

MODELOS ALOMÉTRICOS PARA PREDIÇÃO DA BIOMASSA EM *Eucalyptus benthamii* (Maiden & Cambage)

ALLOMETRIC MODEL FOR BIOMASS PREDICTION IN *Eucalyptus benthamii* (Maiden & Cambage)

Darcy Maria da Conceição Laura dos Santos¹, Carlos Roberto Sanquetta², Allan Libanio Pelissari³, Ana Paula Dalla Corte⁴

¹Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil – darcy_mclaurasantos@hotmail.com

²Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil – sanquetta@ufpr.br

³Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil – allanpelissari@gmail.com

⁴Universidade Federal do Paraná, Curitiba, Paraná, Brasil – anacorte@ufpr.br

RESUMO

Em decorrência ao aquecimento global, novas alternativas de produção de energia renovável vêm sendo procuradas, entre elas, a produção de biomassa vegetal oriunda de florestas plantadas. Nesse contexto, o objetivo deste estudo foi ajustar modelos alométricos para estimar a produção de biomassa de árvores de *Eucalyptus benthamii* Maiden e cambage. Os dados utilizados no estudo são provenientes de 47 árvores, as quais foram amostradas por meio do método destrutivo, em povoamentos da mesorregião centro-sul do Paraná, Brasil. Após a determinação da biomassa seca, realizou-se a estimativa das biomassas da copa, do fuste e total, foram ajustados três modelos lineares estatísticos: Husch, Spurr e Schumacher-Hall. Após os ajustes, a qualidade dos modelos foi avaliada por meio do coeficiente de determinação ajustado, erro padrão da estimativa percentual e análise gráfica residual. Os pressupostos da regressão foram avaliados por meio dos testes de normalidade de Shapiro-Wilk e teste de homoscedasticidade de Breusch-Pagan. Para a biomassa da copa e do fuste, o modelo de Schumacher-Hall não apresentou significância nos testes de Shapiro-Wilk e de Breusch-Pagan, resultando em resíduos com distribuição normal e homocedásticos. Para a biomassa total, os modelos de Husch e de Schumacher-Hall não apresentaram significância para os testes avaliados, tendo distribuição normal e homocedasticidade. Nas análises gráficas, os resíduos apresentaram-se distribuídos ao longo da linha regressão. Assim, o modelo de Schumacher-Hall foi o recomendado para a estimativa da biomassa de indivíduos de *E. benthamii*, por apresentar alto valor de $R^2_{aj.}$, com baixo erro padrão e distribuição dos resíduos sem tendência e homogêneo.

PALAVRAS-CHAVE: Modelos estatísticos, Regressão, Schumacher-Hall.

ABSTRACT

Facing the problem of global warming, news alternatives for renewable energy production have been searched for, among them, the production of vegetable biomass from planted forests. In this context, the aim of this study was to fit allometric models to estimate the tree biomass production of *Eucalyptus benthamii* species. The data used in the study came from 47 trees, which were sampled using the destructive method in stands in the south-central mesoregion of Paraná, Brazil. After determining the dry biomass, the crown, stem and total biomasses were estimated and three statistical linear models were adjusted: Husch, Spurr, and Schumacher-Hall. After the fits, the models were evaluated by the adjusted coefficient of determination, standard error of estimate in percentage, Shapiro-Wilk normality test, Breusch-Pagan homoscedasticity test, and residual graph analysis. From crown and stem biomass, Schumacher-Hall model did not show significance in Shapiro-Wilk and Breusch-Pagan tests, resulting in residues with normal distribution and homoscedasticity. For total biomass, Husch and Schumacher-Hall models were not significant for the evaluated tests, with normal distribution of residuals and homoscedasticity. In the graphical analyses, the residuals were distributed along the regression line. Thus, the Schumacher-Hall model was recommended for estimating the biomass of *E. benthamii* individuals.

KEYWORDS: Statistical models, Regression, Schumacher-Hall.

INTRODUÇÃO

No decorrer dos últimos anos, a procura por fontes de energia renováveis vem aumentando em todo o mundo, tanto para reduzir a utilização de combustíveis fósseis, como para diminuir a emissão de gases do efeito estufa - GEE (BORGES et al., 2016; SANQUETTA et al., 2019). A utilização de biomassa vegetal como fonte de energia é uma alternativa viável, pois além de contribuir para mitigação das mudanças climáticas por meio do sequestro de carbono e da conservação da biodiversidade (ALVES et al., 2021; FREIRE; PAMPLIN, 2022; SANTOS et al., 2024), também é uma fonte segura por ser renovável e limpa por emitir poucos poluentes em comparação com combustíveis fósseis (SANQUETTA et al., 2015; RAMOS et al., 2018; RESQUIN et al., 2018).

