



Estimativa da produção de biomassa por componente da árvore em povoamentos clonais de *Eucalyptus* sp.

Estimating biomass production by tree component in *Eucalyptus* sp. clonal stands

C. K. Rodrigues^{1*}; A. L. Pelissari²; E. da S. Lopes³

¹Pós-graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal do Paraná, 80210-170, Curitiba-Paraná, Brasil

²Departamento de Ciências Florestais, Universidade Federal do Paraná, 80210-170, Curitiba-Paraná, Brasil

³Departamento de Engenharia Florestal, Universidade Estadual do Centro-Oeste, 84505-677, Irati-Paraná, Brasil

*carlacr@gmail.com

(Recebido em 10 de abril de 2024; aceito em 22 de fevereiro de 2025)

O aperfeiçoamento da estimativa da produção florestal é indispensável para o emprego das florestas plantadas como fonte de energia renovável. Nesse sentido, objetivou-se desenvolver modelos simultâneos para a estimativa da produção de biomassa por componentes da árvore em povoamentos clonais de *Eucalyptus saligna* e híbridos de *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla*. A quantificação da biomassa seca acima do solo foi realizada em povoamentos com idade de 7 anos, em que modelos alométricos foram ajustados independentemente para estimar a biomassa dos componentes fuste, galhos, folhas e casca em nível de árvore para *E. saligna* e *E. grandis* × *E. urophylla*. Os ajustes simultâneos foram efetuados por meio regressões aparentemente não relacionadas, visando assegurar a aditividade das predições parciais por componente à estimação da biomassa total acima do solo. A qualidade estatística foi realizada por meio de medidas de erro e análises gráficas. Houve melhoria da qualidade dos modelos para biomassa de galhos para *E. saligna* e fuste para *E. grandis* × *E. urophylla*, comparativamente aos ajustes independentes. Por outro lado, houve redução do erro da estimativa dos componentes fuste e casca para *E. saligna* e fuste e galhos para *E. grandis* × *E. urophylla*. Observou-se, para ambas as espécies, erros inferiores a 10% e ausência de tendências na estimativa da biomassa total. Os modelos desenvolvidos via equações simultâneas apresentaram resultados estatisticamente satisfatórios, especialmente para o componente fuste, o qual expressa maior contribuição à biomassa total. Ademais, houve melhoria ao garantir a aditividade das estimativas parciais na estimativa da biomassa total.

Palavras-chave: ajuste simultâneo, modelos alométricos, regressões aparentemente não relacionadas.

The improvement of forest production estimation is essential for utilizing planted forests as a renewable energy source. In this regard, the aim was to develop simultaneous models for estimating biomass production by tree component in clonal stands of *Eucalyptus saligna* and *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* hybrids. Above-ground dry biomass was quantified in stands aged 7 years, in which allometric models were fitted independently to estimate the biomass of the stem, branches, leaves, and bark components at the tree level for *E. saligna* and *E. grandis* × *E. urophylla*. Simultaneous fits were made using seemingly unrelated regressions, aiming to ensure the additivity of the partial predictions by component to the estimation of total above-ground biomass. Statistical quality was assessed using error measures and graphical analysis. There was an improvement in the quality of the models for branch biomass for *E. saligna* and stem biomass for *E. grandis* × *E. urophylla*, compared to the independent fits. On the other hand, there was a reduction in the error in estimating the stem and bark components for *E. saligna* and stem and branches for *E. grandis* × *E. urophylla*. For both species, errors of less than 10% and the absence of trends in the estimate of total biomass were observed. The models developed via simultaneous equations showed statistically satisfactory results, especially for the stem component, which makes the greatest contribution to total biomass. Furthermore, there was an improvement in ensuring the additivity of the partial estimates in the estimation of total biomass.

Keywords: simultaneous fits, allometric models, seemingly unrelated regressions.

1. INTRODUÇÃO

A produção florestal em escala comercial tem contribuído na direção das metas estabelecidas nos acordos internacionais de sequestro de gases do efeito estufa (GEF) e na mitigação das mudanças do clima, além de promover o aproveitamento de áreas degradadas e reduzir o desmatamento, haja vista que seus produtos substituem aqueles oriundos das florestas naturais,

reduzindo a pressão nos ecossistemas [1]. Dentre os diversos gêneros florestais cultivados no Brasil, o *Eucalyptus* ocupa atualmente 7,8 milhões de hectares com uma produtividade média de $32,7 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$, o que eleva o Brasil ao patamar de grande produtor mundial de florestas [2]. O sucesso do cultivo desse gênero deu-se principalmente pela capacidade de adaptação das espécies às diferentes condições edafoclimática, bem como pelo aprimoramento das práticas silviculturais, melhoramento genético, aplicação de adubos e corretivos no solo e controle de pragas e doenças [3].

O aperfeiçoamento das técnicas que visem quantificar o estoque florestal é indispensável na avaliação de estratégias de manejo florestal [4, 5]. Dentre as ferramentas empregadas para subsidiar a tomada de decisão pode-se citar a estimativa da biomassa, sendo essa utilizada para diversas finalidades, como quantificação do estoque de carbono, determinação dos produtos madeiráveis, eficiência na ciclagem de nutrientes, quantificação de biocombustíveis, entre outros [6]. No entanto, estudos relacionados com a quantificação da biomassa são realizados de acordo com metodologias destrutivas, em que ocorre a derrubada de árvores e o seccionamento em componentes como galhos, folhas, fuste, raízes e casca [7]. Além disso, existem também os métodos não destrutivos, podendo ser exemplificado pelos modelos alométricos que poderão estimar a biomassa de outros povoamentos de eucaliptos em determinada idade.

Com a finalidade de reduzir os custos da coleta de dados em campo, as estimativas da biomassa geralmente são realizadas por meio de modelos de regressão ajustados de maneira independente por componente da árvore. No entanto, esse método de ajuste não considera o princípio da aditividade, em que a soma das estimativas de cada componente é distinta da estimativa da biomassa total por meio de sua equação específica [8, 9], ocasionando resultados biologicamente consistentes. Nesse sentido, o uso de ferramentas que visem reduzir o viés de estimativa é imprescindível [4]. Diante disso, diferentes métodos de estimativa foram desenvolvidos com a finalidade de garantir a compatibilidade em sistemas de equações, como o método de regressões aparentemente não relacionadas (*Seemingly Unrelated Regressions* - SUR) para o ajuste simultâneo de equações lineares [10].

