

LUCAS DALMOLIN CIARNOSCHI

MODELOS DE AFILAMENTO DO TRONCO DE *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze, NO OESTE DO ESTADO DE SANTA CATARINA.

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal, na Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Florestal.

Orientador: Dr. André Felipe Hess

Lages, SC

2016

Ficha catalográfica elaborada pelo(a) autor(a), com
auxílio do programa de geração automática da
Biblioteca Setorial do CAV/UDESC

Ciarnoschi, Lucas Dalmolin
Modelos de afilamento do tronco de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze, no Oeste do Estado de Santa Catarina / Lucas Dalmolin Ciarnoschi.
Lages - 2016.
155 p.

Orientador: André Felipe Hess
Co-orientador: Philipe Ricardo Casemiro Soares
Dissertação (Mestrado) - Universidade do Estado de Santa Catarina, Centro de Ciências Agroveterinárias Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Lages, 2016.

1. Multiprodutos. 2. Inventário Florestal. 3. Forma do Tronco. 4. Manejo Florestal. 5. Modelos Estatísticos. I. Hess, Andre Felipe. II. Soares, Philipe Ricardo Casemiro. III. Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal. IV. Título.

LUCAS DALMOLIN CIARNOSCHI

MODELOS DE AFILAMENTO DO TRONCO DE *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze, NO OESTE DO ESTADO DE SANTA CATARINA.

Dissertação apresentada ao Curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal, na Universidade do Estado de Santa Catarina, como requisito parcial para obtenção do grau de Mestre em Engenharia Florestal.

Banca examinadora

Orientador: _____

Dr. André Felipe Hess
Universidade do Estado de Santa Catarina

Membro externo: _____

Dr^a. Veridiana Padoin Weber
Universidade Tecnológica Federal do Paraná

Membro externo: _____

Dr. Emanuel Arnoni Costa
Bolsista PNPD – Capes - UDESC

Lages, 22 de fevereiro de 2016

A todos que de certa
forma marcaram minha
vida e me ajudaram a ser
quem eu sou hoje.

Dedico

AGRADECIMENTOS

Primeiramente agradeço a Deus, por nunca ter me abandonado e me guiado para enfrentar as batalhas que propôs durante esse período acadêmico e durante a minha vida toda.

Aos meus pais, Leoneri Ciarnoschi e Lucila Dalmolin Ciarnoschi, por sempre estarem me guiando para a melhor direção para que nessa fase de minha vida pudesse estar de cabeça erguida e com sensação de mais uma missão cumprida, sempre me confortando com palavras sábias e principalmente por estarem do meu lado e dentro do meu coração.

As minhas irmãs Débora Dalmolin Ciarnoschi e Larissa Dalmolin Ciarnoschi, as quais sempre estarão me apoiando, as quais tenho maior admiração do mundo.

A minha fiel companheira Ana Maria Alves de Souza Ribeiro, a qual tive o prazer de ter ao meu lado durante todos os dias desta etapa, dividindo bons e maus momentos.

Aos meus nonos Alberto Ângelo Cirarnoscki e Francisco Antônio Dalmolin e nonas Olga Lidia Ciarnoscki e Aldina Dalmolin que ajudaram a ser quem eu sou e devo muito a eles.

Ao meu orientador André Felipe Hess, por todo o conhecimento e atenção prestada, que além da grande amizade na universidade, como professor e orientador, transformou nosso convívio em uma amizade para a vida.

Ao meu amigo e companheiro de profissão Emanuel Arnoni Costa, pelo conhecimento que me passou durante o curto período de contato, pelas noites e madrugadas.

Aos meus professores e grandes amigos, Raul Silvestre, Geedre Adriano Borsoi e Jean Alberto Sampietro, durante almoços e conversas por alguns anos de faculdade e mestrado, os quais se tornaram amigos eternos e por eles tenho enorme admiração.