De acordo com a avaliação realizada em 2020 pela Organização da Nações Unidas para Alimentação e Agricultura (FAO), tem-se um total de 294 milhões de hectares de florestas plantadas no mundo. Nesse cenário, o Brasil vem se destacando pelo seu progresso, de acordo com o relatório publicado pelo Plano Nacional de Desenvolvimento de Florestas Plantadas (PNDF, 2024), em 2022, o país teve cerca de 10 milhões de hectares de florestas cultivadas, representando um aumento de 0,3% em comparação com a área do ano anterior, 2021.

No contexto da produtividade florestal, o Brasil se destaca por ser um líder global, cultivando principalmente os gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*. O eucalipto tem média de produção de 32,7 m³/ha/ano e rotação de 6,7 anos, enquanto o pinus tem média de produção de 30,9 m³/ha/ano e rotação de 16,3 anos (IBÁ, 2023).

Segundo o relatório publicado pela Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ, 2021), o gênero *Eucalyptus* ocupa 78% da área de plantios florestais, sendo a cultura mais plantada em todo o país, totalizando aproximadamente 7,5 milhões de hectares. O eucalipto é uma das principais fontes renováveis para a produção de biomassa de madeira, celulose e bioenergia (SCHMIT et al., 2015; MORA; ARRIAGADA, 2016). O sucesso do eucalipto no Brasil é possível pela sua alta capacidade adaptativa às condições edafoclimáticas, visto que o país apresenta uma grande diversidade de climas e solos (OBERSCHELP et al., 2022).

Nesse sentido, a espécie *Eucalyptus benthamii* (Maiden & Cambage) tem sido estudada como uma alternativa para produção de madeira para celulose, carvão e lenha, em razão da tolerância às baixas temperaturas (FRIGOTTO et al., 2020; HALL et al., 2020; OBERSCHELP et al., 2020; RESQUIN et al., 2020; SILVA et al., 2022).

Porém, para utilizar o *Eucalyptus benthamii* como fonte de energia, torna-se necessário estimar o estoque de biomassa presente (SANQUETTA et al., 2019; DIVYA et al., 2022). Para isso, existem duas abordagens para realizar essa estimativa, podendo ser pela aplicação de fatores de expansão da biomassa (BEFs) e por equações de estimativa de biomassa (OLIVEIRA et al., 2019). Essa última abordagem, com auxílio de modelos alométricos, onde se desenvolvem relações empíricas entre a biomassa e alguma variável de fácil obtenção, como o diâmetro à altura do peito medido a 1,3 m do solo (d) e a altura total (h) (RESQUIN et al., 2018, HIRIGOYEN et al., 2021).

A utilização de equações alométricas para estimar a biomassa por árvore está sujeito a ocorrência de variações na precisão (ROXBURGH et al., 2015). A confiabilidade dessas equações depende da qualidade dos dados usados para sua criação, da representatividade da amostra e das características únicas da espécie florestal em análise. Geralmente, essas equações são desenvolvidas com base em medições de diâmetro e altura das árvores, com o objetivo de prever sua biomassa (SCHIKOWSKI et al., 2013). Podendo ser impactada por diversos fatores como idade das árvores, condições ambientais e variabilidade genética (ROMERO et al., 2020; KARYATI et al., 2021; SADONO et al., 2022).

É fundamental validar as equações alométricas em diferentes conjuntos de dados e em contextos variados para avaliar sua robustez e precisão. A criação de equações específicas para cada espécie florestal em estudo e a consideração de fatores locais podem melhorar consideravelmente a precisão das estimativas de biomassa por árvore (ROXBURGH et al., 2015; PAUL et al., 2018). Neste contexto, este estudo tem por objetivo ajustar modelos alométricos para estimar a produção de biomassa de indivíduos da espécie *Eucalyptus benthamii* (Maiden & Cambage) no estado do Paraná, região Sul do Brasil.

MATERIAL E MÉTODOS

Área de estudo

Foram utilizados os dados obtidos de plantios de *Eucalyptus benthamii* (Maiden & Cambage) da mesorregião centro-sul do Paraná, situada entre as latitudes de 22° e 26° S e longitudes 50° e 53° O. Os indivíduos estudados abrangem povoamentos de diferentes idades e sítios.

De acordo com a classificação de Köppen, o Paraná tem dois tipos de clima: o Cfa, encontrado nas regiões do litoral, norte, oeste e parte do centro e sudoeste, que tem como

característica verão quente e com concentração de chuvas, e geadas pouco frequentes. Nas regiões sul, metropolitana de Curitiba, parte do centro e sudoeste, o Cfb clima é o predominante, com verões frescos e sem estação seca definida (Alvares, 2013).