Na literatura especializada, é possível constatar o desenvolvimento de pesquisas relacionadas com a aplicação de ajustes simultâneos para a estimativa da biomassa de algumas espécies florestais, tanto plantadas, como do gênero *Pinus*, e nativas de gêneros diversos [5, 8, 10-15]. No entanto, apesar da consolidação dos ajustes simultâneos no manejo de diversas espécies florestais, a sua aplicação ainda é incipiente para espécies do gênero *Eucalyptus*, sendo necessário o desenvolvimento de pesquisas que contribuam para estabelecer o método na predição da biomassa florestal.

Portanto, objetivou-se neste trabalho desenvolver modelos alométricos para a estimativa da produção de biomassa por componentes da árvore em povoamentos clonais de *Eucalyptus* via equações simultâneas. Com isso, espera-se gerar informações aos gestores do setor de florestas plantadas à tomada de decisão sob cenários de manejo a serem empregados para o aproveitamento da biomassa florestal no contexto das mudanças do clima.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de estudo e base de dados

O presente estudo foi conduzido em povoamentos florestais situados entre as coordenadas $24^{\circ}26'42'' \text{ S}$ e $50^{\circ}45'39'' \text{ W}$, localizado na região central do estado do Paraná, Brasil. O clima local é classificado como Cfb (Köppen), com temperatura média anual entre 18 e 20 °C e precipitação média anual entre 1.600 e 1.900 mm [16]. Um povoamento foi composto por clones de *Eucalyptus saligna* Smith e outro por híbrido interespecífico de *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden \times *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake. Ambos foram avaliados na idade de 7 anos, com densidade média de 1.111 árvores por hectare no espaçamento de $3,75 \text{ m} \times 2,40 \text{ m}$ e manejados sob o mesmo regime (Tabela 1).

Tabela 1. Características dendrométricas dos povoamentos de *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla*.

Povoamento	Idade (ano)	$\bar{d} \pm s_x$ (cm)	$\bar{h} \pm s_x$ (m)	$\bar{h}_{dom} \pm s_x$ (cm)
<i>E. saligna</i>	7	18,7 ± 2,6	31,4 ± 3,1	34,1 ± 0,4
<i>E. grandis</i> × <i>E. urophylla</i>	7	18,2 ± 3,0	31,7 ± 3,0	34,1 ± 0,8

\bar{d} é a média do diâmetro a 1,3 m do solo (cm), \bar{h} é a média da altura total (cm), \bar{h}_{dom} é a média da altura dominante (cm) e s_x é o desvio padrão da média.

Na área de estudo, realizou-se um inventário florestal prévio à operação de colheita da madeira, com o objetivo de mensurar o diâmetro a 1,3 m do solo (d) e a altura total (h) das árvores. A intensidade amostral foi determinada para populações finitas [17], considerando o limite de erro de 10% ao nível de 5% de probabilidade. Assim, 29 unidades amostrais (u.a.) de 37,1 m × 23,3 m foram aleatoriamente alocadas nos povoamentos, com 10 u.a. em *E. saligna* e 19 u.a. em *E. grandis* × *E. urophylla*. Ademais, cinco classes de diâmetro a 1,3 m do solo com intervalos de 4 cm foram estabelecidas, cujas distribuições auxiliaram na definição do número de árvores-amostras para quantificação da biomassa verde acima do solo.

A quantificação da biomassa foi realizada por meio do método destrutivo, consistindo no abate e seccionamento de indivíduos, sendo cada seção correspondente aos componentes das árvores (fuste, galhos, folhas e casca), os quais foram separados, mensurados e amostrados. As massas das amostras de biomassa verde foram medidas separadamente com balança digital de precisão de 0,01 g e capacidade de 500 kg. Para o fuste, foram retirados discos com 5 cm de espessura nas alturas dos diâmetros relativos de 0% (base), 25%, 50% e 75% da altura total da árvore. As amostras de folhas e galhos foram obtidas na extremidade das copas, bem como na porção central e na base dos galhos localizados no terço médio.

Posteriormente, as amostras foram submetidas à secagem em estufa com renovação e circulação de ar e temperatura de 105 °C até a obtenção da massa constante. A massa seca das amostras foi mensurada em uma balança de precisão de 0,01 g, para qual foi determinada a biomassa seca dos componentes de cada árvore.

2.2 Modelos alométricos por componente da árvore

Diante dos dados, procedeu-se a análise exploratória das variáveis, em que foi avaliada a distribuição de frequências, a correlação linear de Pearson (r) e os diagramas de dispersão. Os níveis de correlação foram estabelecidos conforme Schober et al. (2018) [18], sendo baixa, para valores inferiores a 0,39; moderada, entre 0,40 e 0,69; forte, entre 0,70 e 0,89; e muito forte para correlações superiores a 0,90. Após essa etapa, três modelos alométricos amplamente utilizados na literatura foram ajustados independentemente pelo método dos mínimos quadrados ordinários, com o auxílio do programa computacional R [19] para estimar a biomassa dos componentes fuste (wft), galhos (wga), folhas (wfo) e casca (wcc), separadamente para *E. saligna* e *E. grandis* × *E. urophylla*, em função do diâmetro a 1,3 m do solo (d), da altura total (h) e do produto do quadrado do diâmetro pela altura (d^2h), cuja combinação de d e h tende a elevar a associação linear com as variáveis dependentes.

$$\hat{w}_j = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 d^2 h + \hat{\epsilon} \quad (1)$$

$$\ln(\hat{w}_j) = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \ln(d) + \hat{\epsilon} \quad (2)$$

$$\ln(\hat{w}_j) = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 \ln(d) + \hat{\beta}_2 \ln(h) + \hat{\epsilon} \quad (3)$$

em que \hat{w}_j é a estimativa da biomassa por componente j da árvore (kg), d é o diâmetro a 1,3 m do solo (cm), h é a altura total (m) e \ln é o logaritmo natural.

Os modelos independentes foram avaliados por meio da significância dos coeficientes de regressão estimados, ao nível de 5% pelo teste t, coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$), erro padrão da estimativa em porcentagem ($S_{yx}\%$), gráficos de resíduos padronizados para ausência de tendências nas estimativas e homogeneidade das variâncias e gráficos quantil-quantil para normalidade residual. As estatísticas de ajustes para os modelos logaritimizados 2 e 3 foram recalculadas à grandeza natural da variável biomassa. Optou-se por análises gráficas para as condicionantes da regressão linear visando mitigar os efeitos do tamanho das amostras em testes de hipóteses. Na presença de heterocedasticidade, pesos (λ) foram aplicados aos resíduos, com posterior reajuste dos modelos por mínimo quadrados lineares ponderados.