Aos meus amigos de infância Anderson Fontana, Murilo Tragancin, Bruno Reinaldi, Renato Ceron e Fabiano Trevisol, pelas festas e momentos de descontração que passamos juntos durante boa parte da nossa vida.

Aos meus amigos que fiz e conservei durante o período do mestrado.

Ao CAV – UDESC pela disponibilidade de recursos, estrutura e professores para que eu pudesse realizar o mestrado.

Ao Governo do Estado de Santa Catariana – FUMDES, por ter me concedido a bolsa de estudos está de fundamental importância para que pudesse realizar o trabalho.

Seria muito difícil relatar todos que me ajudaram a chegar até aqui, como também seria injusto deixar de citar algumas pessoas que foram essenciais para mais esse passo na minha vida.

Aos amigos que sempre estiveram presentes nos bons e maus momentos.

Obrigado a todos!

Não se pode viver verdadeiramente e desistir do que dá significado e propósito a uma vida inteira.

(Autor Anônimo)

RESUMO

CIARNOSCHI, Lucas Dalmolin. **Modelos de afilamento do tronco de Araucaria angustifolia (Bertol.) Kuntze, no Oeste do Estado de Santa Catarina.** 2016. **155f.** Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Universidade do Estado de Santa Catarina. Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Lages, 2016.

Este trabalho teve como objetivo avaliar dezenove modelos de afilamento divididos em cinco grupos quanto a estrutura, para à estimativa do perfil, altura relativa e volume em uma floresta plantada de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze. Os povoamentos estão localizados na região Oeste do estado de Santa Catarina, implantados nas décadas de 1970 e 1980. As árvores foram divididas em classes de diâmetro e de altura, por meio desta estratificação dividiu-se os dados em dois grupos sendo 70% utilizado para o ajuste e 30% utilizados para a validação das equações. No ajuste dos modelos as melhores estatísticas foram para o modelo descrito por Bi (2000), apresentando como R^2_{aj} 0,9852, Erro Padrão da Estimativa Relativo ($S_{yx}\%$) o valor de 6,95% e Critério de Informação Akaike (AIC) o valor de 964,5. Com base na análise gráfica dos resíduos, na estatística do Desvio (D), Soma do Quadrado do Erro Relativo (SQER) e Resíduo em porcentagem (RP), verificou-se que para a estimativa dos diâmetros ao longo do fuste as equações de forma variável obtiveram os melhores ajustes, sendo que a equação de Lee et al. (2003), obteve valor de D de -0,0796, SQER 6,8361 e RP de -0,3338.

Para estimativa das alturas em diferentes diâmetros a equação que melhor estimou as alturas foi a equação desenvolvida por Kozak (1988), tendo como valor de D -0,1471, SQER 0,1457 e RP -4,9396. Para estimativa dos volumes dos troncos a equação que se destacou foi a descrita por Lee et al. (2003), de forma variável, apresentando valor de D 0,0004, SQER 0,0028 e RP 0,2318. Portanto, para as estimativas dos diâmetros, alturas e volume o grupo das equações que melhor se destacaram foram as de forma variável e a equação que melhor apresentou os resultados de estimativas para as variáveis foi a equação proposta por Lee et al. (2003). No teste de qui-quadrado (χ^2) todas as equações mostraram-se aptas a realizar as estimativas. Para tanto, foram gerados um gráfico e uma tabela de sortimento os quais pode-se perceber a porcentagem de cada produto gerado e também o volume absoluto de madeira em cada classe de diâmetro.

Palavras-chave: multiprodutos, inventário florestal, forma do tronco, manejo florestal, modelos estatísticos.

ABSTRACT

CIARNOSCHI, Lucas Dalmolin. **MODELS OF TAPERING OF THE STEM OF *Araucaria angustifolia* (BERTOL.) KUNTZE, IN THE WEST OF THE STATE OF SANTA CATARINA.** 2016. 155f. Dissertation (master in forestry). Universidade do Estado de Santa Catarina. Graduate program in forest engineering, Lages, 2016.

