



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

**MODELAGEM DA BIOMASSA ARBÓREA NO PARQUE NATURAL
MUNICIPAL DO CURIÓ, PARACAMBI-RJ**

LAÍS CÂNDIDO SILVA

Prof. Dr. EMANUEL JOSÉ GOMES DE ARAÚJO
Orientador

SEROPÉDICA-RJ
DEZEMBRO-2018



UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DO RIO DE JANEIRO
INSTITUTO DE FLORESTAS
CURSO DE GRADUAÇÃO EM ENGENHARIA FLORESTAL

**MODELAGEM DA BIOMASSA ARBÓREA NO PARQUE NATURAL
MUNICIPAL DO CURIÓ, PARACAMBI-RJ**

Monografia apresentada ao Curso de Engenharia Florestal, como requisito parcial para a obtenção do Título de Engenheira Florestal, Instituto de Florestas da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

LAÍS CÂNDIDO SILVA

Prof. Dr. EMANUEL JOSÉ GOMES DE ARAÚJO
Orientador

SEROPÉDICA-RJ
DEZEMBRO-2018

**MODELAGEM DA BIOMASSA ARBÓREA NO PARQUE NATURAL
MUNICIPAL DO CURIÓ, PARACAMBI-RJ**

LAÍS CÂNDIDO SILVA

Monografia aprovada em 22 de novembro de 2018.

Banca Examinadora:

Prof. Dr. Emanuel José Gomes de Araújo – UFRRJ
Orientador

Prof. Dr. Marco Antonio Monte – UFRRJ
Membro

Pedro Vaz da Rocha – Engenheiro Florestal
Membro

DEDICATÓRIA

Aos meus pais, Rosa e José Antônio,
dedico.

AGRADECIMENTOS

A Deus pela força, proteção, sabedoria e por iluminar minha caminhada.

Aos meus pais, Rosa e José Antônio, por todo amor, dedicação, esforço, zelo, apoio e por tudo que fazem para que eu alcance os meus sonhos.

À Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, ao Instituto de Florestas e ao Laboratório de Manejo e Mensuração Florestal (LAMFLOR).

À Fundação Carlos Chagas Filho de Amparo à Pesquisa do Estado do Rio de Janeiro (FAPERJ), pelo subsídio a realização dessa pesquisa e ao Parque Natural Municipal do Curió (PNMC), Paracambi, RJ, pela concessão da área de estudo.

Ao meu orientador e amigo, Prof. Dr. Emanuel Araújo, por idealizar esse trabalho, por acolher e apoiar minhas ideias e por todo o conhecimento e experiências proporcionadas. Obrigada por toda a preocupação, pelos ensinamentos profissionais e pessoais e pelo carinho e atenção nesses três anos de orientação.

Ao Prof. Dr. Marco Monte, pelas valorosas contribuições ao longo de todo o projeto de pesquisa e principalmente nesse trabalho.

Ao Pedro Vaz, pelas contribuições na banca.

Ao Prof. Dr. Alexandre Miguel, pelo suporte e ensinamentos sobre a coleta de material, pela utilização de equipamentos e laboratório e pelas boas conversas.

Aos professores Natália, Gilmara e Paulo Leles pelo aporte de materiais e equipamentos. E ao Zé, presença marcante e adorável nos dias exaustivos de análises das baguetas.

Ao grande amigo Danilo, pela presença e ajuda nos momentos mais difíceis e mais importantes ao longo de todo o trabalho.

À equipe LAMFLOR e aos colegas que tanto me ajudaram no trabalho de campo. Em especial ao Felipe e Paizão, fiéis motoristas e parceiros para todas as horas, no campo ou no laboratório, nas tradagens e nos bernes.

Ao meu irmão Léo e toda minha família, que torceu, apoiou e entendeu minhas ausências ao longo dos anos.

Ao Leandro Roma, pelo companheirismo, carinho, compreensão e afeto todos os dias.

Aos professores Alexandre Monteiro e Vanessa Basso pela tutoria no PET-Floresta, pelos ensinamentos e pelas oportunidades. Aos amigos petianos, por todas as experiências compartilhadas e amizades construídas.

Às amigas Carol e Dalila, pelos momentos vividos, pelo apoio e pela amizade.

À minha companheira de república e amiga, Poli, por todas as conversas, carinho, ajuda nos momentos de tensão e pelos cafés.

Aos amigos de longa data, pelo carinho, torcida e por tantos momentos compartilhados em mais uma jornada. Em especial ao José Roberto e Letícia, meus exemplos de amizade e amigos inseparáveis.

A todos que contribuíram para a realização desse trabalho e que nele acreditaram.

Gratidão!

RESUMO

O objetivo do presente trabalho foi ajustar e testar modelos matemáticos para estimar a biomassa do fuste em espécies florestais. A área de estudo foi estabelecida no Parque Natural Municipal do Curió, Paracambi, RJ. Foram alocados 40 pontos quadrantes distantes 50 metros entre si, sendo mensuradas, em cada ponto, as variáveis DAP e altura total das quatro árvores mais próximas, sendo uma em cada quadrante. Além disso, foi feita a coleta de baguetas utilizando sonda de Pressler, nas alturas 0,70; 1,30 e 1,80 m do solo. A biomassa foi quantificada pelo produto entre volume total com casca dos indivíduos arbóreos e densidade média básica da madeira. Foram selecionadas 100 árvores para o ajuste de 12 modelos matemáticos comumente utilizados na literatura para estimar biomassa, 5 de simples entrada, 6 de dupla entrada e 1 que considera também a densidade básica da madeira. As variáveis independentes foram DAP, Ht e densidade básica. Foram calculadas as estatísticas descritivas e a normalidade dos resíduos pelo teste de normalidade de Shapiro-Wilk. A precisão das equações ajustadas foi analisada por meio das estatísticas de ajuste R^2_{aj} , $S_{yx}\%$, análise gráfica dos resíduos, Bias, RQEM%, AIC e BIC. O desempenho das equações após o ajuste foi avaliado pelo índice de desempenho de modelos. Foram mensuradas 160 árvores e identificadas 57 espécies. Como resultado, os modelos que apresentaram normalidade para o resíduos foram Curtis e Chave. O modelo de Chave apresentou destaque positivo em todos os critérios de seleção, apresentando o menor AIC, BIC, BIAS e RQEM%, além de $R^2_{aj} = 0,98$ e índice de desempenho classificado como ótimo. Em suma, os modelos que apresentam mais de uma variável de interesse se mostraram melhores no conjunto de análises de precisão, sendo o modelo de Chave o mais apropriado para estimar a biomassa. A densidade básica da madeira promoveu ganhos em precisão e exatidão na estimativa, suscitando sua utilização.

Palavras-chave: Biomassa, Alometria, Mata Atlântica.

ABSTRACT

The present of manual was constituted by a selection of mathematical products to estimate the biomass of the fauna in forest species. The study area was built in the Parque Natural Municipal do Curió, Paracambi, RJ. A total of 40 square points, 50 meters apart, were measured at each point as DAP variables and total height of the four nearest branches, one in each quadrant. In addition, a baggage collection was carried out with Pressler's probe, at the heights of 0.70; 1.30 and 1.80 m make solo. The biomass was quantified by the product between total volume with bark of the trees and with the average wood content. 100 sheets were selected to calibrate the input of 6 raw materials for the biomass evaluation, 5 of simple entry, 6 of double entry and 1 that also considered a basic measure of the wood. As precise measurements were found in the DAP, Ht and basic measure. They were calculated as being descriptive and a normality of the tests by the Shapiro-Wilk normality test. The accuracy of the adjusted equations was analyzed by means of the adjustment statistics R^2_{aj} , $S_{yx\%}$, graphical analysis of residues, Bias, RQEM%, AIC e BIC. The performance of the equations seems to have been adjusted by the model performance index. 160 trees and forests of 57 species were maintained. As a result, the models that make normalcy to the habit were Curtis and Key. The creation key model is a positive highlight on all selection criteria, less than or equal to AIC, BIC, BIAS e RQEM%, in addition to $R^2_{aj}= 0,98$ and performance index as good as. In short, models that present more than one variable of interest are better in the set of precision analyzes, the key model being the most suitable for estimating a biomass. The basic measure of wood promoted gains in accuracy and accuracy in relation to its use.

Keywords: Biomass, Allometry, Atlantic Forest.

