	<i>h</i> (m)	V (m <sup>3</sup> /u.a)	G (m <sup>2</sup> /u.a)
Cristal	9,77	12,36	0,859	0,115
Encruzilhada do Sul	9,87	12,93	0,990	0,128
Piratini	8,88	11,21	0,895	0,116

*dap* é o diâmetro à altura do peito médio em cada região em cm; *h* é a altura total média em cada região em m; V é o volume médio das parcelas em cada região em m<sup>3</sup> por unidade de área e G é a área basal média em cada região em m<sup>2</sup> por unidade de área.

Em cada região foram amostrados quatro povoamentos em diferentes idades, de forma a abranger toda a rotação da cultura (10 anos). A idade destes povoamentos variou de 1 a 10,75 anos, sendo divididos: os povoamentos com 1,83; 3,08; 5,75 e 10,75 anos em Encruzilhada do Sul, os povoamentos com 1,75; 2,75; 5,00 e 10,08 anos em Cristal, e os povoamentos com 1; 2,33; 5,25 e 9,83 anos em Piratini.

A base de dados utilizada contém 670 árvores e as variáveis mensuradas nas árvores foram a altura total (*h*) e o diâmetro à altura do peito (*dap*). O processo de cubagem foi efetuado em todas as árvores da parcela e o volume (*v*) foi definido por meio do método Huber (1) e o diâmetro mínimo do topo com casca não foi considerado.

$$v = \sum_{i=1}^l g_i l_i \quad (1)$$

em que *v* é o volume total do fuste da árvore, m<sup>3</sup>; *g<sub>i</sub>* é a área transversal das extremidades das seções *i*, m<sup>2</sup>; *l<sub>i</sub>* é o comprimento da seção *i*, m.

### Estatísticas descritivas

Os dados foram analisados por meio de gráficos de dispersão e de estatísticas descritivas das variáveis *dap*, *h* e *v* (Tabela 2). A correlação (*r*) entre as variáveis diâmetro e altura total com o volume observado foi utilizada em um modelo de potência, pois os dados demonstram uma correlação não linear.

### Ajuste do modelo de volume pelo método tradicional (testemunha)

A comparação (testemunha) com o ajuste e a calibração do modelo misto foi efetuada com o método tradicional de ajuste (OLS). Neste método, o ajuste do modelo é efetuado para cada povoamento e é exigido a mensuração das variáveis diâmetro à altura do peito e altura total (*dap*, *h*) de diversas árvores.

O modelo utilizado no presente trabalho foi o de Schumacher & Hall (1933), conforme (2), que foi linearizado (3), já que as previsões de efeitos aleatórios são mais convenientes para funções lineares:

$$v_i = \beta_0 \text{dap}_i^{\beta_1} h_i^{\beta_2} \quad (2)$$

$$\ln v_i = \beta_0 + \beta_1 \ln \text{dap} + \beta_2 \ln h \quad (3)$$

A discrepância logarítmica foi corrigida no modelo pelo fator de correção, adicionando a constante apresentada em (4) ao valor do coeficiente  $\beta_0$  no modelo 3.

**Tabela 2.** Estatísticas descritivas para as variáveis diâmetro à altura do peito (*dap*), altura (*h*), volume (*v*) das árvores de acácia-negra.

Grupo	Variável	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
1	<i>dap</i> (cm)	2,08	0,64	3,34	0,65
	<i>h</i> (m)	2,97	1,60	4,25	0,60
	<i>v</i> (m <sup>3</sup> )	0,0011	0,0002	0,0028	0,0006
2	<i>dap</i> (cm)	6,95	2,23	10,66	1,60
	<i>h</i> (m)	7,80	4,40	10,20	1,14
	<i>v</i> (m <sup>3</sup> )	0,0176	0,0013	0,0413	0,0086
3	<i>dap</i> (cm)	9,17	2,86	16,55	2,58
	<i>h</i> (m)	11,75	5,40	15,40	1,91
	<i>v</i> (m <sup>3</sup> )	0,0458	0,0022	0,1369	0,0284
4	<i>dap</i> (cm)	11,37	2,55	18,46	3,47
	<i>h</i> (m)	15,32	4,70	20,60	2,99
	<i>v</i> (m <sup>3</sup> )	0,0892	0,0014	0,2492	0,0533
5	<i>dap</i> (cm)	12,92	3,82	23,55	3,88
	<i>h</i> (m)	15,32	4,70	20,60	2,99
	<i>v</i> (m <sup>3</sup> )	0,0892	0,0014	0,2492	0,0533

$$FC = \frac{QME}{2} \quad (4)$$

em que QME é a variância do erro.

O modelo foi ajustado para cada povoamento pelo método dos mínimos quadrados ordinários (OLS). Para possibilitar a comparação dos resultados do método tradicional com os resultados do efeito fixo e com a equação mista calibrada, o coeficiente de determinação ( $R^2$ ), o erro padrão da estimativa ( $S_{yx}$ ) e o coeficiente de variação ( $S_{yx} \%$ ) foram calculados para cada povoamento e recalculados para toda a base de dados.

Em cada povoamento foram cubadas em média 50 árvores, portanto este valor será referência para comparação com a equação mista calibrada.

#### Modelagem mista – ajuste dos efeitos fixos e calibração da equação de volume

O modelo básico da modelagem mista (5), segundo Pinheiro & Bates (2000), é apresentado como:

$$E[Y_k] = X_k \beta \quad (5)$$

em que  $Y_k$  é o vetor das observações de  $y$  para o cluster  $k$ ;  $X_k$  é uma matriz contendo os valores das variáveis independentes para o cluster  $K$ ;  $\beta$  é o vetor de coeficientes de efeito fixo, que não varia entre os clusters do modelo.