This work aimed to evaluate nineteen tapering models divided into five groups as the framework for the estimation of the profile, relative height and volume on a planted forest of *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze. The settlements are located in the West of the State of Santa Catarina, deployed in the 1970 and 1980. The trees were divided into classes of diameter and height, by means of this stratification divided the data into two groups being 70% used for adjustment and 30% used for validation of the equations. In the adjustment of the models the best statistics were for the model described by Bi (2000), showing how R^2_{aj} . 0,9852, Standard Error of Estimate Relative (%) value of S_{yx} 6,95% and Akaike information criterion (AIC) 964,5 value. Based on the graphical analysis of waste, statistics of the deviation (D), Sum of the square of the relative error (SQER) and residue in percentage (RP), it was found that for the estimation of the diameter along the stem form equations variable obtained the best settings, and the equation of Lee et al. (2003), obtained from value D 6,8361, SRRP 0,0796 end RP 0,3338. To estimate the heights in different diameters equation that best estimated Heights was the equation developed by Kozak (1988), as the value

of D 0,1471, SRRQ 0,1457 and RP 4,9396. To estimate the volumes of mergers the equation that stood out was described by Lee et al. (2003), so variable, showing value of D 0,0004, SRRQ 0,2318 and RP 0,0028. Therefore, the estimates of the diameters, heights and the group volume of the equations that best stood out were those of variable shape and equation which best presented the results of estimates for the variables was the equation proposed by Lee et al. (2003). The Chi-square test (χ^2) all the equations were able to perform estimates. To do so, were generated a graph and a table of assortment which can figure out the percentage of each product generated and also the absolute volume of wood in each diameter class.

Keywords: multirisks, forest inventory, taper, forest management, statistical models.

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 – Croqui de representação da região oeste do estado de Santa Catarina, com os pontos onde se localizam as áreas que foram coletados os dados.....	55
Figura 2 - Procedimento para cubagem rigorosa dos troncos por Smalian.....	57
Figura 3 – Gráfico de resíduos (%) dos dados de ajuste das equações de afilamento em função do diâmetro (d_i), em cada posição medida.....	73
Figura 4 - Gráfico representativo dos sortimentos realizados para as classes de diâmetros em diferentes classes de altura de <i>Araucaria angustifolia</i> , na região oeste do estado de Santa Catarina.	116

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Distribuição dos indivíduos em classes de diâmetro a altura do peito (DAP) e em classes de alturas, além da escolha dos indivíduos para realizar a validação das equações (30%).	56
Tabela 2 – Características dendrométricas das árvores de <i>Araucaria angustifolia</i> .	57
Tabela 3 - Modelos estatísticos utilizados para estimativa do afilamento dos troncos de <i>Araucaria angustifolia</i> , na região oeste de Santa Catarina.	59
Tabela 4 - Estatísticas utilizadas para avaliar a acurácia das estimativas dos diâmetros (di), das alturas (hi) e do volume (v), dos troncos de <i>Araucaria angustifolia</i> amostrados.	65
Tabela 5 - Classes de sortimento para <i>Araucaria angustifolia</i> , na região oeste do estado de Santa Catarina.	67
Tabela 6 – Estatísticas de ajustes dos modelos de afilamentos segundo sua forma original.	70
Tabela 7 – Análise estatística dos valores residuais para a validação das equações de estimativa de diâmetros ao longo do tronco de <i>Araucaria angustifolia</i> na região oeste do estado de Santa Catariana.	79
Tabela 8 – Resultado dos valores ponderados para as estatísticas de validação das equações de estimativa de diâmetros ao longo do tronco de <i>Araucaria angustifolia</i> na região oeste do estado de Santa Catariana.	84
Tabela 9 - Análise estatística dos valores residuais para validação das equações para gerar estimativas das alturas ao longo do	