SUMÁRIO

LISTA DE TABELAS	viii
LISTA DE FIGURAS	ix
1. INTRODUÇÃO.....	1
2. REVISÃO DE LITERATURA	2
2.1 Modelos alométricos	2
2.2 Modelagem de Biomassa florestal.....	3
2.3 Desempenho das equações de biomassa em florestas inequiâneas	4
3. MATERIAL E MÉTODOS.....	5
3.1 Área de estudo	5
3.2 Coleta de dados.....	6
3.3 Processamento preliminar dos dados.....	6
3.4 Modelagem matemática.....	7
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	9
5. CONCLUSÕES	15
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	15

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Modelos matemáticos utilizados para estimar a biomassa total em árvores no PNMC.....	7
Tabela 2. Estatísticas descritivas para as variáveis dependentes e independentes analisadas no ajuste dos modelos.....	9
Tabela 3. Parâmetros e estatísticas utilizadas no ajuste de modelos para estimativa da biomassa total.....	11

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Localização da área de estudo e pontos amostrais no Parque Natural Municipal do Curió, Paracambi, RJ.....	5
Figura 2. a) Distribuição diamétrica; b) de altura; c) da densidade básica dos indivíduos amostrados no Parque Natural Municipal do Curió, Paracambi, RJ.	10
Figura 3. Distribuição gráfica dos resíduos padronizados das equações para as estimativas de biomassa das árvores amostradas no Parque Natural Municipal do Curió, Paracambi, RJ.....	13
Figura 4. Relação entre biomassa estimada e biomassa observada, em kg, para o conjunto de dados amostradas no Parque Natural Municipal do Curió, Paracambi, RJ.....	14

1. INTRODUÇÃO

A biomassa florestal tem motivado muitos estudos atualmente. Essa importância está diretamente relacionada com a diversidade de assuntos que a envolvem, dentre eles destaca-se a ciclagem de nutrientes, a avaliação do crescimento de florestas, fins energéticos e estudos sobre a fixação biológica do carbono, entre outros (SANQUETTA *et al.*, 2014; FIORENTIN *et al.*, 2015). Neste último caso, a fitomassa é considerada uma variável fundamental (SANQUETTA, M. N. I. *et al.*, 2015) e a mais viável para estudar o estoque de carbono nas florestas, pois apresenta maior facilidade de determinação em relação ao carbono, uma vez que sua quantificação envolve processos menos complexos.

A biomassa pode ser estimada por métodos diretos e indiretos nas mais variadas formas de vegetação. O método direto, em geral, consiste em mensurar a biomassa real por meio de processo destrutivo e, embora seja notável sua importância, o método de determinação direta ainda é complexo, caro e destrutivo (SANQUETTA, C. R. *et al.*, 2015). Não obstante, Martins *et al.* (2017) ainda destacam a inviabilidade dessa abordagem para áreas extensas, devido ao custo e ao tempo de execução. Já os métodos indiretos consistem na estimativa através da modelagem da biomassa, o que possibilita o estudo de grandes áreas sem a necessidade da mensuração direta de todos os indivíduos.

O método indireto consiste na utilização de modelos matemáticos que buscam prever o valor da variável de interesse, no caso a biomassa, a partir de variáveis independentes que tenham acentuada relação de causa x efeito com a variável de interesse. Muitos trabalhos destacam a variabilidade nas estimativas da biomassa, mas apresentaram potencial de utilização satisfatório para os modelos matemáticos utilizados em geral (SILVEIRA, 2009; SCHIKOWSKI *et al.*, 2013).

As equações para biomassa refletem as relações existentes entre as variáveis correlacionadas e podem evitar o processo oneroso de mensuração de todo um fragmento florestal (FONTOURA *et al.*, 2017). Entretanto, é importante destacar a grande variabilidade natural nos dados em espécies nativas de regiões tropicais e subtropicais (SANQUETTA *et al.*, 2015). Com isso, é de suma relevância que estudos sejam feitos a fim de identificar as maiores fontes de variação no ajuste de modelos matemáticos a fim melhorar as estimativas.

Para SCHEPASCHENKO *et al.* (2018) existem também variações quanto a estrutura da biomassa e os indicadores relacionados decorrentes das distinções entre espécies, condições do clima, condições do solo e de forma substancial em relação ao tipo de floresta, idade, densidade e níveis de produtividade. A partir disso é possível verificar a necessidade de conhecer a biomassa nas diferentes tipologias florestais que formam as florestas tropicais, diversas em todos os fatores ambientais.

Nesse sentido, observa-se uma carência em estudos desse tipo em áreas de Mata Atlântica, principalmente no estado do Rio de Janeiro. Logo, encontrar uma equação que possa contribuir para estimar a biomassa nestas áreas é importante e justifica a realização de pesquisas neste intuito, salvaguardando as restrições e as dificuldades de pesquisas destrutivas no estado. Assim, o objetivo deste trabalho foi ajustar e testar modelos matemáticos para estimar a biomassa do fuste em espécies florestais.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Modelos alométricos

Alometria é o estudo das alterações das formas e dos processos dos organismos (SILVA, 2007). Pode ser entendida sob dois significados: como o crescimento de uma parte do organismo em relação ao crescimento do organismo inteiro ou de parte dele e como o estudo das consequências do tamanho sobre as formas e os processos (SILVA, 2007).

O estudo alométrico é baseado na análise de regressão, que consiste na associação entre duas ou mais variáveis quantitativas. O estudo da regressão consiste em analisar uma tendência entre as variáveis de fácil obtenção, chamadas variáveis independentes, e uma variável de difícil obtenção, chamada variável dependente. Assim, cria-se uma linha média de valores dispostos no meio da tendência observada, propiciando um único valor da variável dependente em função das independentes.

Esta análise permite que modelos matemáticos sejam desenvolvidos em função da correlação existente entre as variáveis. Os modelos desenvolvidos podem ser ajustados através da análise de regressão, definindo parâmetros em função do conjunto de dados para cada tipo de modelo.

Isto caracteriza a equação alométrica ajustada, ou seja, coeficientes oriundos do conjunto de dados locais e, a partir da escolha do modelo que apresente as melhores equações ele será teoricamente utilizado na estimativa da fitomassa das comunidades em estudo. Evitando assim o processo oneroso de mensuração completa de todos os indivíduos do fragmento florestal e a necessidade do corte de outras árvores (BURGUER, 2005; FONTOURA *et al.*, 2017).

A relação entre variáveis permite que modelos sejam gerados a partir de análises adimensionais e possam ser aplicados para a comunidade em que se encontram, assim como em formações similares (BURGUER, 2005). Logo, pode-se dizer que a alometria no contexto florestal é o estudo da biomassa em relação às partes do todo (SILVA, 2007).

Para a construção de equações eficientes as variáveis independentes do modelo devem apresentar correlação alta com variável dependente. O tipo do modelo pode ser determinado em função do número de variáveis independentes e da natureza das equações (SILVA, 2007). O modelo será simples quando apresentar apenas uma variável independente, quando considerar mais de uma será classificado como múltiplo. Pode-se ainda ser de natureza linear ou não linear.

Os modelos lineares apresentam seus coeficientes de forma aditiva na estrutura matemática, já os modelos não lineares apresentam os parâmetros agregados de forma não aditiva (NETO, 2012). Este último, porém, geralmente é transformado através de logaritmo (natural ou base 10), ou seja, linearizado (SILVA, 2007). Mas devido sua aplicação permitir a estimativa em áreas mais extensas, os modelos não lineares são preferidos (ARAÚJO *et al.*, 2018).

Segundo Burguer (2005), muitos modelos alométricos específicos têm sido elaborados no âmbito das florestas tropicais, através das relações entre a massa (geralmente em peso seco) das árvores e seus dados dimensionais, como diâmetro, altura e densidade específica da madeira, na tentativa de testar e calibrar os modelos que melhor se adequem aos dados.

As variáveis mais utilizadas nas estimativas dos modelos alométricos são o diâmetro a altura do peito (DAP), por apresentar correlação positiva e significativa com o peso da árvore, altura total, altura comercial, diâmetro de copa e densidade básica da madeira (CHAVE *et al.*, 2005; FONTOURA *et al.*, 2017; ARAÚJO *et al.*, 2018).

Em virtude da enorme variabilidade natural presente nas florestas tropicais, principalmente para espécies nativas, muitos trabalhos são desenvolvidos a fim de avaliar os modelos já existentes, em precisão e facilidade de estimativa. Pois apenas uma expressão matemática pode não reproduzir essa variação natural e refletir em alteração na qualidade do ajuste ou estimativas espúrias (SANQUETTA *et al.*, 2015).

2.2 Modelagem de Biomassa florestal

A biomassa pode ser determinada direta ou indiretamente, o que se relaciona com o custo e a precisão da estimativa. No método de determinação direta há a medição real da biomassa através do corte e pesagem de cada compartimento das árvores escolhidas da amostra.

Alguns autores consideram que a determinação direta da biomassa (ou método destrutivo) proporciona estimativas mais confiáveis, uma vez que nesse procedimento é necessário abater as árvores. Tal fato agrega custo ao procedimento de determinação da biomassa além de restrições de uso legal (restrições à supressão da vegetação).

Os métodos diretos deveriam buscar serem menos tendenciosos, contudo, Brown *et al.* (1989) relataram que há tendenciosidade na amostragem dos dados e o que pode ocasionar viés nas estimativas da biomassa por meio da amostragem destrutiva. Esta tendenciosidade, segundo os autores anteriormente citados, ocorre porque esse procedimento é trabalhoso, levando o pesquisador a escolher sempre o que julga ser mais representativo, usualmente escolhendo um sítio denso, homogêneo e fácil de trabalhar.