Coleta dos dados

Os dados utilizados foram obtidos de 47 árvores, com idades entre 2 e 30 anos (Tabela 1).

Tabela 1. Distribuição da frequência das árvores por classes de diâmetro e altura para *Eucalyptus benthamii*.

Classes de diâmetro (cm)	Classes de altura total (m)						
	12-15	15-18	18-21	21-24	24-27	27-30	30-33
13-18	1	2	0	2	0	1	0
18-23	0	1	1	1	1	0	2
23-28	0	0	1	3	4	1	5
28-33	0	0	0	1	4	2	1
33-38	0	0	1	0	5	2	1
38-43	0	0	0	0	1	3	0

As árvores foram amostradas por meio do método destrutivo e selecionadas aleatoriamente dentro da região de abrangência. A medição do diâmetro a 1,3 m do solo (d) foi realizada com a árvore em pé, enquanto a altura total (h) foi mensurada com a árvore derrubada e uma trena. Em seguida, foi realizada a separação da biomassa por compartimentos (folhas, galhos, casca e lenho) e realizada a sua pesagem com balança de capacidade de 200 kg. Foram coletadas amostras para avaliação do teor de umidade e respectivo cálculo da biomassa seca dos compartimentos. Para determinação do teor de umidade (U) foi realizada a pesagem da amostra antes e depois da secagem em estufa, posteriormente foi realizado o cálculo de teor de umidade (Equação 1). Após encontrado o teor de umidade da amostra, foi feito a extrapolação para toda a árvore, com intuito de obter a biomassa seca, essas etapas foram realizadas para cada compartimento.

$$U(\%) = \frac{\text{Peso Inicial da Amostra} - \text{Peso Final da Amostra}}{\text{Peso Inicial da Amostra}} \times 100 \text{ (Equação 1)}$$

A biomassa seca da copa foi obtida por meio da soma da biomassa seca das folhas e dos galhos. A biomassa seca do fuste foi realizada por meio do somatório da biomassa

seca do lenho com a casca, enquanto a biomassa total foi determinada pela biomassa seca de todos os compartimentos (lenho, casca, galhos e folhas).

Análise exploratória dos dados e Modelos estatísticos

Na análise do coeficiente de variação (cv%) entre as variáveis estudadas, utilizou como classificação da variabilidade os seguintes valores: cv < 10%, baixo; 10% ≤ cv < 20%, médio; 20% ≤ cv < 30%, alto; cv ≥ 30%; muito alto (PIMENEL, 2009).

Para análise da correção linear de Pearson entre as variáveis estudadas, adotou-se a avaliação qualitativa quanto à intensidade proposto por Callegari-Jacques (2009), sendo: r = 0 correlação nula; 0 < r < 0,3, fraca; 0,3 ≤ r < 0,6, regular; 0,6 ≤ r < 0,9, forte; 0,9 ≤ r < 1,0, muito forte e r = 1, plena e perfeita.

Para estimar a biomassa da copa, fuste e total, foram utilizados três modelos estatísticos: (1) Husch, (2) Spurr e (3) Schumacher-Hall (Tabela 2). Esses modelos foram escolhidos por serem mais adequados e versátil para estimativa de biomassa (AZEVEDO et al., 2011; FERRARI et al., 2017; LIMA et al., 2020.).

Tabela 2. Modelos estatísticos empregados na estimativa da biomassa em *Eucalyptus benthamii*.

Modelos	Autor
(1) $\ln(w) = \beta_0 + \beta_1 \ln(d)$	Husch
(2) $w = \beta_0 + \beta_1(d^2h)$	Spurr
(3) $\ln(w) = \beta_0 + \beta_1 \ln(d) + \beta_2 \ln(h)$	Schumacher-Hall

Em que: w = biomassa, em kg; d = diâmetro a 1,3 m do solo, em cm; h = altura total, em m; ln = logaritmo neperiano; β₀, β₁ e β₂ = coeficientes de regressão do modelo.

O modelo 1 tem como variável independente o diâmetro, ao passo que os modelos 2 e 3 possuem o diâmetro e a altura total como variáveis independentes (Tabela 2). Para corrigir os ajustes que apresentarem heterocedasticidade, a regressão linear ponderada foi aplicada com o inverso da biomassa estimada como peso. Ademais, também aplicou o inverso do quadrado da biomassa estimada.

Os modelos foram avaliados por meio dos parâmetros estatísticos de coeficiente de determinação ajustado (R²aj) e erro padrão da estimativa percentual (Syx%), a fim de determinar o desempenho e selecionar o melhor modelo. Para os modelos logarítmicos de Husch e Schumacher-Hall,

foi utilizado o Fator de correção de Mayer, a fim de mitigar a discrepância logarítmica.