tronco de <i>Araucaria angustifolia</i> , na região oeste do Estado de Santa Catariana.....	89
Tabela 10 - Resultado dos valores ponderados para as estatísticas de validação das equações de estimativa das alturas ao longo do tronco de <i>Araucaria angustifolia</i> na região oeste do Estado de Santa Catariana.....	92
Tabela 11 - Análise estatística dos valores residuais para validação das equações para gerar estimativas dos volumes do tronco de <i>Araucaria angustifolia</i> , na região oeste do Estado de Santa Catariana.....	94
Tabela 12 - Resultado dos valores ponderados para as estatísticas de validação das equações de estimativa do volume do tronco de <i>Araucaria angustifolia</i> na região oeste do Estado de Santa Catariana.....	98
Tabela 13- Estatística de validação para as três variáveis estimadas durante o processo de validação dos dados de <i>Araucaria angustifolia</i> , na região oeste do Estado de Santa Catarina.	103
Tabela 14 - Resultado dos valores ponderados para as estatísticas de validação das equações de estimativa de diâmetros ao longo do tronco, alturas ao longo do tronco e volumes do tronco de <i>Araucaria angustifolia</i> na região oeste do Estado de Santa Catariana.....	106
Tabela 15 – Representação das melhores equações com seus respectivos coeficientes para estimativa do diâmetro (d_i), altura (h_i) e volume (v), de <i>Araucaria angustifolia</i> , na região oeste do Estado de Santa Catarina.	109

Tabela 16 – Teste de qui-quadrado para validação das equações de afilamento quanto as suas estimativas de diâmetros (di) ao longo do tronco, alturas (hi) ao longo do tronco e dos volumes (v) do tronco, para <i>Araucaria angustifolia</i> , no oeste do estado de Santa Catarina.....	112
Tabela 17 – Distribuição dos volumes reais para cada sortimento dentro de cada classe de diâmetro e para três diferentes classes de altura para <i>Araucaria angustifolia</i> , na região oeste do estado de Santa Catarina.....	119

LISTA DE ABREVIATURAS, SIGLAS E SÍMBOLOS

- DAP – Diâmetro á altura do Peito
h – Altura Total
 h_i – Altura em Diferentes Posições ao Longo do Tronco
 d_i – Diâmetros em Diferentes alturas do Tronco
v – Volume Total do Tronco
SC – Santa Catarina
UTM – Universal Transversa de Mercator
D – Estatística do Desvio
SQER – Estatística da Soma de Quadrado do Erro Relativo
RP – Estatística do Resíduo em Porcentagem
 S_{yx} – Erro Padrão Relativo
 $R^2_{aj.}$ – Coeficiente de Determinação Ajustado
AIC – Critério de Avaliação Akaike
CFB – Clima Temperado Húmido com Verão Temperado
°C – Graus Centígrados
cm – Centímetro
m – Metro
% – Porcentagem
EXN – Exponencial
P – Polinômio
FV – Forma Variável
T – Trigonométrico
SEG – Segmentado
NSE – Não-Segmentado
 β – Coeficiente de Modelo
SAS – *Statistical Analysis System*
 Σ – Somatório
 χ^2 – Estatística de Qui-Quadrado