Ao assumir parcelas distribuídas em diversos locais e idades, as estimativas do efeito fixo não se tornam apropriadas. Para acomodar as diferentes relações entre as variáveis independentes do modelo (*dap* e *h*) e a forma das árvores, é necessário a adição de efeitos aleatórios no modelo (5), resultando em uma resposta

média que varia entre os clusters e é mais apropriada, apresentada em 6:

$$E[Y_k | b_k] = X_k \beta + Z_k b_k + \varepsilon \quad (6)$$

$$b_k \sim \mathcal{N}(0, D)$$

$$\varepsilon \sim \mathcal{N}(0, R)$$

em que  $Z_k$  é a matriz para os componentes aleatórios da equação;  $X_k = Z_k$  que representa as variáveis independentes do modelo;  $\beta$  é o vetor de efeito fixo e é obtido pelos mínimos quadrados generalizados (GLS);  $b_k$  é o vetor de efeitos aleatórios, com matriz de variância-covariância  $D$  (7) e que pode ser dividido para incluir componentes aleatórios de níveis desejados;  $\varepsilon$  é o resíduo, com distribuição normal e matriz de variância-covariância  $R_k$  (8).

$$\text{Var}[b_k] = D = \begin{bmatrix} \text{var}(b_0) & \text{cov}(b_0, b_1) & \text{cov}(b_0, b_2) \\ \text{cov}(b_0, b_1) & \text{var}(b_1) & \text{cov}(b_1, b_2) \\ \text{cov}(b_0, b_2) & \text{cov}(b_1, b_2) & \text{var}(b_2) \end{bmatrix} \quad (7)$$

$$\text{Var}[\varepsilon] = R = \begin{bmatrix} \text{var}(\varepsilon_{1i}) & \text{cov}(\varepsilon_{1i}, \varepsilon_{2i}) & \text{cov}(\varepsilon_{1i}, \varepsilon_{ni}) \\ \text{cov}(\varepsilon_{1i}, \varepsilon_{2i}) & \text{var}(\varepsilon_{2i}) & \text{cov}(\varepsilon_{2i}, \varepsilon_{ni}) \\ \text{cov}(\varepsilon_{1i}, \varepsilon_{ni}) & \text{cov}(\varepsilon_{2i}, \varepsilon_{ni}) & \text{var}(\varepsilon_{ni}) \end{bmatrix} \quad (8)$$

A predição dos efeitos aleatórios da equação mista é efetuada pelo EBLUP (estimativa do melhor preditor imparcial). Para o EBLUP é necessária a estimativa confiável dos componentes de variância, através da máxima verossimilhança residual ou restrita (REML) (RESENDE, 2016).

Assim, os parâmetros de cluster específico ( $b_k$ ) são estimados por REML/EBLUP, apresentado em (9):

$$\hat{b}_k = DZ_k' (Z_k DZ_k' + R)^{-1} res \quad (9)$$

em que *res* é o resíduo entre o volume observado e o volume estimado pela parte fixa da equação mista.

No presente trabalho, o primeiro nível foi representado pelo efeito fixo da equação mista, o segundo nível (cluster) como os povoamentos, devido ao interesse prático e econômico de ajustar modelos para povoamentos (talhões com a mesma idade) e o terceiro nível como parcela, assumido dentro de cada grupo de povoamento. As variáveis independentes para os coeficientes de efeito fixo e aleatório são as mesmas (*dap* e *h*).

Assim, o modelo (3) pode ser reescrito em termos de efeitos fixos ( $\beta_j$ ) e aleatórios ( $b_k$ ), conforme (10).

$$\ln v_{ik} = \beta_0 + \beta_1 \ln dap_{ik} + \beta_2 \ln h_{ik} + b_{0k} + b_{1k} \ln dap_{ik} + b_{2k} \ln h_{ik} + b_{0jk} + b_{1jk} \ln dap_{ik} + b_{2jk} \ln h_{ik} \quad (10)$$

em que  $v_{ik}$  é o volume do fuste da *i*-ésima árvore na *k*-ésima parcela, m<sup>3</sup>;  $dap_{ik}$  é o diâmetro à altura do peito da *i*-ésima árvore na *k*-ésima parcela, cm;  $h_{ik}$  é a altura da *i*-ésima árvore na *k*-ésima parcela, m;  $\beta_0$ ,  $\beta_1$  e  $\beta_2$  são os coeficientes de efeito fixo;  $b_{0k}$ ,  $b_{1k}$  e  $b_{2k}$  são os coeficientes de efeito aleatório para o cluster povoamento na parcela *k*;  $b_{0jk}$ ,  $b_{1jk}$  e  $b_{2jk}$  são os coeficientes de efeito aleatório para o cluster na parcela *k*.

O processamento dos dados foi efetuado por meio do *Software SAS Studio (on demand for academics)* e Microsoft Excel (2013). Um exemplo prático é apresentado no Apêndice I.

### Calibração da equação de volume por grupos de povoamento e parcela

O volume das árvores varia de acordo com a idade do povoamento, ou seja, quanto maior for a idade do povoamento, maior será o volume total da árvore. Sendo assim, os povoamentos foram separados em grupos de idades (5 grupos) para se efetuar a calibração, pois, desta maneira, foram evidenciados os efeitos de mudança no volume das árvores. O grupo 1 era um povoamento muito jovem (1 ano), o grupo 2 era o povoamento jovem (1,75 e 1,83 anos), o grupo 3 era o povoamento médio – inicial (2,33 à 3,08 anos), o grupo 4 era o povoamento médio – avançado (5 a 5,75 anos) e o grupo 6 era o povoamento maduro (9,83 à 10,75 anos).