Os resíduos foram avaliados quanto às condicionantes de normalidades e homocedasticidade, respectivamente por meio dos testes de hipótese de Shapiro-Wilk e Breusch-Pagan, ambos ao nível de 1% de probabilidade. Após a realização do ajuste dos diferentes modelos, foi possível escolher o modelo que melhor representou cada compartimento de biomassa, bem como para o total, tendo como base, também, a análise das estatísticas e dos gráficos de dispersão de resíduos.

RESULTADOS E DISCUSSÃO

Na Tabela 3, encontram-se as medidas descritivas para as variáveis de diâmetro a 1,3 m (*d*), altura total (*h*) e biomassas da copa, fuste e total de árvores de *Eucalyptus benthamii*. O fuste apresentou maior participação na biomassa acima do solo total individual, contribuindo com 79,4%, sucedendo a copa, com 20,6% da biomassa total.

Tabela 3. Estatísticas descritivas para variáveis dendrométricas e para a biomassa dos compartimentos do povoamento de *E. benthamii*.

Variável	Mín	Méd	Máx	CV%
d (cm)	13,81	27,91	42,65	26,85
h (m)	12,33	25,23	33,00	18,00
BC (kg)	6,10	80,50	243,86	79,49
BF (kg)	34,80	309,50	623,77	51,27
BT (kg)	50,47	389,87	867,63	54,85

Em que: d = diâmetro a altura do peito; h = altura total; BC = Biomassa da Copa; BF = Biomassa do Fuste; BT= Biomassa Total; CV% = coeficiente de variação em porcentagem.

Na análise do coeficiente de variação (cv%), a variável *h* apresentou um cv médio, o *d* com cv alto e as biomassas com cv muito alto, segundo a classificação proposta por PimeneL (2009). Os valores de coeficiente de variação (cv%) para as biomassas foram altos, sendo que a biomassa de copa apresentou valores superiores às outras variáveis. Isso indica elevada variabilidade dos dados (PIMENTEL-GOMES e GARCIA, 2002; LOPES et al., 2021). Analisando os valores mínimos, médios e máximos, foi possível verificar uma elevada variação dos dados (Tabela 3). Essa variabilidade pode estar correlacionada às diferentes idades e sítios dos povoamentos amostrados.

A biomassa da copa apresentou forte correlação com a variável diâmetro a 1,30m ($r=0,89$), segundo a classificação proposta por Callegari-Jacques (2009). A correlação entre as biomassas do fuste e total com a variável diâmetro a 1,3 m foram muito forte ($r=0,94$; $r=0,96$, respectivamente). O mesmo não pode ser observado na relação com a altura total, em que a biomassa da copa apresentou fraca correlação ($r=0,22$), a biomassa total gerou correlação regular ($r=0,55$) e a biomassa do fuste resultou em correlação forte ($r=0,66$). A variável diâmetro a 1,3 m e altura total tiveram correlação regular ($r=0,45$). A biomassa total apresentou correlação muito forte para as biomassas da copa e do fuste ($r=0,90$ e $r=0,98$, respectivamente).

Na estimativa da biomassa da copa, os três modelos apresentaram valores elevados de erro, enquanto para as biomassas do fuste e total, foram obtidos valores satisfatórios, sendo esses próximos de 10%. De acordo com Blujdea et al. (2012), modelos que utilizam somente o diâmetro podem apresentar resultados satisfatórios na estimativa da biomassa acima do solo, porém podem não estimar corretamente a biomassa das folhas.

Os modelos que utilizam mais de uma variável independente, como diâmetro e altura, tendem a apresentar maior precisão em relação àqueles que utilizam somente uma variável (MUGASHA et al., 2013; HIRIGOYEN et al., 2021). Bi et al. (2015) explicam que essas variáveis são preditoras para modelos alométricos e que melhoram a capacidade preditiva da biomassa. Na estimativa das biomassas do fuste e total, os modelos alométricos que utilizaram as duas variáveis apresentaram resultados mais precisos em comparação com o modelo com uma variável preditiva (LIN et al., 2017).

Para a biomassa da copa, o modelo 1 (Husch) apresentou maior coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$) e menor erro padrão da estimativa em porcentagem ($S_{xy}\%$), enquanto os modelos 2 (Spurr) e 3 (Schumacher-Hall) apresentaram valores semelhantes de $R^2_{aj.}$ e $S_{xy}\%$ (Tabela 4). No estudo realizado por Silva et al. (2004), ao estimar biomassa para *Eucalyptus benthamii* utilizando o Spurr, obtiveram $R^2_{aj.}$ de aproximadamente 0.9 e $S_{xy}\%$ inferior a 30%. Porém o povoamento utilizado por eles não apresentava uma alta variabilidade de idade e sítio.