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	33
1.1 OBJETIVO GERAL.....	35
1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS.....	36
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	37
2.1 FORMA E AFLAMENTO DO TRONCO.....	37
2.1.1 Forma do tronco.....	37
2.1.2 Afilamento do tronco	39
2.1.3 Métodos de expressão da forma dos troncos.....	43
2.2 FUNÇÕES DE AFLAMENTO.....	45
2.2.1 Modelos não segmentados	49
2.2.2 Modelos segmentados	52
3 MATERIAL E MÉTODOS	54
3.1 LOCALIZAÇÃO E CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO....	54
3.2 INFORMAÇÕES COLETADAS.....	55
3.3 MODELOS DE AFLAMENTO TESTADOS.....	58
3.3.1 Estimativa das alturas relativas	64
3.3.2 Estimativa dos volumes	64
3.4 VALIDAÇÃO DOS MODELOS.....	64
3.5 TESTE DE VALIDAÇÃO (QUI-QUADRADO).....	66
3.6 SORTIMENTO PARA ARAUCARIA ANGUSTIFOLIA.....	66
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES.....	68
4.1 AJUSTE DOS MODELOS DE AFLAMENTO PARA <i>Araucaria angustifolia</i>	68
4.2 VALIDAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE AFLAMENTO PARA A ESTIMATIVA DE DIÂMETROS AO LONGO DO TRONCO.....	78
4.3 VALIDAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE AFLAMENTO PARA A ESTIMATIVA DE ALTURAS EM DIFERENTES DIÂMETROS AO LONGO DO TRONCO.....	88
4.4 VALIDAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE AFLAMENTO PARA A ESTIMATIVA DO VOLUME.....	94
4.5 SELEÇÃO DA MELHOR EQUAÇÃO QUANTO ÀS ESTIMATIVAS DE DIÂMETRO (D_l), ALTURA TOTAL (H) E RELATIVA (H_l) E VOLUME TOTAL DO TRONCO (V)	102
4.6 TESTE DE VALIDAÇÃO QUANTO AS ESTIMATIVAS DE DIÂMETRO (D_l), ALTURA (H_l) E VOLUME (V)	111
4.7 VOLUME DOS SORTIMENTOS PARA <i>Araucaria angustifolia</i> POR CLASSE DE DIÂMETRO.....	114
5 CONCLUSÕES.....	123
6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS.....	125
7 APÊNDICES	146

1 INTRODUÇÃO

A quantificação volumétrica em florestas assume papel fundamental no controle dos estoques, acompanhamento do crescimento, planejamento da produção, elaboração de planos de manejo, comercialização da matéria prima bruta, escoamento da produção, bem como, na adequação de equipamentos para o processamento da madeira (FIGUEIREDO FILHO, 1996).

Na estimativa do volume de madeira em determinada área, é necessário que sejam realizadas cubagens, as quais determinam os volumes estimados de cada tronco, bem como o volume por sortimento desejado. Os volumes individuais de troncos normalmente são determinados através da metodologia destrutiva, a qual é realizada por meio de medições das seções pré-determinadas da árvore derrubada, tendo-se com a soma das seções a estimativa do volume total, do sortimento e/ou comercial da árvore (MÔRA, 2015).

Para condicionar a utilização dos multiprodutos, deve-se ficar atento à forma do tronco para o conhecimento dos volumes e das dimensões dos sortimentos, possibilitando assim o planejamento e verificando a viabilidade econômica do povoamento, seja natural ou plantado (SOUZA, 2007). Dessa forma, segundo Angelo et al. (1995), a maximização da renda proveniente do uso de florestas comerciais tem sido a preocupação de muitos investigadores florestais, de modo que a diversificação de produtos é um parâmetro essencial no desenvolvimento florestal, propiciando diferentes usos para o tronco da árvore. Para a determinação de diversos usos da madeira, é de fundamental importância o conhecimento sobre a forma e o perfil dos indivíduos, no qual

determinará a metodologia de cubagem mais adequada para cada caso (MÜLLER, 2004). Dentre as inúmeras técnicas, utilizadas no Brasil e no mundo, para obtenção de estimativas volumétricas, tem-se as funções de afilamento (*taper*) do tronco. Tais funções são ferramentas utilizadas por gestores florestais para fornecer informações exatas e oportunas sobre as intervenções no processo de crescimento da floresta (MUHAIRWE, 1999).