Os ajustes foram repetidos 4 vezes, considerando 3 parcelas selecionadas aleatoriamente para ajuste e uma parcela para calibração. Os resultados apresentados referem-se à rodada 1 de 4 (selecionada aleatoriamente), assim, as parcelas para calibração foram: parcela 9 (idade 9,83 anos); parcela 13 (idade 5 anos); parcela 48 (idade 2,33 anos); parcela 37 (idade 1,75 anos) e parcela 34 (idade 1 ano), totalizando 66 árvores. As demais parcelas foram utilizadas no ajuste da equação (605 árvores).

A calibração da equação exigiu a amostragem de árvores, a mensuração de variáveis independentes e dependentes e foi testada observando-se os critérios de seleção determinados pelos autores:

1A: é a calibração utilizando a árvore com maior valor da variável *dap* para cada grupo de povoamento na base de dados;

2A: é a calibração utilizando as duas árvores com maiores valores da variável *dap* para cada grupo de povoamento na base de dados;

3A: é a calibração utilizando as três árvores com maiores valores da variável *dap* para cada grupo de povoamento na base de dados;

4A: é a calibração utilizando as quatro árvores com maiores valores da variável *dap* para cada grupo de povoamento na base de dados;

5A: é a calibração utilizando as cinco árvores com maiores valores da variável *dap* para cada grupo de povoamento na base de dados;

6A: é a calibração utilizando a árvore mediana da variável *dap* para cada grupo de povoamento na base de dados;

7A: é a calibração utilizando uma árvore aleatória em cada grupo de povoamento na base de dados;

8A: é a calibração utilizando três árvores, a menor, a árvore média e a maior para a variável *dap* em cada grupo de povoamento na base de dados;

9A: é a calibração utilizando três árvores, sendo a árvore média, a árvore média menos dois desvios padrões e a árvore média mais dois desvios padrões da variável *dap* para cada grupo de povoamento na base de dados.

### Avaliação das equações de volume calibradas

A avaliação das estimativas de volume pelos métodos tradicional, efeito fixo e equação calibrada foi efetuada por meio das estatísticas: erro padrão da estimativa (*i*) (11), do coeficiente de variação (*ii*) (12) e do coeficiente de determinação (*iii*) (13).

Erro padrão da estimativa ( $m^3$ ):

$$S_{yx} = \frac{\sqrt{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}}{n-p} \quad (11)$$

Coefficiente de variação (%):

$$CV \text{ ou } S_{yx} \% = \frac{S_{yx}}{\bar{y}_i} * 100 \quad (12)$$

Coefficiente de determinação:

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y}_i)^2} \quad (13)$$

em que  $y_i$  é o valor do volume observado na árvore  $i$ ,  $m^3$ ;  $\bar{y}_i$  é o valor do volume médio observado por idade,  $m^3$ ;  $\hat{y}_i$  é o valor do volume estimado pelas equações na árvore  $i$ ,  $m^3$ .

O critério de seleção do método de calibração escolhido como o mais apropriado se baseou em: o resultado das estatísticas das equações calibradas não deveria se afastar mais do 5 % em relação as estatísticas obtidas por meio do método tradicional.

Gráficos de dispersão dos volumes observados e estimados foram gerados em função da variável combinada ( $d^2h$ ), para facilitar a visualização dos resultados o  $dap$  foi transformado em metros na confecção dos mapas. Gráficos de resíduos para o

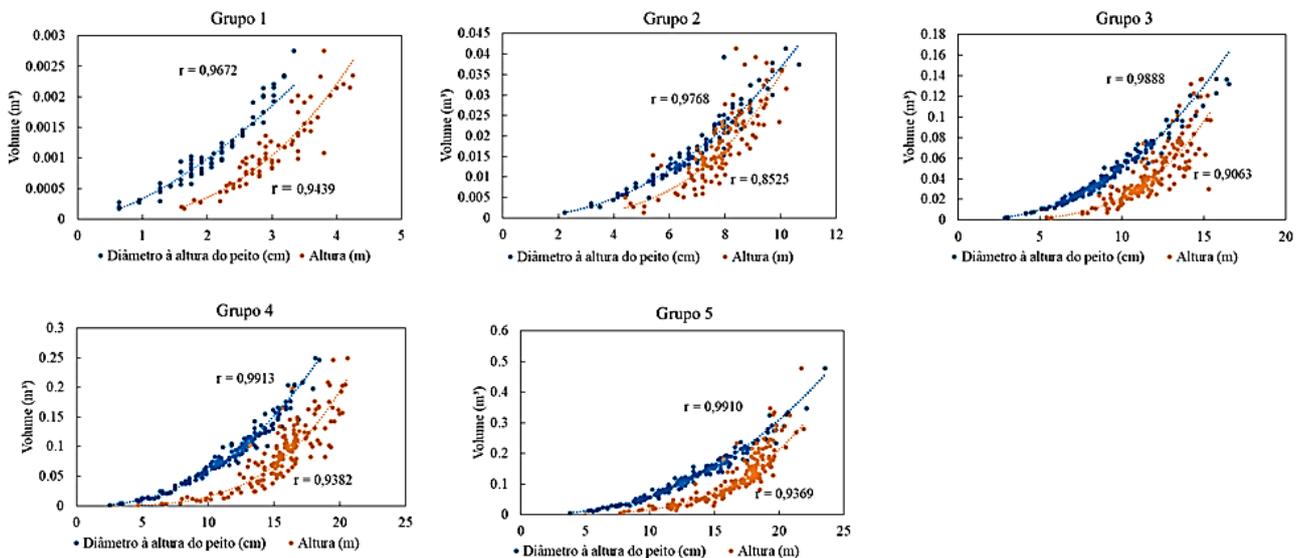
método tradicional, efeito fixo e equação calibrada também foram gerados.

A avaliação das condicionantes da regressão foi realizada e por meio da transformação logarítmica os resíduos da equação se aproximaram da normalidade e da homogeneidade.