A biomassa total (wt) foi estimada com base no somatório das predições parciais dos componentes (modelo 4). A qualidade estatística das estimações foi avaliada, comparativamente aos dados observados, por meio da raiz quadrada do erro médio quadrático em porcentagem (REM $Q\%$), análise gráfica residual e gráficos dos valores estimados em função dos observados da variável dependente.

$$\hat{wt} = \sum \hat{w}_j \quad (4)$$

em que \hat{wt} é a estimativa da biomassa total (kg) e \hat{w}_j é a estimativa da biomassa por componente j da árvore (kg).

2.3 Ajustes simultâneos e estimativas ao povoamento

Os ajustes simultâneos foram efetuados por meio do método de regressões aparentemente não relacionadas – *Seemingly Unrelated Regressions* (SUR), com o auxílio do pacote systemfit do programa R [20], visando assegurar a aditividade das predições parciais por componente à estimação da biomassa total. Dessa forma, por meio do estimador de mínimos quadrados generalizados – *Generalized Least Squares* (GLS) [21], ajustou-se os sistemas de equações de biomassa considerando a correlação entre os componentes, o que proporciona a relação entre as equações dos componentes.

Genericamente, o modelo de equações simultâneas para biomassa pode ser representado por (5):

$$\hat{w}_j = X_j \hat{\beta}_j + \hat{e}_j, \quad e = 1, \dots, M \quad (5)$$

em que \hat{w}_j é a estimativa da biomassa por componente j da árvore (kg) por meio de 1 até M equações, X_j é a variável dendrométrica preditora, como diâmetro e altura, $\hat{\beta}_j$ são os coeficientes de regressão estimados e \hat{e}_j são os erros associados à estimação por componente j

A qualidade estatística das equações simultâneas foi avaliada por meio da significância dos coeficientes de regressão estimados, ao nível de 5%, e da alteração numérica de seus valores comparativamente aos ajustes independentes. Utilizou-se também o coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$), o erro padrão da estimativa em porcentagem ($S_{yx}\%$) e os gráficos de resíduos padronizados. Adicionalmente, considerou-se o coeficiente de determinação de McElroy ($R^2_{McElroy}$) [22] para a avaliação dos sistemas de equações, bem como a raiz quadrada do erro médio quadrático em porcentagem (REM $Q\%$) e análises gráficas para a estimativa da biomassa total obtida pelo somatório das predições dos componentes.

Os sistemas de equações simultâneas foram empregados para estimar a produção em biomassa total e por componente ($Mg\ ha^{-1}$) para os povoamentos de *E. saligna* e *E. grandis* \times *E. urophylla*. A análise envolveu o processamento do inventário por meio do processo de amostragem aleatório, considerando as estatísticas de média amostral (\hat{W}), coeficiente de variação ($cv\%$), erros absolutos (E_a) e percentual ($E\%$) e intervalos de confiança para a média (IC), ao nível de 95% de probabilidade [17].

3. RESULTADOS

3.1. Análise exploratória

Ao determinar a correlação linear entre as variáveis alométricas para *E. saligna*, foi notado que o diâmetro (d), a altura total (h) e o produto do quadrado do diâmetro pela altura (d^2h) apresentaram correlação muito forte ($r > 0,9$) com as variáveis biomassa do fuste (wft) e biomassa da casca (wcc) (Figura 1). Correlação baixa ($r < 0,39$) e moderada (r entre 0,4 e 0,69) foi verificada entre as variáveis d , h e d^2h com as biomassas de galhos (wgo) e folhas (wfo) (Figura 1). Resultados similares foram encontrados para o *E. salignia* (Figura 2).

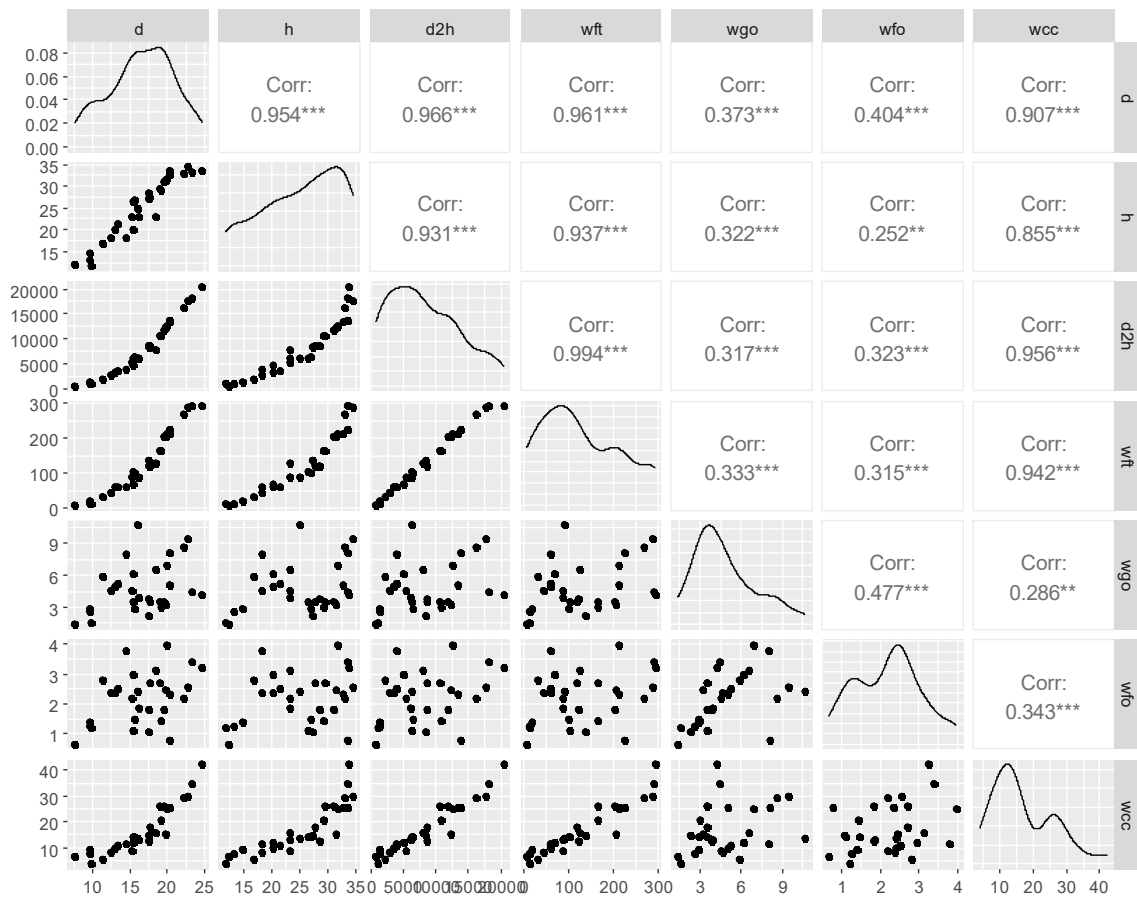


Figura 1. Análise exploratória das variáveis do povoamento de *Eucalyptus saligna*.