Portanto, o afilamento do tronco é o decréscimo do diâmetro do fuste da base para o topo, podendo ser expresso por uma função matemática que descreve esta tendência de variação (BORGES, 1981). Funções de afilamento são equações que descrevem a forma e o afilamento das árvores, e representam a variação diamétrica ao longo do fuste em função do diâmetro à altura do peito (DAP) e das alturas relativas. Segundo Müller (2004), essas variações podem ser ocasionadas pela espécie, idade, espaçamento, e qualidade do sítio.

No setor florestal se tem feito o uso de funções de afilamento a qual tem proporcionado uma melhora nos resultados de inventários florestais ajudando na otimização dos recursos florestais. Tais funções, devido à sua flexibilidade, permitem que seja realizada uma estratificação no tronco dos indivíduos, ou seja, uma quantificação dos múltiplos produtos existentes na floresta dentro de sortimentos já estabelecidos (QUEIROZ et al., 2008).

No intuito de garantir maior eficiência à exatidão das estimativas das variáveis de povoamentos pelas funções de afilamento, inúmeras combinações de modelos e técnicas de regressão estão sendo utilizadas para tentar explicar a forma dos troncos.

As primeiras aplicações de modelagem das variáveis dendrométricas, na tentativa de representar o perfil dos troncos teve seu início com a aplicação de modelos de regressão linear simples, seguidos dos modelos não lineares. Os primeiros modelos de afilamento utilizados foram os modelos não segmentados, os quais utilizam uma única equação para tentar descrever o perfil do fuste. Com o avanço tecnológico dos computadores e softwares estatísticos, surgiram os modelos segmentados os quais diferem dos modelos não segmentados por dividirem os troncos em duas ou mais formas geométricas, ou seja, em duas ou mais partes onde o perfil do fuste muda de forma, isto com o auxílio dos pontos de inflexão.

Para melhorar o desempenho das funções de afilamento quanto ao ajuste e a utilização de pontos de inflexão, Kozak (1988); Lee et al. (2003), introduziram os modelos de afilamento de forma variável, Bi (2000) utilizou modelos com princípios trigonométricos, eles utilizam modelos de regressão não segmentados que de forma implícita dividem a árvore em segmentos, sem necessidade do auxílio de pontos de inflexão (MÔRA, 2015).

1.1 OBJETIVO GERAL

Diante do exposto, este trabalho teve como objetivo geral avaliar a acurácia de modelos de afilamento do tronco para *Araucaria angustifolia* com diferentes formas de arranjo, sendo eles, os modelos exponenciais, polinomiais, segmentados, de forma variável e os trigonométricos.

1.2 OBJETIVOS ESPECÍFICOS

- Testar equações de afilamento quanto aos grupos exponenciais, polinomiais, segmentadas, forma variável e trigonométrica;
- Avaliar a acurácia das equações ao gerar estimativas dos diâmetros ao longo do tronco, alturas em diferentes diâmetros e volume dos troncos;
- Realizar um teste de validação, para avaliar se as equações de afilamento podem ser utilizadas para estimar as variáveis de interesse;
- Construir uma tabela de sortimento empregando o melhor modelo de afilamento dentre os ajustados.

2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

2.1 FORMA E AFILAMENTO DO TRONCO

Embora os dois termos sejam usados alternadamente, a forma refere-se à forma geométrica do fuste (neilóide, parabolóide e cone), enquanto o afilamento refere-se à taxa de diminuição do diâmetro com o aumento da altura no tronco (NEWNHAM, 1992; 1988). Duas seções de árvores de mesma forma podem ter afilamento diferente, assim como duas seções com diferentes formas podem ter o mesmo afilamento médio (MUHAIRWE, 1993).

2.1.1 Forma do tronco

Os estudos sobre o comportamento das formas dos fustes das árvores se tornam, a cada dia, mais úteis e de extrema importância, pois as diferentes formas, além de afetarem o volume total, influenciam na qualidade e quantidade dos multiprodutos extraídos das árvores (FERREIRA, 1999; FONWEBAN et al., 2011).