## RESULTADOS E DISCUSSÃO

### Correlação das variáveis

A correlação do diâmetro à altura do peito e da altura com o volume são acurados (Figura 2). Os maiores valores de correlação (0,9672 a 0,9913) são entre a variável  $dap$  e  $v$ , quando comparados aos valores de correlação de  $h$  com  $v$  (0,8525 a 0,9439). Esse fato ocorre porque, a culminação do incremento da variável altura das árvores acontece primeiro, e logo depois ocorre a culminação do crescimento em diâmetro, aumentando a relevância do diâmetro à altura do peito na estimativa do volume, principalmente nas maiores árvores (MOTALLEBI & KANGUR, 2016).



**Figura 2.** Correlação das variáveis  $dap$  (cm) e  $h$  (m) com os grupos de idade e dispersão do volume nos grupos de idade, oriundos dos plantios comerciais de acácia-negra no estado do Rio Grande do Sul.

Os valores de correlação também variam entre os grupos de povoamentos, apresentando maiores valores nos povoamentos mais maduros (9,83 a 10,75 anos), quando as dimensões que as plantas atingem na floresta estão mais definidas (YANG et al., 2019). Para o diâmetro à altura do peito, a correlação aumenta nos grupos de povoamentos mais maduros. Já para a altura

total, o valor de correlação aumenta até certo grupo de povoamento (Grupo 4) e então se estabiliza.

Os povoamentos, caracterizados pelas condições meteorológicas, genéticas, de solo e de competição entre as plantas, afetam a forma das árvores e estes efeitos ambientais e genéticos representados pelos povoamentos, devem ser levados em consideração nas

modelagens volumétricas (XIANG et al., 2021). Conforme evidenciado em um trabalho por Péllico Neto & Behling (2019), as relações alométricas dos volumes de acácia-negra variam entre as idades (povoamentos), indicando a importância em quantificar estas alterações nas modelagens.

A alometria das árvores não varia de forma sistemática entre os povoamentos, portanto adicionar um efeito fixo em um modelo para obter as variações ambientais que ocorrem nos povoamentos não é a opção mais apropriada, ou seja, ao adicionar o povoamento como um efeito aleatório em um modelo, o pesquisador deseja que outras variações sejam adicionadas, como as alterações de sítio e locais onde os povoamentos estão localizados. (FORTIER et al, 2017).

### Modelo de volume ajustado pelo método tradicional

A variação dos coeficientes da equação  $\hat{\beta}_0$ ,  $\hat{\beta}_1$  e  $\hat{\beta}_2$  nas duas bases de dados (605 e 66 árvores) foi alta (Tabela 3). Na primeira base de dados, a variação foi de 16 %, 38 % e 40 % respectivamente para os coeficientes

$\hat{\beta}_0$ ,  $\hat{\beta}_1$  e  $\hat{\beta}_2$  e para a segunda base de dados, a variação foi de 23 %, 46 % e 55 %, respectivamente, revelando que as correlações das variáveis *dap* e *h* com o volume se alteram nas idades (CHEN et al, 2020), devido às interações que acontecem nas florestas. Os valores do coeficiente de determinação ( $R^2$ ), do erro padrão da estimativa (*Syx*) e do coeficiente de variação (*Syx* %) foram acurados. Para a primeira base de dados, o  $R^2$  variou de 0,940 a 0,992, o *Syx* variou de 0,0001 a 0,0122m<sup>3</sup> e o *Syx* % variou de 5,18 a 12,63 % e para a segunda base de dados, o  $R^2$  variou de 0,788 a 0,993 e os valores de *Syx* e o *Syx* % variaram de 0,0001 a 0,0072m<sup>3</sup> e de 4,17 a 22,20 % respectivamente.

Todas as estatísticas apresentaram valores mais acurados nos povoamentos médios - avançados (idades de 5 e 5,25 anos), próximos à idade de rotação, quando há interesse na estimativa de volume com maior acurácia, demonstrando que os modelos tradicionais ajustados por povoamento são adequados, porém com esforços na realização da cubagem maiores em que, são cubadas em média 50 árvores.

**Tabela 3.** Equações ajustadas para a base de ajuste (605 árvores) e para a base de dados de calibração (66 árvores), pelo método tradicional e as estatísticas utilizadas para comparação ( $R^2$ , *Syx* e *Syx* %), para os grupos de povoamento, parcela e para o geral dos plantios comerciais de acácia negra, localizados no Rio Grande do Sul.

Idade (povoamento)	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$R^2$	<i>Syx</i>	<i>Syx</i> %
605 árvores						
1	-8,462	1,256	0,629	0,940	0,0001	12,63
1,75	-9,777	1,736	1,102	0,980	0,0012	6,66
1,83	-9,374	1,807	0,858	0,978	0,0011	7,36
2,33	-9,529	1,892	0,859	0,979	0,0046	7,11
2,75	-9,501	1,945	0,829	0,990	0,0019	5,27
3,08	-9,533	2,049	0,724	0,973	0,0031	8,97
5	-10,086	1,715	1,225	0,982	0,0053	6,52
5,25	-9,668	1,979	0,844	0,992	0,0040	5,18
5,75	-9,957	1,748	1,146	0,988	0,0069	6,24
9,83	-9,895	1,848	1,038	0,983	0,0122	9,14
10,08	-9,555	1,929	0,866	0,986	0,0097	8,05
10,75	-9,551	1,876	0,902	0,987	0,0075	6,39
Tradicional				0,992*	0,0057*	8,55*
66 árvores						
1	-8,447	1,031	0,759	0,888	0,0001	17,40
1,75	-9,671	1,925	0,906	0,788	0,0048	22,20
2,33	-11,004	1,600	1,696	0,984	0,0043	5,35
5	-10,794	1,542	1,655	0,993	0,0026	4,17
9,83	-10,407	1,823	1,245	0,993	0,0072	4,85
Tradicional				0,997*	0,0040*	7,39*

$\hat{\beta}_0$ ,  $\hat{\beta}_1$  e  $\hat{\beta}_2$  são os coeficientes da equação,  $R^2$  é o coeficiente de determinação, *Syx* é o erro padrão da estimativa em metros (m<sup>3</sup>) e *Syx* % é o coeficiente de variação (%). \* A média dos valores de  $R^2$ , *Syx* e *Syx* % foi calculado após o ajuste em cada povoamento.