A determinação da biomassa de forma indireta (não destrutiva) consiste em correlacionar a biomassa com alguma variável de fácil obtenção, sem ocorrer supressão ou destruição do material vegetal (SILVEIRA, 2009). Assim, as estimativas de biomassa podem ser feitas por meio de relações quantitativas ou matemáticas, como razões ou regressões de dados provenientes de inventários florestais (DAP, altura, volume etc.) ou da utilização de geotecnologias. A quantificação de forma indireta da biomassa é, portanto, uma alternativa que visa obter estimativas confiáveis sem onerar o trabalho de amostragem.

A busca por estimativas de biomassa florestal em diferentes fitofisionomias e espécies florestais de interesse econômico tem contribuído para a realização de estudos que objetivam sua quantificação indireta, através de modelos matemáticos. Nesse sentido, muitos autores buscam testar ou desenvolver equações confiáveis a partir de variáveis independentes de fácil obtenção, com custo reduzido e precisão elevada. Corroborando com esse interesse e com as deficiências de estudos para algumas espécies, Forrester *et al.* (2017) realizaram um extenso levantamento de dados na literatura europeia e constataram a elaboração de 973 equações disponíveis para a Europa. Entretanto, a maioria das equações são específicas e limitadas à utilização pelas condições edáficas, climáticas e de sítio.

Nas regiões tropicais também estão sendo realizadas pesquisas nesta linha, vide a grande diversidade encontrada. Para tanto, os modelos geralmente utilizam variáveis que apresentam correlação elevada com a variável de interesse e sejam significantes aos modelos, como DAP e altura. Contudo, alguns autores utilizam também outras variáveis, a exemplo da densidade básica da madeira, como apresentado por Chave *et al.* (2005) e Lima (2015) na busca por ganho de precisão das estimativas para a modelagem da biomassa.

Em grande maioria, os trabalhos retratam equações já desenvolvidas na literatura podendo haver adaptações ou comparações com modelos ajustados. Como exemplo temos Rezende *et al.* (2006), estudando o biomassa cerrado; Silveira (2009) para Floresta Ombrófila Densa na Mata Atlântica; Miranda *et al.* (2011) em árvores de reflorestamentos de restauração

para Mata Atlântica e Cerrado, Florentin *et al.* (2015) para Floresta Ombófila Mista; Aguiar *et al.* (2017) para Floresta Ombrófila Densa na Amazônia e Araújo *et al.* (2018) em floresta de restauração na Mata Atlântica.

Outros autores tratam especificamente da modelagem de espécies florestais com interesse econômico tanto para biomassa quanto para subsídio para determinação do estoque de carbono. A exemplo temos Sanquetta *et al.* (2014) para *Acacia mearnsii* De Wild.; Schikowski *et al.* (2013), para espécies de *Pinus*; Melo *et al.* (2014) em árvores de *Tabebuia cassinoides* (Lam.) DC.; Mognon *et al.* (2015) para a espécie *Dendrocalamus asper* e Fontoura *et al.* (2017) em área de regeneração natural de *Ateleia glazioviana* Baill.

Majoritariamente, os trabalhos que envolvem determinação de biomassa e carbono e, conseqüentemente, o ajuste de modelos alométricos para tal quantificação, envolvem métodos destrutivos para as análises. Isso está diretamente relacionado com a forte presença de estudos em áreas de restauração florestal, com espécies exóticas de interesse econômico e em formações florestais menos restritivas. Assim, podemos entender a carência em estudos desse tipo em áreas de Mata Atlântica, principalmente no estado do Rio de Janeiro.

2.3 Desempenho das equações de biomassa em florestas inequiduais

Existem inúmeras equações ajustadas para biomassa nas florestas tropicais, no entanto, ainda é um desafio encontrar o equilíbrio entre a precisão dos modelos testados e a eficiência da implantação dos mesmos (NAM *et al.*, 2016). Muitos deles são modelos genéricos para determinadas tipologias florestais e não consideram a variação entre espécies distintas, o que pode levar a imprecisão quando o conjunto de dados apresenta heterogeneidade.

É importante destacar que muitas fontes de erros podem contribuir para o desempenho não satisfatório no ajuste de modelos. Em virtude disso, Chave *et al.* (2004) estudaram de forma detalhada quatro possíveis fontes de erros associadas à estimativa da biomassa acima do solo, são elas: erro devido à medição das árvores; erro devido à escolha de um modelo alométrico relacionando biomassa acima do solo a outras dimensões das árvores; incerteza amostral, relacionada ao tamanho da parcela; e, representatividade de amostras à escala da paisagem. Isso demonstra a importância de boas análises para a escolha dos modelos.

Para isso, alguns critérios devem ser estabelecidos para a escolha e comparação entre os estimadores. A seleção do melhor modelo deve ser realizada com base em estatísticas de ajuste e precisão como Erro padrão da estimativa (S_{yx}), Coeficiente de determinação ajustado (R_{2aj}), análise gráfica dos resíduos, Bias (tendências) e raiz quadrada do erro médio (RQEM%).

O S_{yx} indica o quanto os valores observados variam em relação aos estimados, em termos médios, ou seja, a dispersão média (SANQUETTA, M. N. I. *et al.*, 2015). O R_{2aj} indica, em valores entre zero e um ou em porcentagem, o quanto a variação da variável dependente é explicada pela regressão, ou seja, a capacidade explicativa do modelo (SANQUETTA, M. N. I. *et al.*, 2015). Quanto mais próximo de 1 ou 100% mais eficiente é o ajuste da equação. A análise gráfica dos resíduos é um indicador fundamental e decisivo na avaliação da qualidade das estimativas, pois possibilita a detecção de possível tendenciosidade na estimativa da variável dependente ao longo de toda a linha de regressão.

O índice BIAS indica a tendência do modelo em superestimar ou subestimar os valores estimados, através do desvio médio dos valores estimados em relação aos valores observados, logo, quanto mais próximo de zero o seu valor mais confiável é o modelo ajustado. O RQEM% expressa a média dos erros absolutos, indicando a capacidade do

modelo em reproduzir a realidade, reportando os valores de erro na mesma dimensão da variável em estudo.

Além desses indicadores, ainda pode ser destacado o índice de desempenho (c), proposto por Allen *et al.* (1998). Esse índice nada mais é do que a relação entre uma estatística para avaliar a precisão (coeficiente de correlação de Pearson) e uma de exatidão (índice de Willmott). O coeficiente de correlação de Pearson (r) é uma medida que indica a associação linear entre variáveis (FIGUEIREDO FILHO e SILVA JÚNIOR, 2009). O índice de Willmott (W), por sua vez, mede o grau de concordância entre os valores estimados e os paramétricos (WILLMOTT, 1981).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Área de estudo

Os dados foram coletados em uma área de aproximadamente 10 ha, com coordenadas centrais 22°35'53" S, 43°42'15" O, no Parque Natural Municipal do Curió (PNMC), município de Paracambi, RJ (Figura 1). O PNMC é uma Unidade de Conservação caracterizada por alta diversidade biológica, com vegetação característica de Floresta Ombrófila Densa, majoritariamente com formação secundária (SMMAP e ITPA, 2010).

O parque está inserido na Bacia Hidrográfica do Rio Guandu, com clima predominante do tipo Aw, segundo a classificação de Köppen (ALVARES *et al.*, 2014), variando de brando subtropical a tropical quente/úmido. A altitude varia de 100 e 690 m, com temperatura e precipitação médias de 23,4°C e 1.050 mm, respectivamente (FRAGA *et al.*, 2012). De acordo com Teixeira *et al.* (2014), a vegetação do PNMC apresenta-se em regeneração natural, sem intervenções, por aproximadamente 60 anos.

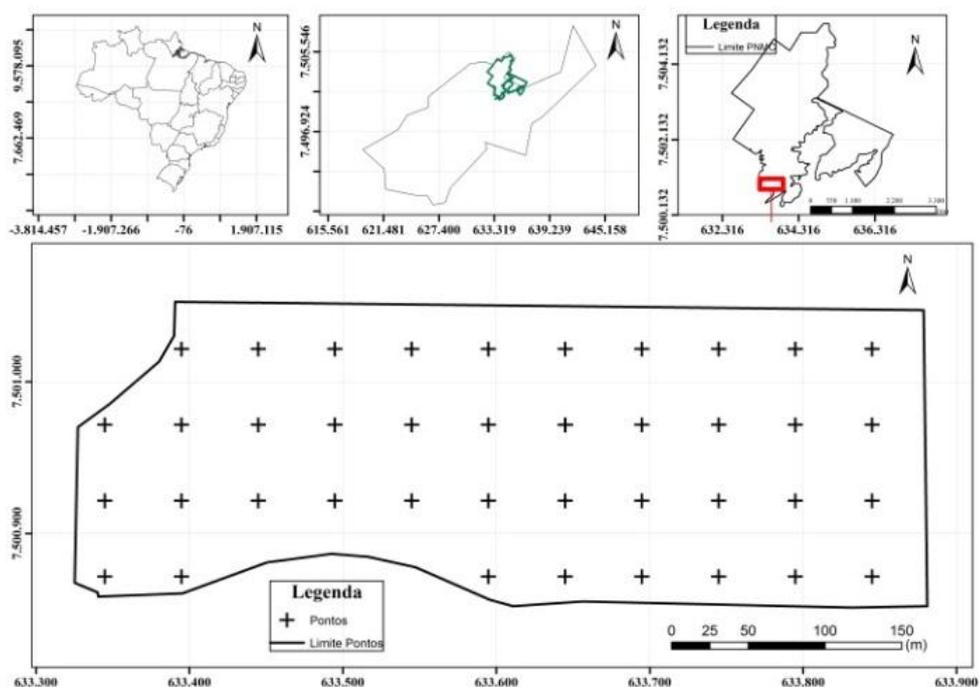


Figura 1. Localização da área de estudo e pontos amostrais no Parque Natural Municipal do Curió, Paracambi, RJ.