Para a biomassa do fuste, o $S_{yx}\%$ foi inferior a 10% para o modelo 3, sendo uma estatística desejável para estimativa da biomassa. Para a biomassa total, os valores de $R^2_{aj.}$ e $S_{xy}\%$ foram semelhantes para os modelos 2 e 3. Provavelmente, esses dois modelos obtiveram resultados melhores em comparação ao modelo 1, por utilizarem duas variáveis independentes (PELLISSARI et al., 2011; SCHRODER et al., 2013).

Tabela 4. Coeficientes de regressão e estatísticas de ajuste para as biomassas da copa, do fuste e total de *E. benthamii*.

Modelo	R ² _{aj.}	S _{xy} %	p-SW	p-BP
Biomassa da copa				
1	0,78	37,65	0,844 ^{ns}	0,002*
2	0,72	42,29	0,507 ^{ns}	0,001*
3	0,71	42,93	0,228 ^{ns}	0,293 ^{ns}
Biomassa do fuste				
1	0,80	22,83	0,234 ^{ns}	0,009*
2	0,98	11,88	0,463 ^{ns}	0,006*
3	0,98	7,06	0,028 ^{ns}	0,675 ^{ns}
Biomassa total				
1	0,89	17,89	0,076 ^{ns}	0,266 ^{ns}
2	0,96	10,84	0,001*	0,001*
3	0,96	10,84	0,242 ^{ns}	0,562 ^{ns}

Em que: R²_{aj.} = coeficiente de determinação ajustado; Syx% = erro padrão da estimativa em porcentagem; p-SW = p-valor do teste de normalidade de Shapiro-Wilk; p-BP = p-valor do teste de homoscedasticidade de Breusch-Pagan; * = significativo a 1% de probabilidade; ^{ns} = não significativo.

Para a biomassa de copa, os três modelos apresentaram distribuição normal pelo teste de normalidade de Shapiro-Wilk, ao nível de 1% de probabilidade (Tabela 4). Para o teste de homoscedasticidade de Breusch-Pagan, os modelos 1 e 2 apresentaram significância ao nível de 1% de probabilidade, apresentando distribuição heterocedástica das variâncias residuais.

Para a biomassa do fuste, os três modelos não apresentaram significância pelo teste de normalidade de Shapiro-Wilk, resultando em resíduos com distribuição normal (Tabela 4). No teste de homoscedasticidade de Breusch-Pagan, os modelos 1 e 2 apresentaram significância ao nível de 1% de probabilidade, resultando em erros heterocedásticos.

Para a biomassa total, os modelos 1 e 3 não apresentaram significância para os testes de hipóteses avaliados, tendo distribuição normal e homocedasticidade. Somente o modelo 2 apresentou significância para os dois testes, gerando resíduos não normais e heterocedasticidade (Tabela 4).

Na estimativa da biomassa de copa, os três modelos foram menos precisos em relação às estimativas das biomassas de fuste e total. Isso pode estar relacionado com à variabilidade da estrutura da copa (HIRIGOYEN et al.,

2021). Segundo Cabrera-Ariza et al. (2021), a biomassa do dossel pode variar de um indivíduo para outro mesmo que apresentem diâmetro e altura semelhantes. Esse comportamento deve-se a ausência de proporcionalidade do crescimento do dossel com o do indivíduo (PARDÉ, 1980). Ademais, o resultado pode estar relacionado com a competição por luz, uma vez que a árvore, na tentativa de absorver mais radiação, tende a produzir mais massa foliar na porção superior da copa, elevando sua base e modificando sua forma (MAKELA; VANNINEN, 1998). Pela análise gráfica dos resíduos (Figura 1), pode ser observada ausência de tendências de superestimativa e subestimativa dos estoques de biomassa total e por compartimento entre os modelos selecionados.