### Modelo de volume ajustado pelo efeito fixo da equação mista

As matrizes de variância/covariância (D) para o nível povoamento  $\begin{pmatrix} 0,1634 & -0,1390 \\ -0,1390 & 0,1184 \end{pmatrix}$  e para o nível

parcela dentro do povoamento  $\begin{pmatrix} 0,1768 & -0,0017 \\ -0,0017 & 0,0017 \end{pmatrix}$ , e de erro (R = 0,0061) utilizadas na calibração da equação mista demonstram que os valores da matriz variância/covariância entre os

povoamentos são maiores que os valores entre as parcelas, sugerindo que a adição deste último cluster (parcela) não é justificável para o presente trabalho uma vez que, as parcelas estão alocadas em condições de plantios e tratos silviculturais similares (Qi et al., 2020).

As estatísticas do ajuste pelo efeito fixo do modelo misto e pelo método tradicional revelaram que os valores do ajuste tradicional ( $R^2= 0,992$  e  $0,997$ ,  $Syx \% = 8,559$  e  $7,399 \%$ ) foram superiores aos obtidos no efeito fixo do modelo misto ( $R^2= 0,981$  e  $0,993$ ,  $Syx \% = 13,249$  e  $13,227 \%$ ) para ambas as bases de

dados (Tabela 4). É notável que o modelo tradicional ajustado para cada povoamento apresentou maior acurácia que o modelo fixo ajustado para todas os povoamentos; esse resultado ressalta a existência de agrupamentos entre os grupos de povoamento. Outros trabalhos reforçaram esses resultados, como o de Abreu (2020), que detectou resultados melhores nos modelos mistos quando comparados àqueles apenas com efeito fixo, na estimativa de volume das árvores em uma floresta nativa em Minas Gerais, Brasil.

**Tabela 4.** Equações ajustadas pelo efeito fixo do modelo misto para toda a base de dados e as estatísticas utilizadas para sua comparação com a equação tradicional geral dos plantios comerciais de acácia negra, localizados no Rio Grande do Sul.

		$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$R^2$	$Syx$	$Syx \%$
605 árvores	Tradicional				0,992	0,0057	8,55
	Fixo	-9,454	1,794	0,922	0,881	0,0089	13,24
66 árvores	Tradicional				0,997	0,0040	7,39
	Fixo				0,993	0,0070	13,22

$\hat{\beta}_0$ ,  $\hat{\beta}_1$  e  $\hat{\beta}_2$  são os coeficientes da equação,  $R^2$  é o coeficiente de determinação,  $Syx$  é o erro padrão da estimativa em metros ( $m^3$ ) e  $Syx \%$  é o coeficiente de variação (%).

#### Calibração da equação mista

Nesta calibração a base de dados utilizada foi de 66 árvores, separadas aleatoriamente por grupos de povoamento e parcela. As diferenças em porcentagem relativa entre as estatísticas utilizadas em cada calibração e do efeito fixo para o método tradicional revelaram que as diferenças de  $R^2$  foram abaixo de 5% e os valores de  $Syx \%$  ficaram acima de 5% no efeito fixo da equação mista (9,83 anos), na calibração 7A (2,33 anos) e na idade 1 ano em todas as calibrações no efeito fixo, reforçando os resultados encontrados nas outras abordagens.

A equação calibrada pelo método selecionado (3A) (Tabela 5) revelou valores de  $R^2$  que variaram de 0,79 a 0,99 e de  $Syx \%$  que variaram de 4,67 a 24,14 %. Os valores apresentados na equação calibrada geral ( $R^2= 0,997$  e  $Syx \% = 8,74 \%$ ) foram melhores quando comparados aos obtidos no efeito fixo ( $R^2= 0,993$  e  $Syx \% = 13,23 \%$ ) e semelhantes ao ajuste tradicional ( $R^2= 0,998$  e  $Syx \% = 7,4 \%$ ), com uma diferença de apenas 0,1 % para o  $R^2$  e 15 % para o  $Syx \%$ .

Os valores dos coeficientes dos grupos de povoamento ( $\hat{b}_1$  e  $\hat{b}_2$ ) realçaram as relações existentes nos povoamentos, em que as correlações foram crescentes para o diâmetro à altura do peito ( $\hat{b}_1$ ) e decrescentes para a altura total ( $\hat{b}_2$ ), uma vez que, as

árvores tendem a crescer primeiramente em altura ( $\hat{b}_2$ ) e depois em  $DAP$  ( $\hat{b}_1$ ), diminuindo os valores associados à altura e aumentando os valores associados ao diâmetro (KING, 2011). Os coeficientes das parcelas ( $\hat{b}_{12}$  e  $\hat{b}_{22}$ ) apresentaram valores menores (-0,006 a 0,005), indicando que estas influenciaram pouco na calibração da equação. Este fato acontece porque as parcelas do presente estudo estão em condições de plantios e tratos silviculturais semelhantes (de SOUZA VISMARA et al., 2016). Resultados contrários foram encontrados por Bouriaud et al. (2019), em que o ganho no uso de efeitos aleatórios foi maximizado, pois os talhões usados para calibração foram amostrados em locais com condições de cultivo muito diferentes. Os coeficientes  $\hat{b}_1$ ,  $\hat{b}_2$ ,  $\hat{b}_{12}$  e  $\hat{b}_{22}$  não apresentaram uma variação sistemática entre os povoamentos, ressaltando a necessidade de adicionar os povoamentos como um efeito aleatório.