Esses níveis de correlação refletiram nas relações gráficas, em que houve baixa dispersão das observações nas associações alométricas e tendências lineares crescentes de d , h e d^2h com wft e wcc . Um maior espalhamento aumentou nas relações com wgo e wfo , bem como houve redução da inclinação nas linhas de tendência (Figuras 1 e 2).

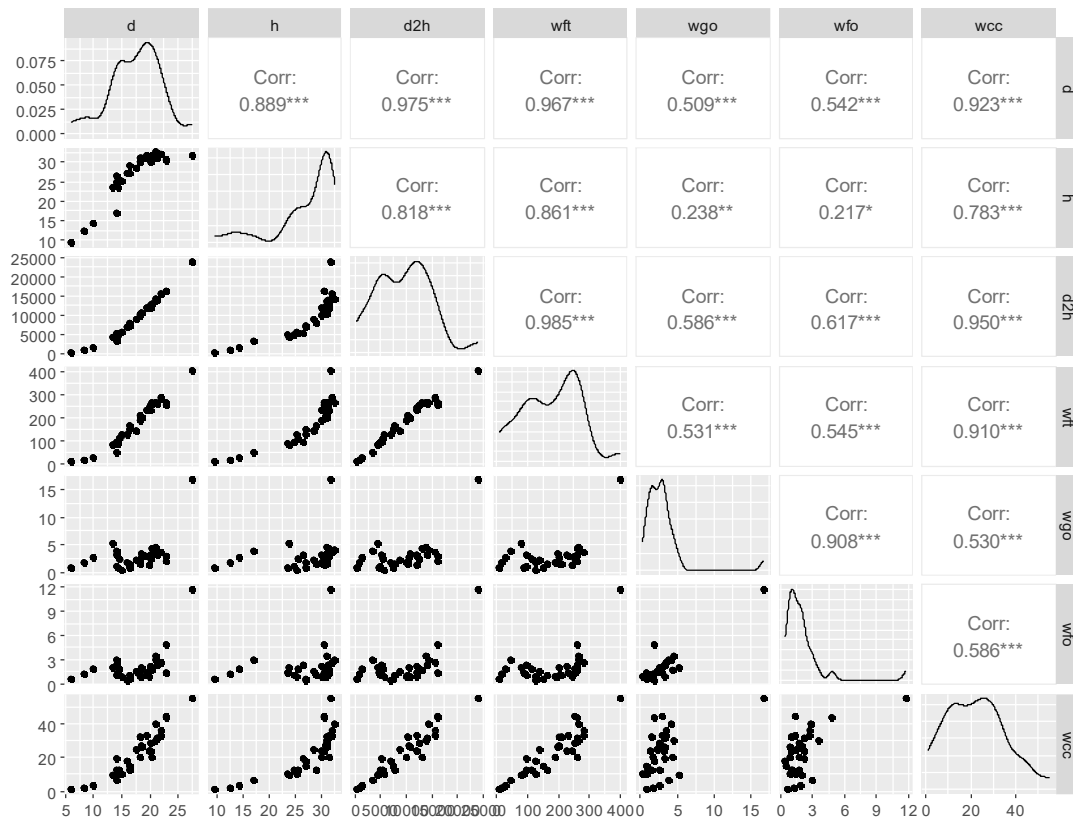


Figura 2. Análise exploratória das variáveis do povoamento de *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla*.

3.2. Modelos alométricos por componente da árvore

Foram selecionados o modelo 1 para estimar a biomassa do fuste e a das folhas (*wfo*) e o modelo 2 para estimar a biomassa da casca (*wcc*) e dos galhos (*wgo*) de *E. saligna* (Tabela 2). Apenas ao modelo 1, selecionado para estimar a biomassa do fuste (*wft*), foi necessário aplicar o peso ($1/d^2h$) para corrigir a presença de heterocedasticidade. Quando verificado o coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), notou-se que os modelos 1 para *wft* e 2 para *wcc* apresentaram os maiores valores (Tabela 2). Ao avaliar essa estatística para *wgo* e *wfo*, notou-se baixa capacidade explicativa dos modelos selecionados, com R^2_{aj} próximo a 0,1 (Tabela 2).

Tabela 2. Coeficientes de regressão estimados e estatísticas de ajuste dos modelos selecionados por componente da biomassa em povoamentos de *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla*.

Modelo	\hat{y}	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	R^2_{aj}	$S_{yx}\%$	REMQ%
<i>Eucalyptus saligna</i>							
1	<i>wft</i>	-2,8995*	0,0162*		0,988	7,46	
2	<i>wgo</i>	-0,8391*	0,8334*		0,102	45,05	
1	<i>wfo</i>	1,7832*	$5,060 \times 10^{-5}$ *		0,096	37,10	6,57
2	<i>wcc</i>	-2,2239*	1,7719*		0,844	21,74	
<i>Eucalyptus grandis</i> × <i>Eucalyptus urophylla</i>							
1	<i>wft</i>	2,6130*	0,0183*		0,966	9,79	
3	<i>wgo</i>	-0,3856ns	3,2295*	-2,4189*	0,418	73,17	8,17
3	<i>wfo</i>	-0,0522ns	3,8123*	-3,1314*	0,576	64,61	
2	<i>wcc</i>	-5,0282*	2,7931*		0,856	22,42	

$\hat{\beta}_i$ é o coeficiente de regressão estimado, R^2_{aj} é o coeficiente de determinação ajustado, $S_{yx}\%$ é o erro padrão da estimativa, REMQ% é a raiz quadrada do erro médio quadrático, * indica significância ao nível de 5% e ns ausência de significância.

Ao avaliar o erro padrão da estimativa em percentual ($S_{yx}\%$), foi notado que o modelo 1 para estimar a biomassa do fuste (wft) de *E. saligna* apresentou erro inferior a 10% (Tabela 2). Por outro lado, o modelo 2 para biomassa da casca (wcc) apresentou $S_{yx}\%$ superior a 20%. Os modelos selecionados para estimar a biomassa dos galhos (wgo) e folhas (wfo) apresentaram valores elevados de $S_{yx}\%$ (Tabela 2). A estatística REMQ%, para avaliar a precisão da estimativa da biomassa total, ao somar as estimativas parciais dos componentes, apresentou resultado satisfatório ao gerar erro inferior a 10%.