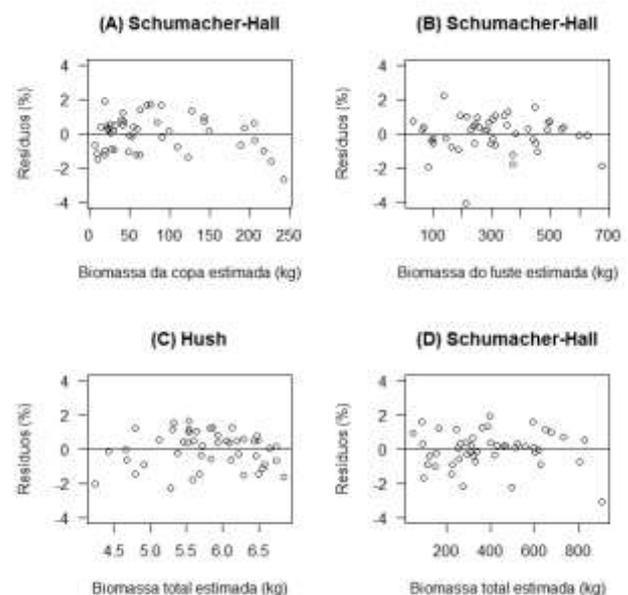


Figura 1. Distribuição dos resíduos para os diferentes compartimentos de biomassa do *E. benthamii* por meio dos modelos selecionados. Em 1(A) tem-se a biomassa da copa estimada pelo resíduo para o modelo 3. Em 1(B) tem-se a biomassa do fuste estimada pelos resíduos para o modelo 3. Em 1(C) e 1(D) têm-se a biomassa total estimada pelos resíduos, para os modelos 1 e 3, respectivamente.

De modo geral, os modelos 1 e 2 apresentaram heteroscedasticidade (Tabela 4). Apesar da aplicação da regressão linear ponderada com pesos inverso da biomassa estimada e inverso do quadrado da biomassa estimada, não foi possível corrigir as variâncias não homocedásticas. Somente o modelo 3 apresentou erros normalmente distribuídos e homocedasticidade para os três compartimentos de biomassa (Tabela 4). Esse resultado foi observado na literatura por outros autores, mostrando que esse modelo apresenta resultados

estatísticos satisfatórios para estimar a biomassa em distintos ambientes (LEITE; ANDRADE, 2003; AZEVEDO et al., 2011; MORA et al., 2014; FERRARI et al., 2017).

É possível observar que nas Figuras 1(A), 1(B), 1(C) e 1(D), os resíduos apresentaram-se distribuídos de forma homogênea ao longo da linha de regressão, indicando a qualidade das estimativas. Embora o modelo 1 tenha resultados em valores de R^2_{aj} e $S_{xy}\%$ superiores aos do modelo 2 para a biomassa total, os resíduos apresentou distribuição normal e homocedasticidade.

CONCLUSÕES

No ajuste dos modelos alométricos para estimar a produção de biomassa em indivíduos da espécie *Eucalyptus benthamii* na região centro-sul do estado do Paraná, foi observado que devido aos povoamentos terem sítios e idades muito variado, obteve-se valores altos de coeficiente de variação. Sendo recomendado para futuros trabalhos realizarem a estimativa levando por classe de diâmetro e com um maior número de indivíduos.

Sendo assim o modelo de Husch (1) apresentou resultado estatisticamente satisfatório apenas para o compartimento da biomassa total. O modelo de Spurr (2) não é recomendado para povoamentos com características semelhantes ao nesse trabalho. Portanto, o modelo de Schumacher-Hall foi o que melhor representou o estoque de biomassa da espécie em estudo, abrangendo diferentes condições de idades e sítio.

AGRADECIMENTOS

Agradecimento ao Biofix (Centro de Excelência em Pesquisa sobre Fixação de Carbono na Biomassa) e as agências de pesquisa brasileiras: CAPES (Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior) e CNPq (Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico).

REFERÊNCIAS

ALVES, D.S. et al. A Importância das Medidas de Mitigação e Adaptação Frente às Mudanças Climáticas na Agropecuária Brasileira The Importance of Mitigation and Adaptation Measures to Climate Change in Brazilian Agriculture. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 11, p. 108413-108425, 2021.

ALVARES, C.A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische zeitschrift**, v. 22, n.6, p. 711-728, 2013

AZEVEDO, T.L. et al. Equações hipsométricas e volumétricas para um povoamento de *Eucalyptus* sp. localizado na FLONA do Ibura,

Sergipe. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, Recife, v. 6, n. 1, p. 105-122, 2011.

BI, H.S. et al. Additive biomass equations based on complete weighing of sample trees for open eucalypt forest species in south-eastern Australia. **Forest Ecology and Management**, v. 349, p.106-121, 2015.

BORGES, A.C.P. et al. Energias renováveis: uma contextualização da biomassa como fonte de energia. **REDE**, Fortaleza, v.10, n.2, p. 23-36, 2017.

BLUJDEA, V.N.B. et al. Allometric biomass equations for young broadleaved trees in plantations in Romania. **Forest Ecology and Management**, v. 264, p.172-184, 2012.