Os gráficos de dispersão dos volumes observados e estimados pelos métodos tradicionais, efeito fixo e equação mista calibrada (3A) apresentados na Figura 3A reforçaram que as estimativas efetuadas pela equação tradicional e pela equação mista calibrada se aproximam à medida que a idade do povoamento aumenta e que as duas estimativas permanecem próximas aos dados observados.

**Tabela 5.** Equações ajustadas pela equação mista calibrada (3A) para os grupos de povoamento, da parte fixa e as estatísticas utilizadas para comparação, pelo método tradicional, para a parte fixa e para toda a base calibrada pelo método 3A das parcelas selecionadas para calibração dos plantios comerciais de acácia-negra, localizados no Rio Grande do Sul.

Grupo	Idade	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{b}_1$	$\hat{b}_2$	$\hat{b}_{12}$	$\hat{b}_{22}$	$R^2$	Syx %
1	1	-9,45	1,79	0,92	-0,33	0,29	-0,02	0,02	0,79	24,14
2	1,75	-9,45	1,79	0,92	0,13	-0,11	0,01	-0,01	0,79	22,06
3	2,33	-9,45	1,79	0,92	-0,01	0,01	-0,002	0,002	0,97	6,83
4	5	-9,45	1,79	0,92	-0,009	0,007	0,001	-0,001	0,99	4,67
5	9,83	-9,45	1,79	0,92	0,16	-0,14	0,005	-0,006	0,99	5,56
Trad.									0,998	7,40
Fixo		-9,45	1,79	0,92					0,993	13,23
Calib.									0,997	8,74

$\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1$  e  $\hat{\beta}_2$  são os coeficientes fixos da equação,  $\hat{b}_1, \hat{b}_2, \hat{b}_{12}$  e  $\hat{b}_{22}$  são os coeficientes aleatórios da equação,  $R^2$  é o coeficiente de determinação e Syx % é o coeficiente de variação (%).

Já os volumes estimados pelo efeito fixo se afastam da equação tradicional à medida que o povoamento envelhece. Na Figura 3B estão apresentados os resíduos dos ajustes da equação tradicional, do efeito fixo e da equação calibrada, com valores variando de -0,04 a 0,04 m<sup>3</sup>, revelando que a equação tradicional e a equação mista calibrada apresentam a mesma tendência na distribuição de resíduos e que o efeito fixo apresenta resíduos mais dispersos (subestimando os valores).

Resultados semelhantes foram encontrados por Sharma & Breidenbach (2015), os quais apresentaram em seu trabalho que, a utilização de uma ou duas árvores na calibração de uma equação mista hipsométrica pode funcionar adequadamente em povoamentos homogêneos, já Adamec et al. (2019), ajustaram e calibraram uma equação mista para estimar o volume de árvores *Picea abies*. Estes autores ajustaram uma equação de afilamento e obtiveram valores mais precisos, quando a calibração foi realizada com medições do diâmetro superior em duas alturas (5 e 7 m) simultaneamente.

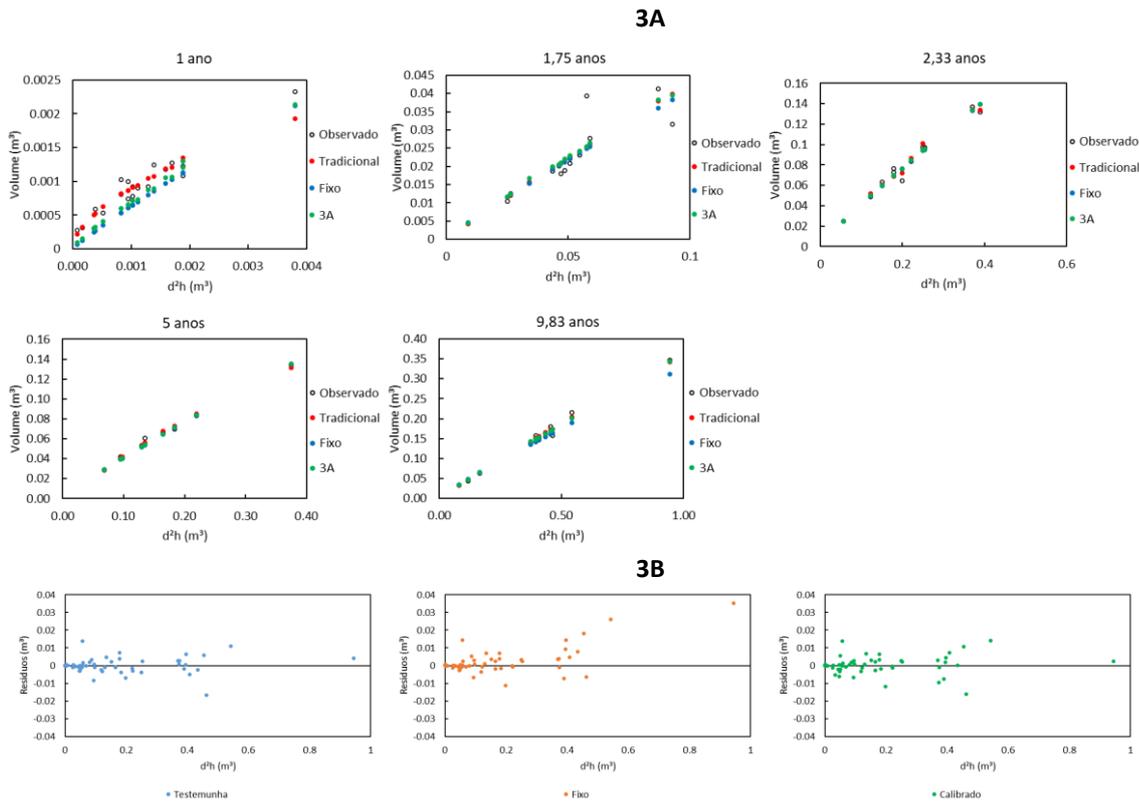
É importante destacar também que a acurácia da calibração depende do número e tamanho das árvores escolhidas (SHARMA et al., 2017). Em algumas situações, a utilização de mais árvores na calibração pode melhorar as estimativas, como na calibração 5A (com as cinco maiores árvores em *dap*) no povoamento com cinco anos neste trabalho, em que a diferença relativa entre os métodos tradicional e calibrado foi  $R^2= 0,00$  e Syx %= 0,09 %, contudo, a cubagem é uma operação que demanda tempo, é onerosa e uma avaliação de custos é necessária (YANG et al., 2020).