3.2 Coleta de dados

Os dados foram coletados em 40 unidades amostrais, por meio do processo de amostragem sistemática, alocadas pelo método de área variável de pontos quadrantes (COTTAM e CURTIS, 1956). Considerou-se sempre o eixo das ordenadas no sentido Norte-Sul. A intensidade amostral foi de um ponto a cada 2.500 m².

Em cada quadrante foram mensuradas as variáveis diâmetro a 1,30 m do solo (DAP) e a altura total da árvore mais próxima da origem do ponto amostral, com DAP ≥ 5,0 cm. Também foi obtida a distância de cada árvore até a origem do plano cartesiano, além de seu georreferenciamento, identificação botânica conforme o sistema APG III (2009) e classificação por família e grupo ecológico.

Para a determinação da biomassa foi realizada a coleta de amostras de madeira do fuste, utilizando trado de incremento (sonda de Pressler), sendo as amostras coletadas nas alturas de 0,70, 1,30 e 1,80 m do solo. Estas amostras foram dispostas em sacos plásticos, devidamente identificadas, acondicionadas em recipiente térmico a fim de evitar a perda da umidade e, por fim, encaminhadas ao Laboratório de Mensuração e Manejo Florestal da Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro.

3.3 Processamento preliminar dos dados

Para a caracterização dos dados amostrados no PNMC foram realizadas as distribuições de frequências das variáveis independentes DAP, altura total e densidade básica, de forma empírica. Assim, obteve-se a distribuição diamétrica, com os valores agrupados em 9 classes de diâmetro com amplitude de 10 cm; distribuição das alturas, com a estratificação em classes com amplitude de 3 metros, totalizando 10 classes; e distribuição da densidade básica da madeira em 5 classes com amplitude de 0,20 g.cm⁻³.

O volume saturado de cada amostra, parte integrante do cálculo da densidade básica para a estimativa da biomassa, foi determinado conforme demonstrado na Equação 1:

$$V_{saturado} = \frac{d^2 l \pi}{4} \quad (\text{Equação 1})$$

Em que: $V_{saturado}$ = volume saturado (cm³); d = diâmetro da amostra de madeira (cm); l = comprimento da amostra de madeira (cm).

As amostras foram pesadas com teor de umidade acima de 30% e posteriormente acondicionadas em estufa para secagem a $103 \pm 2^\circ\text{C}$, por 48 horas. Após a secagem, as amostras foram novamente pesadas para obtenção do peso seco (PS). A densidade básica da amostra foi determinada pelo estimador:

$$D_b = \frac{PS}{V_{saturado}} \quad (\text{Equação 2})$$

Em que: D_b = densidade básica (g.cm⁻³); PS = peso seco (g); $V_{saturado}$ = volume saturado (cm³).

A densidade média da madeira (\bar{d}_b) em g.cm⁻³, para cada árvore, foi obtida por meio da média das densidades das três amostras coletadas por indivíduo.

O volume total com casca de cada árvore, foi obtido por meio da Equação 3, apresentada por Scolforo *et al.* (2008), com $R^2 = 99,27$ e $S_{yx}(\%) = 23,24$.

$$\ln(VT_{cc}) = -9,975249 + [2,171914 \cdot \ln(DAP)] + [1,147984 \cdot \ln(H)] \quad (\text{Equação 3})$$

Em que: VT_{cc} = Volume total com casca (m^3); DAP = diâmetro a 1,30 metros do solo (cm); H = altura total da árvore (m); Ln = logaritmo natural.

A biomassa (Equação 4) em cada árvore foi estimada por:

$$B = \bar{d}_b \cdot VT_{cc} \quad (\text{Equação 4})$$

Em que: B = Biomassa (kg); \bar{d}_b = densidade média da madeira ($kg \cdot m^{-3}$); VT_{cc} = Volume total com casca (m^3).

3.4 Modelagem matemática

Para a realização do ajuste foram selecionadas 100 árvores do conjunto total de dados, escolhidas seguindo uma distribuição proporcional ao número de árvores por classe diamétrica, de forma que todas as classes fossem contempladas com pelo menos um indivíduo para o ajuste das equações. O grupo de dados restante foi utilizado para a validação das equações, originando os gráficos de validação da relação entre os valores estimados em função dos observados de biomassa (kg).

Realizou-se a análise descritiva das variáveis DAP, Ht, Db e biomassa total. Foram ajustados e testados 12 modelos matemáticos (Tabela 1) usualmente utilizados para a estimativa da variável biomassa no fuste de árvores (ARAÚJO *et al.*, 2018). Onze desses modelos utilizam diâmetro a 1,30 m do solo e/ou altura total como variáveis independentes e um modelo inclui a variável densidade básica da madeira como variável independente. Embora esta seja uma variável de difícil obtenção, sua inclusão buscou testar se existe ganhos em precisão nas estimativas de biomassa quando ela é considerada como variável de entrada na equação.

Tabela 1. Modelos matemáticos utilizados para estimar a biomassa total em árvores no Parque Natural Municipal do Curió, Paracambi, RJ.

Nº	Modelo	Estrutura matemática
1	Trorey	$y = \beta_0 + \beta_1 DAP + \beta_2 DAP^2 + e$
2	Assmann	$y = \beta_0 + \beta_1 (1/DAP) + e$
3	Henricksen	$y = \beta_0 + \beta_1 \ln(DAP) + e$
4	Stofells	$\ln(y) = \beta_0 + \beta_1 \ln(DAP) + e$
5	Curtis	$\ln(y) = \beta_0 + \beta_1 (1/DAP) + e$
6	Schumacher-Hall	$\ln(y) = \beta_0 + \beta_1 \ln(DAP) + \beta_2 \ln(Ht) + e$
7	Spurr	$y = \beta_0 + \beta_1 (DAP^2 Ht) + e$
8	Meyer	$y = \beta_0 + \beta_1 DAP + \beta_2 DAP^2 + \beta_3 DAP Ht + \beta_4 DAP^2 Ht + e$
9	Stoate	$y = \beta_0 + \beta_1 DAP^2 + \beta_2 Ht^2 + \beta_3 (DAP^2 Ht) + e$
10	Sanquetta	$y = \beta_0 + \beta_1 DAP^2 + \beta_2 DAP^2 Ht + e$
11	Naslund	$y = \beta_0 + \beta_1 DAP^2 + \beta_2 DAP^2 Ht + \beta_3 (DAP Ht^2) + \beta_4 Ht^2 + e$
12	Chave	$\ln(y) = \beta_0 + \beta_1 \ln(DAP) + \beta_2 (\ln(DAP))^2 + \beta_3 (\ln(DAP))^3 + \beta_4 \ln(d) + e$

Em que: y=biomassa (kg); DAP = diâmetro a 1,30m do solo (cm); Ht = altura total (m); d= densidade básica da madeira ($g \cdot cm^{-3}$); $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3$ e β_4 = coeficientes ajustados; ln = logaritmo neperiano; e = erro de estimativa.

Foi realizado o teste de Shapiro-Wilk para verificar a normalidade dos resíduos padronizados originados a partir de cada modelo ajustado. Para avaliar a precisão e selecionar a melhor equação foram considerados os indicadores de qualidade de ajuste coeficiente de determinação ajustado (Equação 5), erro padrão da estimativa (Equação 6), análise gráfica dos resíduos, Bias (Equação 7) e raiz quadrada do erro médio (Equação 8). Em seguida, foram avaliados o Critério de Informação de Akaike (Equação 9) e o Critério de Informação Bayesiano (Equação 10) para cada equação.

$$R^2_{aj.} = 1 - \left[\left(\frac{SQ_{res.}}{SQ_{total}} \right) \left(\frac{n-1}{n-p} \right) \right] \quad (\text{Equação 5})$$

$$S_{yx} (\%) = \left(\sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-p-1}} / \bar{y} \right) * 100 \quad (\text{Equação 6})$$

$$B = n^{-1} \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i) \quad (\text{Equação 7})$$

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

$$AIC = -2n \left(\frac{-n}{2} \ln \left(\frac{SQ_{res}}{n} \right) \right) + 2p \quad (\text{Equação 9})$$

$$BIC = -2n \left(\frac{-n}{2} \ln \left(\frac{SQ_{res}}{n} \right) \right) + \ln(n)p \quad (\text{Equação 10})$$

Em que: $R^2_{aj.}$ = coeficiente de determinação ajustado; $S_{yx} (\%)$ = erro padrão da estimativa em porcentagem; $RQEM\%$ = raiz quadrada do erro médio; B = Bias; y_i = biomassa observada (kg); \hat{y} = biomassa estimada (kg); \bar{y} = média aritmética de biomassa observada (kg); n = número de dados observados; p = número de coeficientes do modelo; $SQ_{res.}$ = soma dos quadrados dos resíduos; SQ_{total} = soma dos quadrados total; AIC = Critério de Informação de Akaike; BIC = Critério de Informação Bayesiano; e \ln = logaritmo natural.