CABRERA-ARIZA, A. et al. Allometric Models for Estimating Aboveground Biomass in Short Rotation Crops of Acacia Species in Two Different Sites in Chile. **Forests**, v. 12, n. 12, p. 1767, 2021.

CALLEGARI-JACQUES, S.M. **Bioestatística: princípios e aplicações**. Porto Alegre: Artmed, 2009.

DIVYA, M.P. et al. Assessing the biomass productivity of Eucalyptus plantations at different age gradations. **The Pharma Innovation Journal**, p.1548-1551, 2022.

FAO. **Global Forest Resources Assessment 2020**. Rome, p. 16, 2020. DOI: <https://doi.org/10.4060/ca8753en>.

FERRARI, L.S. et al. Equações de volume para condução da regeneração natural de *Pinus elliottii* Engelm. **Espacios**, v. 38, n. 42, p. 19, 2017.

FREIRE, C.F.; PAMPLIN, P.A.Z. **A rede urbana nos biomas brasileiros e o papel das florestas urbanas como mitigação das mudanças climáticas**. Editora Científica Digital, 2022.

FRIGOTTO, F. et al. Desempenho de espécies e procedências de *Eucalyptus* no Planalto Norte Catarinense, Brasil. **Sciencia Forestalis**, v. 48, n. 127, p.e3273, 2020.

HALL, K.V. et al. A growth and yield model for *Eucalyptus benthamii* in the southeastern United States **Forest Science**, v. 66, i.1, p. 25-37, 2020.

HIRIGOYEN, A. et al. Stand biomass estimation methods for *Eucalyptus grandis* and *Eucalyptus dunnii* in Uruguay. **BOSQUE**, Valdivia, v. 42, n. 1, p. 53-66, 2021.

IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores 2021. **Relatório anual**. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/iba-relatorioanual2020.pdf>. Acesso em: 03 jun. 2022.

IBÁ - Indústria Brasileira de Árvores 2023. **Relatório anual**. Disponível em: <https://www.iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2023-r.pdf>. Acesso em: 20 mai. 2024.

KARYATI. et al. The allometric relationships for estimating above-ground biomass and carbon stock in an abandoned traditional

garden in East Kalimantan, Indonesia. **Biodiversitas Journal of Biological Diversity**, v. 22, n. 2, p.751-762. 2021.

LEITE, H.G.; ANDRADE, V.C.L. Importância das variáveis altura dominante e altura total em equações volumétricas. **Revista Árvore**, v. 26, p. 321-328, 2003.

LIMA, V.Y.M. et al. Ajuste de equações hipsométricas, volumétricas, de biomassa e carbono do fuste de árvores utilizadas na arborização urbana no Parque da Maternidade em Rio Branco – Acre. **Scientia Naturalis**, v. 2, n.2, p. 569-582, 2020.

LIN, K. et al. Improved allometric equations for estimating biomass of the three *Castanopsis carlessi* H. forest types in subtropical China. **New Forests**, v. 48, p. 115-135, 2017.

LOPES, B.G. et al. Classification of the coefficient of variation for experiments with eucalyptus seedlings in greenhouse. **Revista Ciência Agronômica**, v. 52, 2021.

MAKELA, A.; VANNINEN, P. Impacts of site and competition on tree form and distribution of aboveground biomass in Scots pine. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 28, n. 2, p. 216-227, 1998.

MORA, F.; ARRIAGADA, O. A classification proposal for coefficients of variation in *Eucalyptus* experiments involving survival, growth and wood quality variables. **Bragantia**, v. 75, p. 263-267, 2016.

MÔRA, R. et al. Modelos para estimativas volumétricas de fuste de *Pinus taeda* L. **Enciclopédia Biosfera**, v. 10, n. 19, p. 13, 2014.

MUGASHA, W.A. et al. Allometric models for prediction of above- and belowground biomass of trees in the miombo woodlands of Tanzania. **Forest Ecology and Management**, v. 310, p. 87-101, 2013.

OBERSCHELP, G.P.J. et al. Cold acclimation and freezing tolerance in three *Eucalyptus* species: a metabolomic and proteomic approach. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 154, p. 316-327, 2020.

OBERSCHELP, G.P.J. et al. Harder, better, faster, stronger: Frost tolerance of *Eucalyptus benthamii* under cold acclimation. **Plant Physiology and Biochemistry**, v. 186, p. 64-75, 2022.

OLIVEIRA, C.P. et al. Comparação de modelos estatísticos para estimativa da biomassa de árvores, e estimativa do estoque de carbono acima do solo em Cerrado. **Ciência Florestal**, v. 29, n.1, 2019.

PARDÉ, J.D. **Forest Biomass**. Por. Resumo, v. 41, p. 43-362, 1980.