Para o híbrido *E. grandis* × *E. urophylla*, foram selecionados os modelos 1 para wft ; 3 para wgo e wfo ; e 4 para wcc (Tabela 2). Para esse povoamento, o modelo 1 também foi ponderado pelo peso ($1/d^2h$) com o objetivo de corrigir o efeito de heterocedasticidade. Os maiores valores de coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$) foram observados para wft e wcc , sendo os menores $R^2_{aj.}$ encontrados para estimativa de wgo e wfo . Em relação ao $S_{yx}\%$, os menores erros de estimativas foram observados nos modelos para wft e wcc . Por outro lado, os maiores $S_{yx}\%$ foram notados para wgo e wfo , enquanto o REMQ% foi inferior a 10% para a biomassa total, considerando as estimativas dos componentes das árvores (Tabela 2).

Foi possível notar a ausência de tendências aparentes e do efeito de heterocedasticidade nos resíduos padronizados da estimativa dos componentes da biomassa em povoamento de *E. saligna* (Figura 3). Ademais, por meio dos gráficos quantil-quantil, observaram-se resíduos normalmente distribuídos dispostos na linha diagonal e no intervalo ± 2 unidades de resíduos padronizados, bem como ausência de fugas nas caudas (Figura 3).

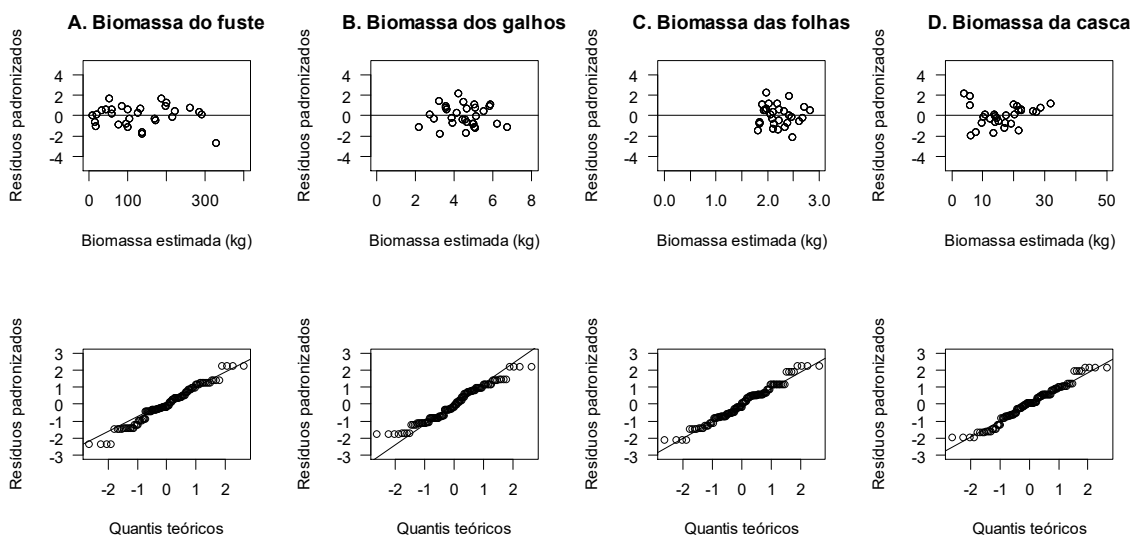


Figura 3. Gráficos de resíduos e quantil-quantil dos ajustes independentes selecionados por componente da biomassa em povoamento de *Eucalyptus saligna*.

Foi notada a ausência de tendências aparentes e heterocedasticidade ao avaliar a distribuição dos resíduos para o híbrido *E. grandis* × *E. urophylla* (Figura 4). Para a normalidade residual, por meio dos gráficos quantil-quantil, notou-se a adequada distribuição dos resíduos padronizados, com algumas poucas fugas nas caudas dos quantis para as estimativas das biomassas do fuste e dos galhos (Figura 4).

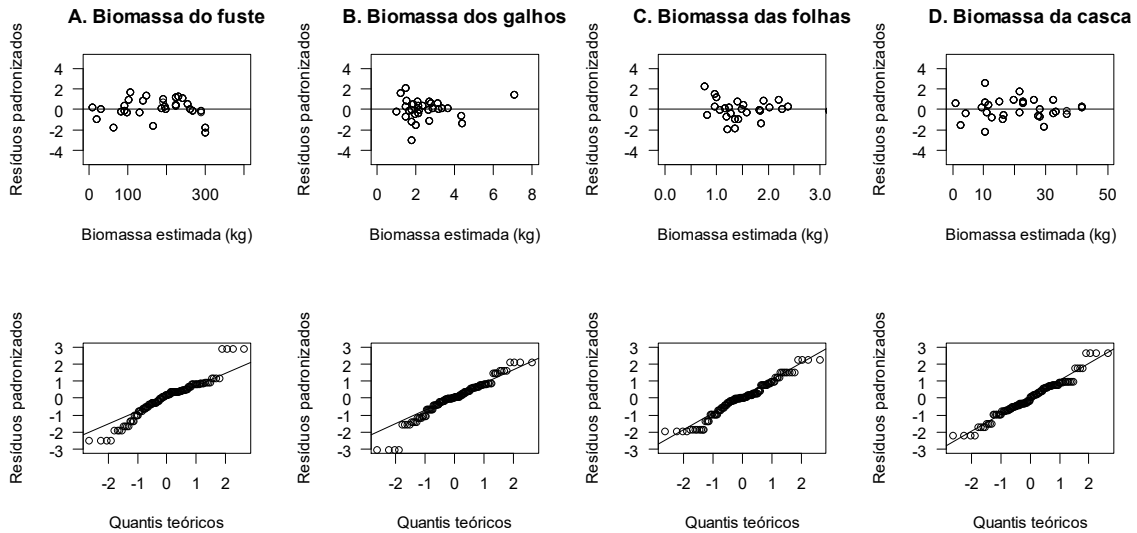


Figura 4. Gráficos de resíduos e quantil-quantil dos ajustes independentes selecionados por componente da biomassa em povoamento de *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla*.

3.3. Ajustes simultâneos

Por meio do ajuste simultâneo, foi possível notar alteração nos valores numéricos dos coeficientes de regressão dos modelos ajustados (Tabela 3), comparativamente aos ajustes independentes (Tabela 2), mantendo a significância ao nível de 5%. Houve aumento dos coeficientes de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$) para biomassa de galhos (*wgo*) em *E. saligna* e fuste (*wft*) para *E. grandis* × *E. urophylla*, bem como manutenção ou redução do $R^2_{aj.}$ para os demais componentes. Por outro lado, houve redução do erro padrão da estimativa em percentual ($S_{yx}\%$) dos componentes *wft* e *wcc* para *E. saligna* e *wft* e *wgo* para *E. grandis* × *E. urophylla* (Tabela 3).