Foram calculados o índice de Willmott, coeficiente de correlação de Pearson e o índice de desempenho das equações ajustadas (Equações 11, 12 e 13). Segundo Araújo (2015), o critério de interpretação adaptado do desempenho pode ser caracterizado como péssimo ($0 \leq c \leq 0,20$), ruim ($0,20 < c \leq 0,40$), regular ($0,40 < c \leq 0,60$), bom ($0,60 < c \leq 0,80$) e ótimo ($0,80 < c \leq 1,0$).

$$W = \frac{\sum_{i=1}^n (\hat{y}_i - y_i)^2}{\sum_{i=1}^n (|\hat{y}_i - \bar{y}_i| + |y_i - \bar{y}_i|)^2} * 100 \bar{X} \quad (\text{Equação 11})$$

$$R = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^n \left(\frac{X_i - \bar{X}_i}{S_x} \right) \left(\frac{y_i - \bar{y}_i}{S_y} \right) \quad (\text{Equação 12})$$

$$c = W \times R \quad (\text{Equação 13})$$

Em que: W = índice de Willmott; R = coeficiente de correlação de Pearson; c = índice de desempenho dos modelos; y_i = i -ésimo valor observado; \hat{y}_i = i -ésimo valor estimado; \bar{y}_i = média dos valores observados; n = número de observações.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram amostradas 160 árvores, pertencentes a 57 espécies, 47 gêneros e 30 famílias. As estatísticas descritivas indicaram alta variabilidade das variáveis diâmetro, altura, densidade e biomassa (Tabela 2), como também pode ser verificado em Urbano *et al.* (2008) e Fontoura *et al.* (2017). A biomassa apresentou a maior variabilidade, com coeficiente de variação atingindo valor próximo de 300%, característica de florestas inequiâneas, em decorrência dos diversos fatores que afetam no estoque de biomassa nas árvores. A média do DAP pode ser explicada pela maior distribuição das espécies na classe definida como secundária inicial (41%), indicando a transição de estágios iniciais para estágios mais avançados de sucessão ecológica, com a presença de espécies clímax de grande porte já no local.

Tabela 2. Estatísticas descritivas para as variáveis dependentes e independentes analisadas no ajuste dos modelos.

Estatística	Biomassa	DAP	Ht	Db
Média	252,07	15,71	9,86	0,57
Mínimo	2,36	5,03	3,00	0,09
Máximo	6226,87	92,31	30,00	0,81
Variância	583228,55	238,30	32,13	0,02
Desvio padrão	763,69	15,44	5,67	0,14
Curtose	30,65	7,01	2,61	0,98
Assimetria	5,08	2,55	1,71	-0,87
CV	302,97	98,28	57,50	23,72

Em que: DAP = diâmetro a 1,30m do solo (cm); Ht = altura total (m); Db = densidade básica da madeira (g.cm^{-3}); CV = coeficiente de variação (%).

A estrutura diamétrica apresentou tendência exponencial negativa, característica de florestas inequiâneas, que estão em contínua sucessão. O maior número de árvores (114) ocorreu na menor classe de diâmetro, com intervalo de 5 a 15 cm (Figura 2a), indicando grande número de indivíduos regenerantes. Porém, com poucos indivíduos nas demais classes, indicando ser uma área em estágio médio de desenvolvimento (SILVA, *et al.* 2018) mas com muitos indivíduos regenerantes. Quanto à distribuição das alturas (Figura 2b) nota-se assimetria positiva, o que remete a uma maior representatividade nas classes com valores mais baixos da variável. A densidade básica média da madeira apresentou distribuição assimétrica à esquerda, ou seja, negativa, devido à presença de espécies de baixa densidade, o que faz aumentar o número de classes, mas a maior concentração de indivíduos encontra-se próximo à média. (Figura 2c).

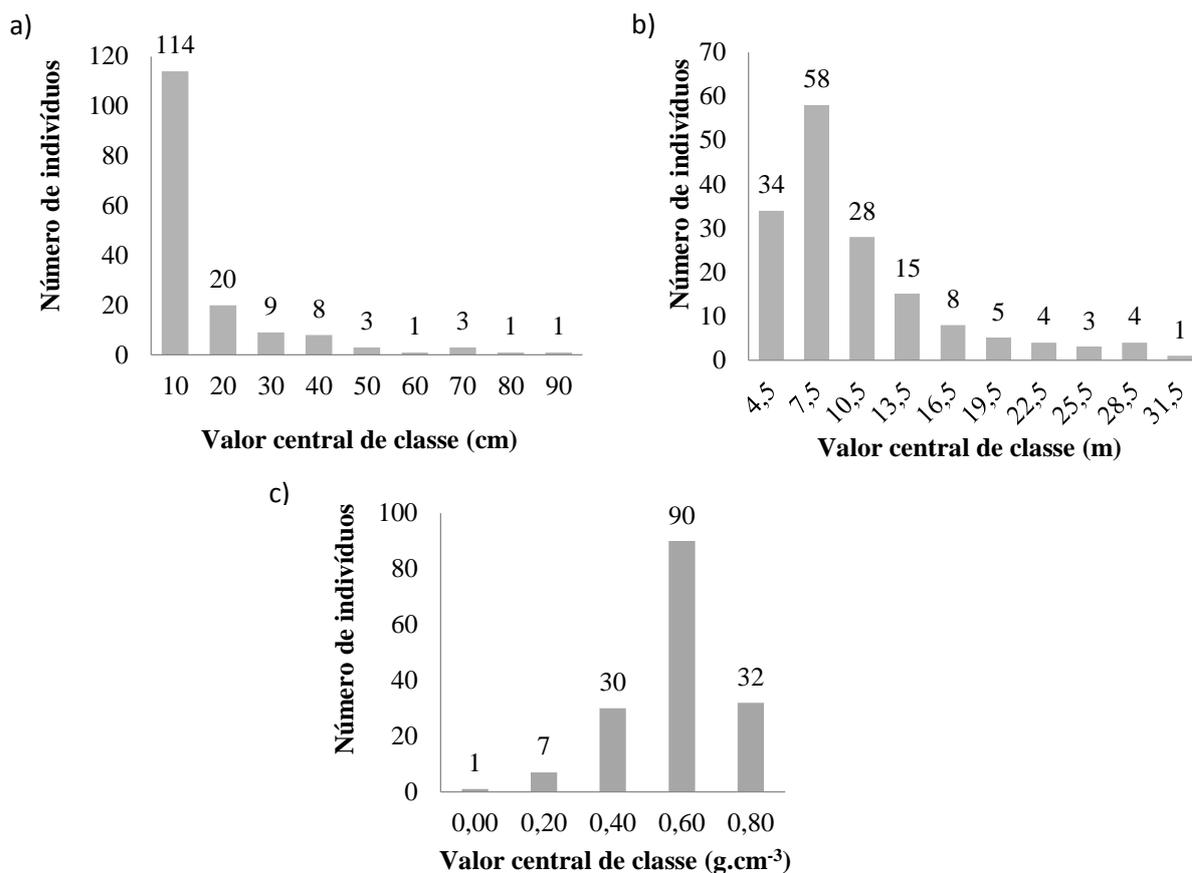


Figura 2. a) Distribuição diamétrica; b) Distribuição de altura; c) Distribuição de densidade básica dos indivíduos amostrados no Parque Natural Municipal do Curió, Paracambi, RJ.

Os parâmetros e estatísticas de ajuste dos modelos testados estão apresentados na Tabela 3. Os modelos de Trorey, Assmann, Henricksen, Stofells, Curtis e Schumacher-Hall apresentaram significância em todos os coeficientes, com 95% de probabilidade, sendo o modelo de Schumacher-Hall o único de dupla entrada.

O modelo de Schumacher-Hall foi o que apresentou melhores estatísticas de ajuste, com menor erro padrão da estimativa e maior coeficiente de determinação ajustado. Os modelos com apenas uma variável independente foram os que apresentaram os menores valores de R^2_{adj} , e os maiores erros de estimativas, caracterizando baixa precisão, assim como os maiores valores para AIC e BIC. Isso indica que apenas uma variável independente não foi capaz de explicar satisfatoriamente as variações da biomassa, que apresenta grande variabilidade. Quando a variável Ht foi incluída (modelos de Schumacher-Hall, Spurr, Meyer, Stoate, Sanquetta, Naslund e Chave) ocorreu uma melhoria significativa na acurácia dos modelos, apresentando R^2_{adj} maior que 0,97 além de uma redução nos valores de AIC e BIC. Silva (2007), já destacava que a maioria dos trabalhos realizados com estimativa de biomassa apresentam bons resultados para R^2_{adj} , com valores superiores a 0,95 e que as variáveis mais utilizadas são DAP e Ht.