As perguntas efetuadas neste trabalho estão respondidas a seguir:

- A calibração do modelo misto de volume produz estimativas adequadas e semelhantes à abordagem tradicional (em que são cubadas muitas árvores)? Sim, na calibração do modelo misto de volume foram apresentados resultados semelhantes aos obtidos pela modelagem tradicional, possibilitando uma redução de 94% na amostragem em novos povoamentos.
- Quantas e quais árvores devem ser amostradas para calibrar as equações de volume? Foi necessária a amostragem de três árvores (3A), sendo estas as maiores árvores em *dap* de cada grupo de povoamento.
- Quais níveis de cluster devem ser estabelecidos? Apenas o agrupamento de povoamento apresentou resultados satisfatórios para os dados do presente trabalho. A calibração em nível de povoamento e parcela não revelou ganhos consideráveis na acurácia.

## CONCLUSÃO

O método da modelagem mista calibrada para a estimativa de volume é eficiente e comprova a existência de clusters no povoamento. A calibração das equações mistas com apenas três árvores possibilita a obtenção de estimativas próximas das encontradas na aplicação do método tradicional (cubagem de várias árvores na parcela), principalmente nos povoamentos próximos da idade de rotação, em que seriam cubadas em média, 50 árvores, revelando a redução de 94% na cubagem em novos povoamentos. Já a utilização dos agrupamentos por parcelas dentro dos povoamentos não apresenta melhorias relevantes na calibração do volume.



**Figura 3. A.** Dispersão do volume observado ( $m^3$ ) e dos volumes estimados ( $m^3$ ) pelos: método tradicional, efeito fixo e equação mista calibrada (3A), em função da variável combinada  $d^2h$  ( $m^3$ ) das parcelas selecionadas para calibração nos plantios comerciais de 670 árvores de acácia negra, localizados no Rio Grande do Sul. **3B.** Gráficos de resíduos das equações tradicional (testemunha), do efeito fixo e da equação calibrada para os dados de validação (66 árvores) nos plantios comerciais de acácia-negra, localizados no Rio Grande do Sul.

## AGRADECIMENTOS

Os autores agradecem o apoio da CAPES por meio da concessão de bolsa de pesquisa e também as empresas TANAGRO S.A. e TANAC S.A. pela oportunidade da coleta da base de dados e pelo conhecimento fornecido.

## REFERÊNCIAS

ABREU, J.C. de. Alternatives to estimate the volume of individual trees in forest formations in the State of Minas Gerais. *Cerne*, v.26, n.3, p.393-402, 2020.

ADAMEC, Z. et al. Evaluation of different calibration approaches for merchantable volume predictions of Norway spruce using nonlinear mixed effects model. *Forests*, v.10, n.12, p.1104, 2019.

BOURIAUD, O. et al. Comparing local calibration using random effects estimation and Bayesian calibrations: a case study with a mixed effect stem profile model. *Annals of Forest Science*, v.76, n.3, p.65, 2019.

BURKHART, H.E.; TOMÉ, M. **Modeling forest trees and stands**. Springer Science & Business Media, 2012.

CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 5.ed. Viçosa: UFV, 2017.

CHAN, J.M. et al. *Acacia mearnsii* industry overview: current status, key research and development issues. *Southern Forests: a Journal of Forest Science*, v.77, n.1, p.19-30, 2015.

CHEN, J. et al. Using machine learning to synthesize spatiotemporal data for modelling DBH-height and DBH-height-age relationships in boreal forests. *Forest Ecology and Management*, v 466, p.118104, 2020.

DE AZEVEDO, G.B. et al. Estimativas volumétricas em povoamentos de Eucalipto sob regime de alto fuste e talhadia no sudoeste da Bahia. *Pesquisa Florestal Brasileira*, v.31, n.68, p.309, 2011.

DE AZEVEDO, G.B. et al. Multi-volume modeling of *Eucalyptus* trees using regression and artificial neural networks. *PLoS one*, v.15, n.9, p.e0238703, 2020.

FORD, K.R. et al. Competition alters tree growth responses to climate at individual and stand scales. *Canadian Journal of Forest Research*, v.47, n.1, p.53-62, 2017.