Tabela 3. Coeficientes de regressão estimados e estatísticas dos ajustes simultâneos por componente da biomassa em povoamentos de *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla*.

Modelo	\hat{y}	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$R^2_{aj.}$	$S_{yx}\%$	REMQ%	$R^2_{McElroy}$
<i>Eucalyptus saligna</i>								
1	<i>wft</i>	-1,5117ns	0,0160*		0,988	7,41		
2	<i>wgo</i>	-0,6687ns	0,7718*		0,103	45,02		
1	<i>wfo</i>	1,6767*	$6,354 \times 10^{-5}$ *		0,090	37,24	6,59	0,960
2	<i>wcc</i>	-2,2505*	1,7815*		0,846	21,58		
<i>Eucalyptus grandis</i> × <i>Eucalyptus urophylla</i>								
1	<i>wft</i>	0,1208*	0,0173*		0,969	9,29		
3	<i>wgo</i>	-0,2846ns	3,4747*	-2,6616*	0,459	70,52	7,95	0,925
3	<i>wfo</i>	0,0457ns	4,0213*	-3,3419*	0,613	61,69		
2	<i>wcc</i>	-5,0424*	2,7981*		0,855	22,49		

$\hat{\beta}_i$ é o coeficiente de regressão estimado, $R^2_{aj.}$ é o coeficiente de determinação ajustado, $S_{yx}\%$ é o erro padrão da estimativa, REMQ% é a raiz quadrada do erro médio quadrático, * indica significância ao nível de 5% e ns ausência de significância.

Ao considerar a raiz do erro médio quadrático (REMQ%) para a biomassa total, obtida pelo somatório das estimativas por componente, observou-se erros inferiores a 10% e redução do REMQ% para *E. grandis* × *E. urophylla*, comparativamente ao ajuste independente (Tabela 3). Ademais, os valores de coeficiente de determinação de McElroy ($R^2_{McElroy}$) superiores a 0,9 indicaram que elevada proporção da variabilidade das biomassas foi explicada por meio das variáveis nos sistemas de equações simultâneas (Tabela 3), principalmente devido a influência dos componentes fuste e casca, as quais proporcionaram maior explicação individual no sistema

de equações. Além disso, a análise gráfica expressou a ausência de tendências na estimativa da biomassa total (Figura 5).

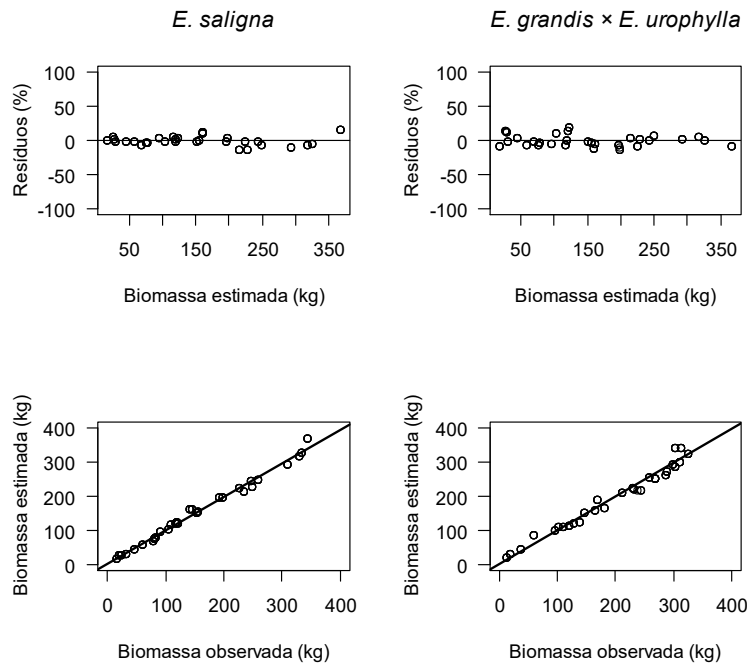


Figura 5. Gráficos de resíduos e valores estimados versus observados dos ajustes simultâneos para povoamentos de *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla*.

Ao estimar a produção em biomassa total e por componentes (Mg ha^{-1}) para os povoamentos de *E. saligna* e *E. grandis* × *E. urophylla* por meio dos sistemas de equações simultâneas (Tabela 4), foi observado que o fuste representou a maior porção da biomassa total, seguido pela casca. Por outro lado, galhos e folhas apresentaram a menor contribuição para a média da produção de biomassa. Os valores de coeficiente de correlação ($cv\%$) exibiram baixa variabilidade nas estimativas, em que os erros de amostragem absoluto (E_a) e relativo ($E\%$) indicaram elevada precisão, acarretando intervalos de confiança (IC) estreitos para a estimativa da produção de biomassa total e por componente ao nível de 95% de probabilidade.

Tabela 4. Estimativas da produção da biomassa seca em povoamentos de *Eucalyptus saligna* e *Eucalyptus grandis* × *Eucalyptus urophylla* por meio de ajustes simultâneos.

Componente	\widehat{W} (Mg ha^{-1})	$cv\%$	E_a (Mg ha^{-1})	$E\%$	IC (Mg ha^{-1})	
					Ajuste Simultâneo	Ajuste Individual
<i>Eucalyptus saligna</i>						
Fuste	207,48	11,3%	$\pm 16,45$	$\pm 7,9\%$	191,03 – 223,93	191,91 – 225,10
Galhos	5,80	7,9%	$\pm 0,32$	$\pm 5,5\%$	5,48 – 6,12	5,33 – 5,97
Folhas	2,75	7,3%	$\pm 0,14$	$\pm 5,2\%$	2,61 – 2,89	2,55 – 2,84
Casca	22,48	9,8%	$\pm 1,55$	$\pm 6,9\%$	20,93 – 24,03	20,89 – 23,96
Total	238,49	11,0%	$\pm 18,4$	$\pm 7,7\%$	220,08 – 256,89	220,73 – 257,84
<i>Eucalyptus grandis</i> × <i>Eucalyptus urophylla</i>						
Fuste	206,29	14,2%	$\pm 13,81$	$\pm 6,7\%$	192,48 – 220,11	206,02 – 235,66
Galhos	2,03	11,7%	$\pm 0,11$	$\pm 5,5\%$	1,92 – 2,14	1,96 – 2,19
Folhas	1,33	11,5%	$\pm 0,07$	$\pm 5,4\%$	1,25 – 1,40	1,28 – 1,43
Casca	24,92	13,0%	$\pm 1,53$	$\pm 6,1\%$	23,39 – 26,45	23,39 – 26,43
Total	234,57	14,0%	$\pm 15,48$	$\pm 6,6\%$	219,09 – 250,04	232,70 – 265,68

\widehat{W} é a estimativa da média amostral, $cv\%$ é o coeficiente de variação, E_a é o erro absoluto da estimativa, $E\%$ é o erro percentual, IC é o intervalo de confiança para a média ao nível de probabilidade de 95%.