As estimativas mais acuradas quando a variável altura foi considerada também pode ser observada nos trabalhos de Araújo *et al.* (2018) para a predição da biomassa em área de restauração na Mata Atlântica e de Schikowski *et al.* (2013) para estimativas da biomassa do fuste em *Pinus* spp. É possível notar através destes trabalhos que o erro padrão da estimativa

é menor nos modelos para estimar biomassa quando o estudo é realizado apenas com uma espécie.

O teste de normalidade de Shapiro-Wilk para os resíduos padronizados indicou não normalidade para quase todos os modelos, excetuando-se o modelo de Curtis e Chave. Isso difere dos resultados obtidos por Melo *et al.* (2014), que encontraram normalidade dos resíduos ao utilizar outros testes de normalidade para as estimativas das variáveis dependentes em árvores de caixeta. Assim como Araújo *et al.* (2018), que obtiveram normalidade em seus resíduos pelo teste de Shapiro-Wilk para seu conjunto de dados em área de restauração florestal em Seropédica, RJ.

A normalidade para o modelo de Curtis, embora seja um dos pressupostos da regressão, não resultou em estimativas eficientes em nenhum critério de avaliação e todas as estatísticas de ajuste se mostraram insuficientes e tendenciosos (Tabelas 3 e 4). Diferentemente do modelo de Chave, que apresentou as melhores estatísticas de ajuste.

Tabela 3. Parâmetros e estatísticas de ajuste dos modelos para estimativa da biomassa total no fuste.

Modelo	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	S _{yx} %	R ² _{adj.}	AIC	BIC
Trorey	101,06*	-17,33*	0,88*			58,25	0,96	102.794,91	102.802,72
Assmann	1.264,17*	-9.798,52*				254,93	0,28	132.418,98	132.424,19
Henricksen	-2.013,72*	924,14*				207,49	0,52	128.301,01	128.306,22
Stofells	-2,95*	2,58*				56,30	0,96	102.212,83	102.218,04
Curtis	6,99*	-35,23*				259,89	0,25	132.805,04	132.810,25
Schumacher-Hall	-3,62*	2,07*	0,91*			48,60	0,97	99.172,47	99.180,29
Spurr	-6,34	0,03*				48,90	0,97	99.394,60	99.399,81
Meyer	-2,35	5,04	-0,01	-0,58	0,03*	46,13	0,98	98.131,13	98.144,15
Stoate	18,58	0,01	-0,31*	0,03*		47,84	0,98	98.755,21	98.765,63
Sanquetta	-10,86	0,04	0,03*			49,06	0,97	99.359,72	99.367,53
Naslund	-25,68	-0,17*	0,05*	-0,05*	1,03*	44,75	0,98	97.314,70	97.327,72
Chave	-0,80	0,92	0,57	-0,06	1,06*	38,83	0,98	94.478,31	94.491,34

Em que: S_{yx}% = Erro padrão da estimativa em porcentagem; R²_{aj} = Coeficiente de determinação ajustado; AIC = Critério de Informação de Akaike; BIC = Critério de Informação Bayesiano. *significativo no teste F ao nível de 5% de probabilidade.

A tendência dos modelos em subestimar ou superestimar a biomassa pode ser observada na Tabela 4, assim como é possível observar o índice de desempenho dos modelos. Foi atingido um nível de desempenho ótimo para o modelo de Chave, com c=99, seguido dos modelos de Naslund, Sanquetta, Spurr e Schumacher-Hall com c=0,98, caracterizando as equações provenientes destes modelos como os melhores.

Tabela 4. Estimativas de tendências e desempenhos dos modelos para estimativa da biomassa total em ordem decrescente de índice de desempenho (c).

Modelo	B	RQEM%	R	W	c
Chave	4,09E-01	37,85	0,99	1,00	0,99
Naslund	-3,87E-14	43,61	0,99	0,99	0,98
Sanquetta	-4,89E-14	48,32	0,99	0,99	0,98
Spurr	-1,82E-14	48,41	0,99	0,99	0,98

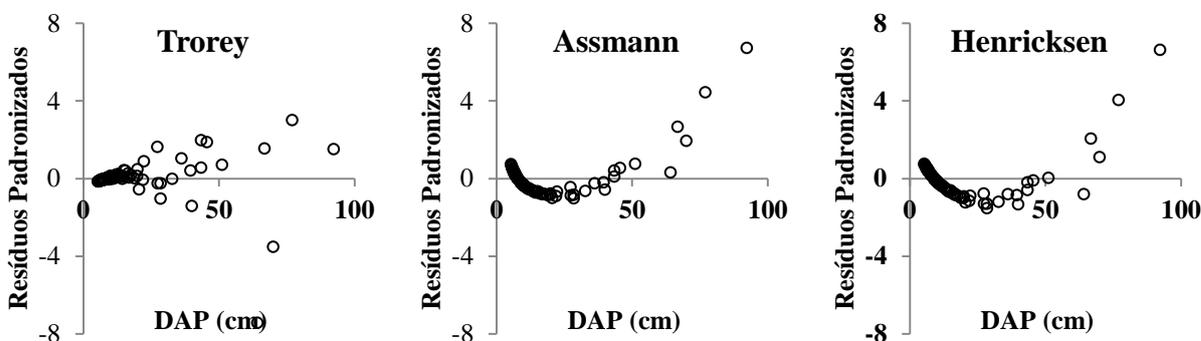
Schumacher-Hall	7,13E+00	47,87	0,99	0,99	0,98
Trorey	-1,46E-13	57,37	0,98	0,99	0,97
Stoate	0,00E+00	46,87	0,92	0,99	0,91
Meyer	2,50E-14	45,43	0,91	0,99	0,91
Henricksen	-3,27E-13	205,4	0,72	0,82	0,59
Curtis	1,78E+02	257,28	0,82	0,48	0,39
Stofells	1,10E+01	55,73	0,04	0,99	0,04
Assmann	-2,82E-13	252,36	0,53	-1,51	-0,81

Em que: B = Bias; RQEM% = raiz quadrada do erro médio; R = coeficiente de correlação de Pearson; W = índice de Willmott c = índice de desempenho dos modelos.

Na análise gráfica dos resíduos (Figura 5) foi observada uma tendência na estimativa da biomassa em superestimar os valores preditos em todos os modelos ao longo da linha de regressão, além de apresentar uma concentração desses valores em torno dos menores DAP's. Os modelos de Stofells, Schumacher-Hall e Chave apresentam uma dispersão mais heterocedástica nos valores de biomassa próximas dos menores valores de DAP, mas são os que possuem menor heterocedasticidade para os valores preditos de biomassa nos maiores valores de DAP. Tendência essa inversa aos outros modelos considerados com boa acurácia.

O modelo que mais se destacou estatisticamente foi o modelo de Chave, apresentando o menor $S_{yx\%}$ (38,83%) e $R^2_{adj.}$ de 0,98. Também obteve os menores valores de Bias, RQEM%, AIC e BIC. A distribuição dos resíduos em função do DAP (cm) apresentou uma dispersão heterocedástica acentuada com leve viés em superestimar as estimativas, conforme pode ser observado na análise gráfica (Figura 5), entretanto não descaracteriza sua superioridade. Outro modelo que pode ser destacados na análise do ajuste com variáveis de fácil obtenção, foi Naslund, que apresentou $R^2_{adj.}$ de 0,98, BIAS de $-3,87E-14$ e RQEM% de 43,61. Além de valores de AIC e BIC de 97.314,70 e 97.327,72, respectivamente

O modelo Chave considera o diâmetro a 1,30 m do solo e a densidade básica da madeira como variáveis independentes. Desse modo, podemos considerar que a normalidade dos seus resíduos e o ganho em precisão do modelo pela aplicação de uma variável de difícil obtenção, como a densidade básica, contribuiu para o a melhoria das estimativas do modelo, justificando sua utilização para o conjunto de dados analisados. Araújo *et al.* (2018) não encontraram ganhos significativos na acurácia na estimativa da biomassa com a inclusão da variável densidade para árvores de restauração.