- FORTIER, J. et al. Allometric equations for estimating compartment biomass and stem volume in mature hybrid poplars: General or site-specific? **Forests**, v.8, n.9, p.309, 2017.
- HAN, Y. et al. Determining an accurate and cost-effective individual height-diameter model for Mongolian Pine on Sandy Land. **Forests**, v.12, n.9, p.1144, 2021.
- HAO, X. et al. Linear mixed-effects models to describe individual tree crown width for China-Fir in Fujian Province, Southeast China. **PLOS ONE**, v.10, n.4, p.e0122257, 2015.
- HIGA, R.C.V. et al. **Acácia negra. Agrometeorologia dos cultivos: o fator meteorológico na produção agrícola**. 1.ed. Brasília: Instituto Nacional de Meteorologia, 2009.
- KING, D.A. Size-related changes in tree proportions and their potential influence on the course of height growth. **Size-and age-related changes in tree structure and function**. Dordrecht: Springer, 2011.
- LIU, J. Classification of tree species and stock volume estimation in ground forest images using Deep Learning. **Computers and Electronics in Agriculture**, v.166, p.105012, 2019.
- MALTAMO, M. et al. Predicting and calibrating tree attributes by means of airborne laser scanning and field measurements. **Canadian Journal of Forest Research**, v.42, n.11, p.1896-1907, 2012.
- MIGUEL, E.P. et al. Alternative methods of scaling *Eucalyptus urophylla* trees in forest stands: compatibility and accuracy of volume equations. **IForest-Biogeosciences and Forestry**, v.11, n.2, p.275, 2018.
- MOCHIUTTI, S. **Produtividade e sustentabilidade de plantações de acácia-negra (*Acacia mearnsii* De Wild.) no Rio Grande do Sul**. 2007. 270p. (Tese de Doutorado).
- MOTALLEBI, A.; KANGUR, A. Are allometric relationships between tree height and diameter dependent on environmental conditions and management? **Trees**, v.30, n.4, p.1429-1443, 2016.
- OU, G. et al. Incorporating topographic factors in nonlinear mixed-effects models for aboveground biomass of natural Simao Pine in Yunnan, China. **Journal of Forestry Research**, v.27, n.1, p.119-131, 2016.
- PÉLLICO, S.; BEHLING, A. Rational volumetric models: tested in forest stands of *Acacia mearnsii* De Wild in Southern Brazil. **Cerne**, v.25, p.491-505, 2020.
- PINHEIRO, J.C.; BATES, D.M. **Mixed-effects models in S and S-PLUS**. Nova York: Springer-Verlag, 2000.
- QI, Y.J. et al. Application of spatial regression models for forest biomass estimation in Guizhou province, Southwest China. **Applied Ecology and Environmental Research**, v.18, n.5, p.7215-7232, 2020.
- RESENDE, M.D.V. de. Software Selegen-REML/BLUP: a useful tool for plant breeding. **Crop Breeding and Applied Biotechnology**, v.16, n.4, p.330-339, 2016.
- SCHUMACHER, F.X.; HALL, F.S. Logarithmic expression of timber-tree volume. **Journal of Agricultural Research**, v.47, p.719-734, 1933.
- SHARMA, R.P. et al. Modelling individual tree height to crown base of Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) and European beech (*Fagus sylvatica* L.). **PloS One**, v.12, n.10, p.e0186394, 2017.
- SHARMA, R.P.; BREIDENBACH, J. Modeling height-diameter relationships for Norway spruce, Scots pine, and Downy birch using Norwegian national forest inventory data. **Forest Science and Technology**, v.11, n.1, p.44-53, 2015.
- VER PLANCK, N.R.; MACFARLANE, D.W. Modelling vertical allocation of tree stem and branch volume for hardwoods. **Forestry: An International Journal of Forest Research**, v.87, n.3, p.459-469, 2014.
- DE SOUZA VISMARA, E. et al. Linear mixed-effects models and calibration applied to volume models in two rotations of *Eucalyptus grandis* plantations. **Canadian Journal of Forest Research**, v.46, n.1, p.132-141, 2016.
- XIANG, W. et al. Effects of stand age on tree biomass partitioning and allometric equations in Chinese Fir (*Cunninghamia lanceolata*) plantations. **European Journal of Forest Research**, p.1-16, 2021.
- YANG, X.Z. et al. Effects of intraspecific competition on growth, architecture, and biomass allocation of *Quercus liaotungensis*. **Journal of Plant Interactions**, v.14, n.1, p.284-294, 2019.
- YANG, Z. et al. Nonlinear mixed-effects height to crown base model based on both airborne LiDAR and field datasets for *Picea crassifolia* Kom trees in northwest China. **Forest Ecology and Management**, v.474, p.118323, 2020.

Recebido em 02-11-2021 Aceito em 17-01-2022

## APÊNDICE I

```
PROC MIXED COVTEST maxiter=3000;          1
CLASS idade parcela;                      2
MODEL lnb = lnd lnh / solution;           3
RANDOM lnd lnh / SUB=idade g v TYPE=un ;   4
RANDOM lnd lnh / SUB=parcela (idade) g v TYPE=un ;
run;
```

em que:

1 - COVTEST = gera resultados de teste de hipóteses para os componentes de variância e covariância (também conhecidos como efeitos aleatórios).

2 - CLASS = indica as variáveis de agrupamento, no presente estudo será povoamento (representado por idade) e parcela.

3 - MODEL = especifica os efeitos fixos a serem incluídos no modelo, no presente estudo serão as variáveis independentes na forma logarítmica (lnd e lnh).

4 - RANDOM = especifica os efeitos aleatórios a serem estimados, no presente estudo serão as variáveis independentes na forma logarítmica (lnd e lnh). SUB = corresponde ao cluster. Especificamente, neste estudo: sub= idade ou sub= parcela (idade), ordena ao SAS que estime cada um dos efeitos aleatórios, dentro do nível 2 (sub= idade) e do nível 3 [sub= parcela (idade) ] e as componentes de variância resultantes são estimativas da variação das respostas médias subjacentes entre as unidades de nível 2 e 3.

TYPE = especifica qual a estrutura de covariância (matriz G) a utilizar ao estimar os efeitos aleatórios. No presente estudo, TYPE = un, pois este TYPE é útil para modelos de coeficientes aleatórios correlacionados.