Considerando os valores médios apresentados na Tabela 4, a participação do fuste é de 87%, sendo seguido por casca, com 10%. Os componentes galhos e folhas resultaram em menor participação, com aproximadamente 1% cada.

4. DISCUSSÃO

No presente estudo, objetivou-se desenvolver modelos simultâneos para a estimativa da produção de biomassa em povoamentos de *Eucalyptus* aos 7 anos de idade, visto ser a idade em que ocorre o corte raso nas florestas plantadas pela empresa de papel e celulose, sendo os resíduos compostos por casca, folhas, galhos e ponteiros usados como fonte de energia renovável. Assim, ao utilizar um sistema de equações ajustadas simultaneamente, garante-se a consistência biológica pela aditividade dos componentes e elimina-se a necessidade do ajuste de um modelo independente para a biomassa total [23-25]. Destaca-se também a possibilidade de manutenção do nível de precisão, como para *E. saligna*, e aumento da precisão, como verificado para *E. grandis* × *E. urophylla*, uma vez que os erros das equações por componentes tornam-se correlacionados [26-28].

Comparativamente aos modelos ajustados independentemente, os valores dos coeficientes $\hat{\beta}_0$ estimados alteraram mediante a utilização do ajuste simultâneo, sendo, por vezes, estatisticamente não-significativos ao nível de 5% de probabilidade. Isso mostra uma melhor acomodação dos interceptos ($\hat{\beta}_0$) como garantia à aditividade dos modelos. Por outro lado, os coeficientes de regressão dos ajustes associados a uma variável dendrométrica com elevada correlação com a produção de biomassa foram numericamente menos sensíveis ao ajuste simultâneo, como para o coeficiente $\hat{\beta}_1$ do modelo 2 para componente fuste de ambos os povoamentos de *Eucalyptus*. Isso pode estar relacionado ao emprego das mesmas variáveis preditoras nas equações independentes e simultâneas [28].

Apesar dos ajustes independentes apresentarem consistência (Tabelas 2 e 3), as equações simultâneas proporcionam ganho em eficiência [24, 25, 29]. Assim, ao correlacionar os erros, as equações tornam-se relacionadas [21, 23], cujo ganho de qualidade da estimação da produção de biomassa possibilita melhor entendimento sobre a contribuição de cada componente à biomassa total dos povoamentos e *Eucalyptus*.

Uma vez que os ajustes para os componentes galhos e folhas apresentaram elevados erros, principalmente para *E. saligna*, observou-se que as variáveis dendrométricas resultaram em baixa capacidade explicativa, acarretando coeficientes de regressão não-significativos. Para os componentes da copa, como galhos e folhas, a espécie *E. saligna* apresenta tendência de redução da sua biomassa com o desenvolvimento dos povoamentos [30]. Esse padrão pode ser um fator influente na menor contribuição das variáveis diâmetro e altura na modelagem da biomassa de galhos e folhas.

Ademais, pode-se destacar a variabilidade dos dados, a qual pode ser influenciada por fatores edafoclimáticos, bem como pela posição sociológica das árvores nos povoamentos e a competição intraespecífica [25]. Nesses casos, a incorporação de variáveis que expressam as características da copa, como diâmetro da copa, diâmetro e comprimento de galhos, índice de área foliar, pode elevar a precisão dos modelos alométricos [31, 32]. Contudo, a baixa contribuição dos componentes galhos e folhas minimiza a influência dos erros de seus modelos na estimativa da biomassa total.

Considerando a maior participação do componente fuste à biomassa total, os esforços para quantificar o estoque de carbono em inventários florestais devem-se concentrar na mensuração desse componente. Ao considerar a casca, a contribuição aproxima-se de 97% nos povoamentos de *Eucalyptus*. No contexto dos projetos de carbono, não se justifica os elevados custos de coleta de dados para determinar os estoques nos componentes de menor contribuição, como galhos e folhas, uma vez que a medição envolve procedimentos laboriosos. Ademais, modelos alométricos para a estimação desses componentes apresentam baixa precisão, comparativamente ao fuste, em que a predição por meio de variáveis dendrométricas amplamente mensuradas, como diâmetro e altura, acarretam resultados satisfatórios.

5. CONCLUSÃO

Os modelos de biomassa desenvolvidos via equações simultâneas para povoamentos clonais de *Eucalyptus* apresentam resultados estatisticamente satisfatórios para a estimativa da produção de biomassa por componentes da árvore, especialmente para o componente fuste, o qual expressa maior contribuição à biomassa total. Ademais, há melhoria da qualidade estatística dos modelos, comparativamente aos ajustes independentes, ao garantir a aditividade das estimativas parciais dos componentes à predição da biomassa total.

6. REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

1. Ignacio LHS, Santos PEA, Duarte CAR. An experimental assessment of *Eucalyptus urograndis* seedlings energy potential for biomass production in Brazil. *Renew Sustain Energy Rev.* 2019 Apr;103:361-9. doi: 10.1016/j.rser.2018.12.053
2. Indústria Brasileira de Árvores (IBÁ). Relatório Anual 2023 [Internet]. Disponível em: <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-anual-iba2023-r.pdf>
3. Schumacher MV, Behling A, Sanquetta CR, Sanquetta MD. Manejo da biomassa e sustentabilidade nutricional em povoamentos de *Eucalyptus* spp. em pequenas propriedades rurais. *Ciênc Florest.* 2019;29(1):144-56. doi: 10.5902/198050985135
4. Clark J, Murphy G. Estimating forest biomass components with hemispherical photography for Douglas-fir stands in northwest Oregon. *Can J For Res.* 2011 May;41(5):1060-74. doi: 10.1139/x11-013
5. Zhao D, Xu M, Zhang Y, Huang J. Additive tree biomass equations for midrotation *Pinus taeda* plantations. *For Sci.* 2015;61(4):613-23. doi: 10.5849/forsci.14-193
6. García-Florez L, Rojo A, Trincado G, Álvarez-González JG, Ruiz-González AD. Developing biomass estimation models for above-ground compartments in *Eucalyptus dunnii* and *Corymbia citriodora* plantations. *Biomass Bioenergy.* 2019 Jan;130:105358. doi: 10.1016/j.biombioe.2019.105353
7. Gonzalez-Benecke CA, Samuelson LJ, Stokes TA, Cropper WP, Leduc DJ. General above-stump volume and biomass functions for *Pinus radiata*, *Eucalyptus globulus* and *Eucalyptus nitens*. *Biomass Bioenergy.* 2021 Jan;155:106005. doi: 10.1016/j.biombioe.2021.106280
8. Nhado UC, Silva EV, Dalla Rosa AG, Behling A, Silva J, Sanquetta M. Sistema de equações de biomassa para *Pinus* spp. no sul do Paraná. *Sci For.* 2021;49(129):e3301. doi: 10.18671/scifor.v49n129.24
9. Pérez-Cruzado C, Rodríguez-Soalleiro R. Improvement in accuracy of aboveground biomass estimation in *Eucalyptus nitens* plantations: Effect of bole sampling intensity and explanatory variables. *For Ecol Manag.* 2011 Jun;261(11):2016-28. doi: 10.1016/j.foreco.2011.02.028
10. Dong L, Zhang L, Li F. A compatible system of biomass equations for three conifer species in Northeast, China. *For Ecol Manag.* 2014 May;329:306-17. doi: 10.1016/j.foreco.2014.05.050
11. Dong L, Zhang L, Li F. Developing additive systems of biomass equations for nine hardwood species in Northeast China. *Trees Struct Funct.* 2015;29(4):1149-63. doi: 10.1007/s00468-015-1196-1
12. Dong L, Zhang L, Li F. Additive biomass equations based on different dendrometric variables for two dominant species (*Larix gmelini* Rupr. and *Betula platyphylla* Suk.) in natural forests in the Eastern Daxing'an Mountains, Northeast China. *Forests.* 2018;9(5):273. doi: 10.3390/f9050261
13. Brandeis TJ, Delaney M, Parresol BR, Royer L. Development of equations for predicting Puerto Rican subtropical dry forest biomass and volume. *For Ecol Manage.* 2006 Jan;233(1):133-42. doi: 10.1016/j.foreco.2006.06.012
14. Daryaei A, Sohrabi H. Additive biomass equations for small diameter trees of temperate mixed deciduous forests. *Scand J For Res.* 2016 Jun;31(4):394-8. doi: 10.1080/02827581.2015.1089932
15. Kralicek K, Huy B, Poudel KP, Temesgen H, Salas C. Simultaneous estimation of above- and below-ground biomass in tropical forests of Viet Nam. *For Ecol Manage.* 2017 Dec;390:147-56. doi: 10.1016/j.foreco.2017.01.030
16. Alvares CA, Stape JL, Sentelhas PC, Gonçalves JLM, Sparovek G. Köppen's climate classification map for Brazil. *Meteorol Z.* 2013 Dec;22(6):711-28. doi: 10.1127/0941-2948/2013/0507
17. Kershaw JA, Ducey MJ, Beers TW, Husch B. *Forest mensuration*. 5th ed. New York (US): J. Wiley; 2017.
18. Schober P, Boer C, Schwarte LA. Correlation coefficients: Appropriate use and interpretation. *Anesth Analg.* 2018 May;126(5):1763-8. doi: 10.1213/ANE.0000000000002864
19. R Core Team. *R: A language and environment for statistical computing*. Vienna (AT): R Foundation for Statistical Computing; 2023.

20. Henningsten A, Hamann JD. systemfit: a package for estimating systems of simultaneous equations in R. *J Stat Softw.* 2007;23(4):1-40.
21. Greene WH. *Econometric analysis*. 8th ed. Upper Saddle River, New Jersey (US): Pearson; 2017.
22. McElroy MB. Goodness of fit for seemingly unrelated regressions. *J Econometrics.* 1977;6:381-7. doi: 10.1016/0304-4076(77)90008-2
23. Behling A, David HC, Demétrio CGB, Sanquetta CR, Corte APD, Woycikiewicz APF. Additivity of volume components of tree boles. *Floresta.* 2019;50(1):905.
24. Pélico Netto S, Behling A. Additivity of tree biomass components using ratio estimate. *An Acad Bras Cienc.* 2019;91(3):e20180272. doi: 10.1590/0001-3765201920180272
25. Trautemüller JW, Pélico Netto S, Balbinot R, Watzlawick LF, Dalla Corte AP, Sanquetta CR, et al. Regression estimators for aboveground biomass and its constituent parts of trees in native southern Brazilian forests. *Ecol Indic.* 2021;130:108025. doi: 10.1016/j.ecolind.2021.108025
26. Dufour J-M, Khalaf L. Exact tests for contemporaneous correlation of disturbances in seemingly unrelated regressions. *J Econometrics.* 2002 Jan;106(1):143-70. doi: 10.1016/S0304-4076(01)00093-8
27. Affleck DLR, Diéguez-Aranda U. Additive nonlinear biomass equations: A likelihood-based approach. *For Sci.* 2016;62(2):129-40. doi: 10.5849/forsci.15-126
28. Behling A, Pélico Netto S, Sanquetta CR, Corte APD, Affleck DLR, Rodrigues AL, et al. Critical analyses when modeling tree biomass to ensure additivity of its components. *An Acad Bras Cienc.* 2018;90(2):1759-74. doi: 10.1590/0001-3765201820170684
29. Coutinho VM, Sanquetta CR, Bittencourt PA, Silva SA, Proceke KH, Delarmelina WM, et al. Simultaneous equations to estimate aboveground biomass of *Pinus caribaea* var. *hondurensis*. *Floresta e Ambiente.* 2018;25(3):e20160452. doi: 10.1590/2179-8087.045216
30. Londero EK, Schumacher MV, Szymczak DA, Araújo EF. Calibração do modelo 3-PG para *Eucalyptus saligna* Smith na região de Guaíba - RS. *Ciência Florestal.* 2015;25(2):293-305. doi: 10.5902/1980509818447
31. Viana H, Aranha J, Lopes D, Cohen WB. Estimation of crown biomass of *Pinus pinaster* stands and shrubland above-ground biomass using forest inventory data, remotely sensed imagery and spatial prediction models. *Ecol Modell.* 2012;226:22-35. doi: 10.1016/j.ecolmodel.2011.11.027
32. Poudel KP, Temesgen H, Gray AN. Evaluation of sampling strategies to estimate crown biomass. *For Ecosyst.* 2015;2(1):1. doi: 10.1186/s40663-014-0025-0