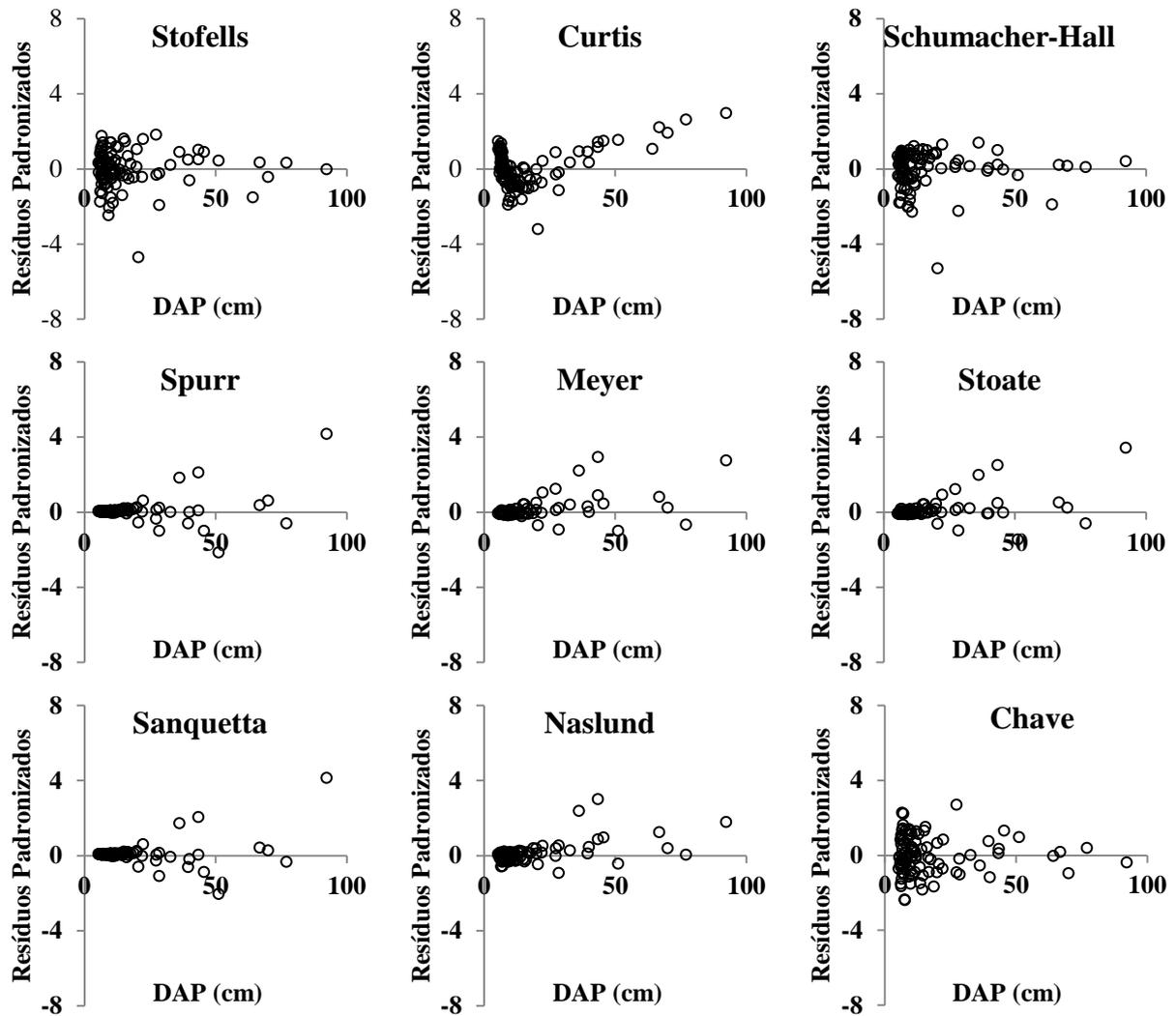


Figura 3. Distribuição gráfica dos resíduos padronizados das equações para as estimativas de biomassa das árvores amostradas no Parque Natural Municipal do Curió, Paracambi, RJ.

Após o ajuste das equações foi realizada a validação dos dados com o grupo de 60 árvores separado inicialmente. Esse procedimento possibilitou a análise gráfica do comportamento da estimativa da biomassa por meio da relação entre a variável dependente estimada e variável dependente observada.

Pode-se observar pela Figura 6 que os modelos ajustados em função de uma variável independente (DAP), em sua maioria, não apresentaram exatidão em suas previsões. Os modelos que melhor se distribuem em torno da linha média de tendência são os modelos de Schumacher-Hall, Spurr, Meyer, Stoate, Sanquetta, Naslund e Chave, com destaque para o modelo de Spurr (modelo 7) e Sanquetta (10), que apresentam os valores dos coeficientes mais próximos de 0 e 1, o que caracteriza exatidão de um modelo. Quando os coeficientes correspondem a esses valores referenciais significa que a relação entre a variável estimada e a observada retrata uma linha de regressão com inclinação de 45° ($\beta_1 = 1$) e passando pela origem ($\beta_0 = 0$).

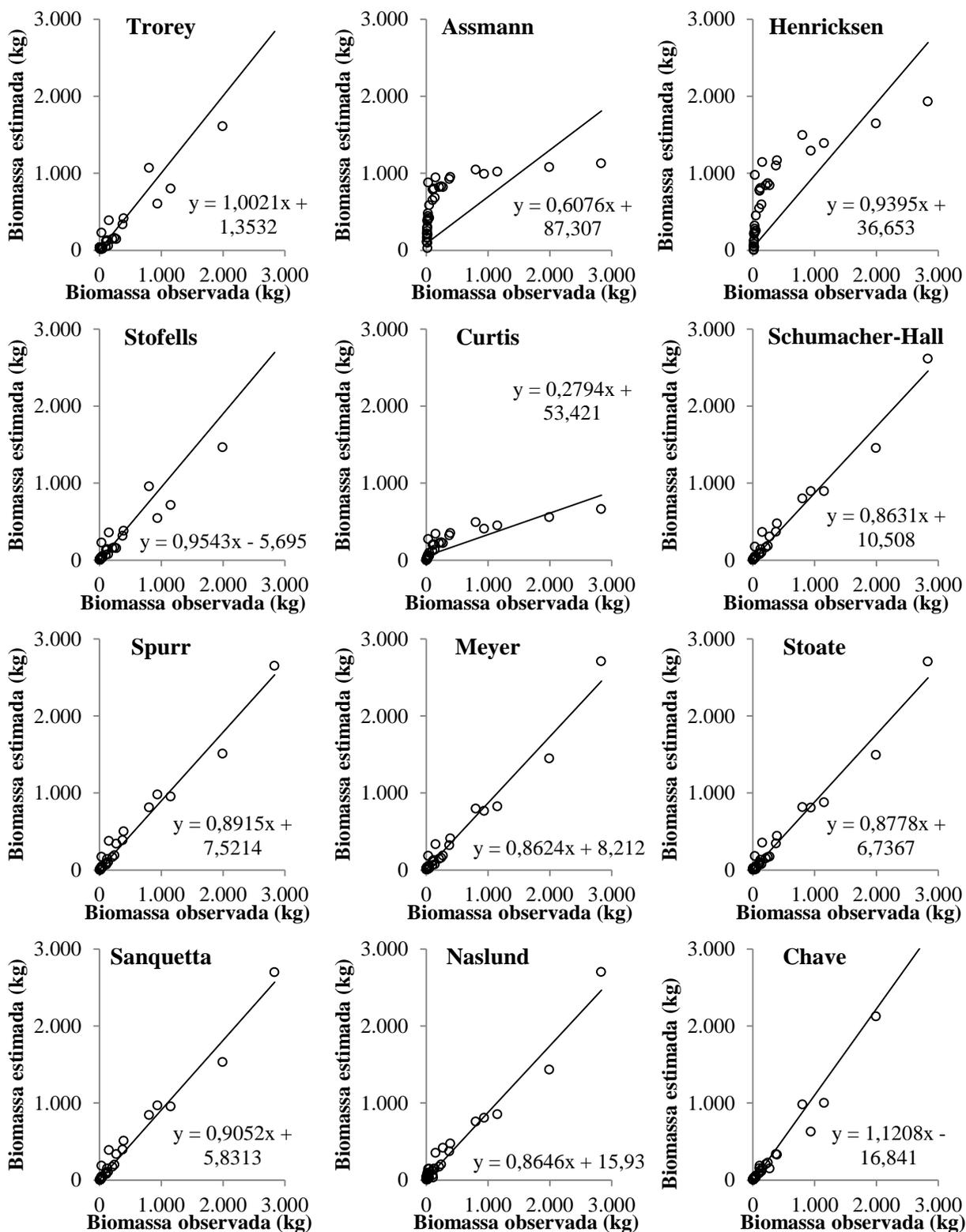


Figura 4. Relação entre biomassa estimada e biomassa observada, em kg, para o conjunto de dados amostradas no Parque Natural Municipal do Curió, Paracambi, RJ.

Cabe ressaltar que as florestas inequiduais apresentam variabilidade natural de acordo com as características do local, clima, tipo de formação etc. Logo, uma alternativa para buscar

melhorias no poder preditivo para os modelos de biomassa é a estratificação dos dados por classe de diâmetro, por grupo ecológico ou por espécie, o que faz minimizar a variância dos dados gerar ajustes mais consistentes, como realizado por Melo *et al.*, (2014) para árvores de caixeta; Urbano *et al.*, (2008) para árvores de bracatinga e Miranda *et al.*, (2011) para árvores de reflorestamentos de restauração.

5. CONCLUSÕES

Os modelos de dupla entrada apresentaram boas estatísticas de ajuste para a biomassa no fuste de espécies arbóreas. No entanto, a inclusão da densidade básica da madeira promoveu ganhos em precisão e exatidão na estimativa, suscitando sua utilização.