PAUL, K.I. et al. Validation of allometric biomass models: How to have confidence in the application of existing models. **Forest Ecology and Management**, v. 412, p. 70-79, 2018.

PELISSARI, A.L. Modelos volumétrico para *Pinus* tropicais, em povoamento homogêneo, no Estado de Rondônia. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 31, n. 67, p. 173-181, 2011.

PIMENTEL-GOMES, F. **Curso de estatística experimental**. n. 15. Piracicaba: Fealq, 2009.

PIMENTEL-GOMES, F.; GARCIA C.H. **Estatística aplicada a experimentos agrônômicos e florestais: exposição com exemplos e orientações para uso de aplicativos**. Piracicaba: Fealq, 2002.

PNDP- Plano Nacional de Desenvolvimento de Florestas Plantadas. 2024. Disponível em: <https://www.gov.br/agricultura/pt-br/assuntos/camaras-setoriais-tematicas/documentos/camaras-setoriais/florestas-plantadas/2024/61a-ro-06-03/pndf-ultima-versao-04-03-24-florestas-06-03-24.pdf>. Acesso em: 05 mai. 2024.

RAMOS, W.F. et al. Geração de resíduos madeireiros do setor de base florestal na região metropolitana de Belém, Pará. **Ciência Florestal**, v. 28, n. 4, p. 1823-1830, 2018.

RESQUIN, F. et al. Influence of age and planting density on the energy content of *Eucalyptus benthamii*, *Eucalyptus dunnii* and *Eucalyptus grandis* planted in Uruguay. **New Forests**, v. 51, n. 4, p. 631-655, 2020.

RESQUIN, F. et al. Allometry, Growth and Survival of Three *Eucalyptus* Species (*Eucalyptus benthamii* Maiden and Cambage, *E. dunnii* Maiden and *E. grandis* Hill ex Maiden) in High-Density Plantations in Uruguay. **Florestas**, v. 9, n. 12, p. 745, 2018.

ROMERO, F.M.B. et al. Allometric equations for volume, biomass, and carbon in commercial stems harvested in a managed forest in the southwestern amazon: A case study. **Forests**, v. 11, n. 8, p. 874, 2020.

ROXBURGH, S.H. et al. Guidelines for constructing allometric models for the prediction of woody biomass: how many individuals to harvest?. **Ecosphere**, v. 6, n. 3, p. 1-27, 2015.

SADONO, R. et al. Allometric Equation for Estimating Energy Production of *Eucalyptus urophylla* in Dryland Ecosystems at East Nusa Tenggara. **Jurnal Manajemen Hutan Tropika**, v. 28, n. 1, p. 32-32, 2022.

SANQUETTA, C.R. et al. Independent and simultaneous modeling of biomass and carbon of Guinean *Elaeis*. **Floresta**, v. 49, n. 3, p. 421-430, 2019.

SANQUETTA, M.N.I. et al. Ajuste de equações hipsométricas para a estimação da altura total de indivíduos jovens de teca. **Científica**, v. 43, n. 4, p. 400-406, 2015.

SANTOS, D.M.C.L. et al. Diagnosis of the main forest hubs in Parana to mitigate climate change. **Contribuciones a las ciencias sociales**, v. 17, n. 3, p. e3668-e3668, 2024.

SCHIKOWSKI, A.B. et al. Modelagem do crescimento e de biomassa individual de *Pinus*. **Brazilian Journal of Forestry Research**, v. 33, n. 75, p. 269-278, 2013.

SCHMIT, R. et al. Longitudinal analysis in the selection of *Eucalyptus globulus* clones under contrasting water availability conditions. **Scientia Forestalis**, v. 43, n. 105, p. 217-224. 2015.

SCHRODER, T. et al. Métodos de estimativa de volume comercial para *Eucalyptus grandis*: especificidades e recomendações. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 33, n. 73, p. 1-7, 2013.

SENG HUA, L. et al. Engineering Wood Products from *Eucalyptus* spp. **Advances in Materials Science and Engineering**, v. 2022, feb. 2022.

SILVA, H.D. Alocação de biomassa e ajuste de equações para estimativa de biomassa em compartimentos aéreos de *Eucalyptus benthamii*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, n. 49, p. 83-95, 2004.

SILVA, H.D. **Revista Opinião**, 2013. Disponível em: <https://florestal.revistaopinioes.com.br/revista/detalhes/9-especies-de-eucalyptus-tolerantes-geada/>. Acesso em: 20 ago 2022.

SILVA, L.G.D. et al. **Evasive Planning for the Management of Eucalyptus Rust *Austropuccinia psidii* for Espírito Santo State, Brazil**. **Forests**, v. 13, n. 5, p. 646, 2022.