O modelo de Chave foi apropriado para estimar a biomassa arbórea, demonstrando os melhores indicadores estatísticos (maior R^2_{adj} e $S_{yx\%}$), além dos menores valores de AIC e BIC e maior índice de desempenho.

Recomenda-se a realização de estratificação dos dados quanto à estrutura diamétrica, grupos ecológicos e espécies a fim de buscar melhoria a eficácia dos ajustes.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALLEN, R. G. *et al.* Crop evapotranspiration: Guidelines for computing crop water requirements. Rome: FAO, 1998. 15 p. (FAO. Irrigation and Drainage Paper, 56).

ALVARES, C. A. *et al.* Koppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2014.

APG III. An update of the Angiosperm Phylogeny Group classification for the orders and families of flowering plants: APG III. **Botanical Journal of the Linnean Society**, v. 161, p. 105-121, 2009.

ARAÚJO, E. J. G. **Métodos de amostragem para a regeneração natural de *Eremanthus erythropappus* (DC.) MacLeish em áreas submetidas ao sistema de manejo com porta sementes**. 2015. 158 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR.

ARAÚJO, E. J. G. *et al.* Allometric models to biomass in restoration areas in the Atlantic rain forest. **Floresta e Ambiente**, v. 25, n. 1, 2018. <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.019316>

BURGER, D. M. **Modelos alométricos para a estimativa da fitomassa de Mata Atlântica na Serra do Mar, SP**. 2005. 112 f. Tese (Doutorado em Ciências) - Universidade de São Paulo, São Paulo, SP.

CHAVE, J. *et al.* Error propagation and scaling for tropical forest biomass estimates. **Philosophical Transactions of the Royal Society**, v. 359, issue 1443. 409-420, 2004. doi: 10.1098/rstb.2003.1425

CHAVE, J. *et al.* Tree allometry and improved estimation of carbon stocks and balance in tropical forests. **Oecologia** 145 p. 2005.87–99 DOI 10.1007/s00442-005-0100-x. 2005.

COTTAM, G.; CURTIS, J. T. The use of distance measures in phytosociological sampling. **Ecology**, v. 37, n. 3, p. 451-460, 1956.

FIGUEIREDO FILHO, D. B.; SILVA JÚNIOR, J. A. Desvendando os Mistérios do Coeficiente de Correlação de Pearson (r). **Revista Política Hoje**, v. 18, n. 1, 2009.

FIORENTIN, L. D. *et al.* Quantificação e modelagem da biomassa e carbono da regeneração natural em área de Floresta Ombrófila Mista. **Revista Brasileira de Biomassa**, São Paulo, v. 33, n. 2, p. 251-267, 2015.

FONTOURA, M. R. *et al.* Modelos alométricos para estimativa de biomassa em área de regeneração natural de *Ateleia glazioviana* BAILL. **FLORESTA**, Curitiba, PR, v. 47, n. 4, p. 469-478, out/dez. 2017. ISSN eletrônico 1982-4688 DOI: 10.5380/rf.v47i4.53988

FORRESTER, D. I. *et al.* Generalized biomass and leaf area allometric equations for European tree species incorporating stand structure, tree age and climate. **Forest Ecology and Management**, v. 396, p. 160-175, 2017. <http://dx.doi.org/10.1016/j.foreco.2017.04.011>

FRAGA, M. E. *et al.* Interação microrganismo, solo e flora como condutores de biodiversidade na Mata Atlântica. **Acta Botânica Brasilica**, v. 26, n. 4, p. 857-865, 2012.

GAMA, D. R.; VASCONCELLOS, J. R.; BELDINI, T. P. Estoque de carbono por grupo ecológico na Floresta Nacional do Tapajós AGUIAR, **Revista ESPACIOS**. ISSN 0798 1015 v. 38, n. 32, 2017.

MARTINS, A. P. M. *et al.* Comparação de métodos de quantificação de carbono em bracatinga (*Mimosa scabrella* Benth.). **BIOFIX Scientific Journal**, v. 2, n. 1, p. 16-21, 2017. DOI: dx.doi.org/10.5380/biofix.v2i1.50329

MIRANDA, D. L. C.; MELO, A. C. G.; SANQUETTA, C. R. Equações alométricas para estimativa de biomassa e carbono em árvores de reflorestamentos de restauração. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v. 35, n. 3, p. 679-689, Edição Especial, 2011. <http://dx.doi.org/10.1590/S0100-67622011000400012>

MOGNON, F. *et al.* Alocação e modelagem da biomassa em *Dendrocalamus asper*. **FLORESTA**, Curitiba, PR, v. 45, n. 1, p. 1-10, 2015. ISSN eletrônico 1982-4688 / ISSN impresso 0015-3826 DOI:10.5380/rf.v45i1.3509

MOREIRA-BURGER, D.; DELITTI, W. B. C. Fitomassa epigéa da mata ciliar do rio Mogi-Guaçu, Itapira – SP. **Revista Brasileira de Botânica**, v. 22, n. 3, p. 429-435, 1999.

NAM, V. T.; KUIJK, M. V.; ANTEN, N. PR. Allometric equations for aboveground and belowground biomass estimations in an evergreen forest in Vietnam. **PLoS ONE**, v. 11, n. 6, 2016. <https://doi.org/10.1371/journal.pone.0156827>

NETO, T. P. P. **Comparação de modelos lineares e não lineares em relações hipsométricas para clones de *Eucalyptus* spp., no pólo gesseiro de Araripe-PE.** Dissertação (mestrado em Ciências Florestais), Universidade Federal Rural de Pernambuco, Recife, p. 74, 2012.

SANQUETTA, C. R. *et al.* Estoques de biomassa e carbono em povoamentos de acácia negra em diferentes idades no Rio Grande do Sul. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 103, p. 361-370, set. 2014.

SANQUETTA, C. R. *et al.* Comparison of data mining and allometric model in estimation of tree biomass. **BMC Bioinformatics** (2015) 16:247 DOI 10.1186/s12859-015-0662-5

SANQUETTA, M. N. I. *et al.* Equações de biomassa para aroeira-pimenteira (*Schinus terebinthifolius* RADDI). **Enciclopédia Biosfera**, Centro Científico Conhecer, Goiânia, v. 11, n. 22, p. 3604-3612, 2015.

SCHIKOWSKI, A. B.; CORTE, A. P. D.; SANQUETTA, C. R. Modelagem do crescimento e de biomassa individual de Pinus. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 33, n. 75, p. 269-278, 2013.

SCOLFORO, J. R. *et al.* **Inventário florestal de Minas Gerais: equações de volume, peso de matéria seca e carbono para diferentes fisionomias da flora nativa.** Lavras: UFLA, 2008. 216 f.

SILVA, R. P. **Alometria, estoque e dinâmica da Biomassa de Florestas primárias e secundárias na região de Manaus (AM).** 2007. 152 f. Tese (Doutorado em Ciências de Florestas Tropicais) - Instituto de Pesquisas Amazônicas/Universidade Federal do Amazonas, Manaus, AM.

SILVA, L. C. *et al.* Estoques de biomassa e carbono em unidade de Conservação no bioma Mata Atlântica. **BIOFIX Scientific Journal**, v. 3, n. 2, p. 243-251, 2018. DOI: dx.doi.org/10.5380/biofix.v3i2.59592

SILVEIRA, P. Ajuste de modelos matemáticos para estimar biomassa aérea em floresta ombrófila densa. **FLORESTA**, Curitiba, PR, v. 39, n. 4, p. 743-752, out./dez. 2009.

SMMAP & ITPA - Secretaria Municipal de Meio Ambiente de Paracambi & Instituto Terra de Preservação Ambiental. **Plano de manejo do Parque Natural Municipal do Curió de Paracambi.** Paracambi, 2010.

SCHEPASCHENKO, D. *et al.* Improved Estimates of Biomass Expansion Factors for Russian Forests. **Forests**, v. 9, n. 6, p. 23, 2018. DOI:10.3390/f9060312

SOARES, C. P. B. *et al.* Equações para estimar estoque de carbono por hectare nos fustes das árvores de floresta estacional semidecidual. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 2, p. 579-588, 2016. ISSN 0103-9954.

SOUZA, E. A. B.; MACHADO, M. A. D.; VISMARA, E. S. Ajuste e seleção de modelos de biomassa arbórea multiespecífico através da validação cruzada. **Revista da estatística**, UFOP, v. 3, edição especial: 59ª Reunião Anual da Regional Brasileira da Sociedade Internacional de Biometria, 2014. ISSN 2237-8111.

TEIXEIRA, G. M. et al. Regeneração de floresta atlântica sob níveis diferenciados de perturbação antrópica: implicações para restauração. **Scientia Forestalis**, v. 42, n. 104, p. 543-554, 2014.

URBANO, E. *et al.* Equações para estimar o peso de carbono fixado em árvores de *Mimosa scabrella* Bentham (bracatinga) em povoamentos nativos. **Cerne**, Lavras, v. 14, n. 3, p. 194-203, 2008.

WILLMOTT, C. J. **On the validation of models**. *Physical Geography*, v. 2, n. 2, p. 184-194, 1981.