Os troncos dos indivíduos apresentam diversas formas, as quais podem modificar-se conforme a espécie e até mesmo dentro da mesma espécie. Sua forma pode variar de indivíduo para indivíduo, de acordo com condições de sítio, o espaçamento inicial, tratamentos silviculturais aplicados e a posição sociológica em que cada árvore se desenvolve. A idade também é um fator assíduo que interfere em sua forma, quer como um fenômeno evolutivo natural, ou como resultado das várias fases de concorrência relativas às árvores vizinhas (LARSON, 1963; FINGER et al., 1995).

Segundo Assmann (1970), os fustes, tanto das coníferas como das folhosas, até a base da copa podem assumir as seguintes características: Primeira - a base do fuste é convexa ao eixo longitudinal, com um ponto de inflexão variável em função da espécie, a qual se assemelha a um sólido geométrico do tipo neilóide. Segunda - a partir desse ponto de inflexão até a base da copa, compreendendo a seção do fuste, o perfil externo apresenta-se côncavo ao referido eixo. Em coníferas, essa porção do fuste poderia ser descrita por um parabolóide e a parte terminal até a base da copa por um cone. Terceira - a parte terminal das coníferas, que vai da base da copa até o ápice, apresenta perfil levemente côncavo ao eixo da árvore, podendo ser representada por um parabolóide quadrático ou cone.

Do mesmo modo, Machado e Figueiredo Filho (2003) afirmaram que as árvores podem assumir as mais diferentes formas, desde aquelas perfeitamente assimiláveis a uma figura geométrica, caso das coníferas, até aquelas com formas totalmente irregulares, não comparáveis a quaisquer tipos geométricos, como é o caso de árvores tortuosas típicas do cerrado. Evidentemente, à medida que a forma do fuste se afasta de uma característica regular, mais difícil resulta a aplicação dos conhecimentos matemáticos para determinar com rigor os volumes.

Segundo Husch et al. (1993), normalmente os fustes de árvores se assemelham a sólidos geométricos do tipo neilóide, parabolóide ou cones. Entretanto, se considerar o tronco da árvore como um todo, raramente eles irão apresentar como um todo alguma dessas formas geométricas. Dessa maneira, esses autores consideraram que o fuste no sentido base topo é constituído por uma sequência de diferentes sólidos geométricos: cilíndrico, neilóide, parabolóide e cone.

Os modelos dendrométricos visam analisar a cubagem das árvores através de recursos matemáticos, comparando os sólidos geométricos de revolução às formas naturais das árvores, com o objetivo de determinar seu volume. Esses sólidos são chamados de “protótipos dendrométricos” ou “sólidos padrões”, os quais são comparáveis à forma do tronco ou a partes deste. O estudo matemático dos volumes das árvores considera suas secções circulares, embora se saiba que elas não são perfeitamente circulares (FINGER, 1992).

Os pontos de transição ou limites desses sólidos são de difícil determinação nos troncos, sendo, pois de pouca importância prática. Entretanto desempenham um grande valor teórico na definição de expressões matemáticas que descrevem a forma do fuste (FIGUEIREDO FILHO et al., 1996).

2.1.2 AFILAMENTO DO TRONCO

Nos estudos florestais, o afilamento do tronco tem como uma de suas funções fornecer informações para estimar o volume da árvore (CLUTTER et al. 1983; AVERY e BURKHART, 2002; KOZAK, 2004). No meio florestal, o estudo do afilamento pode ser realizado por meio de quatro abordagens. Dessas quatro, três são baseadas em relações simples: fatores de forma, derivados a partir da relação entre os volumes; quocientes de forma, obtidos a partir da razão entre diâmetros; e os pontos de forma, correspondente à razão entre as alturas. A outra linha é baseada em funções mais complexas, como as funções de afilamento (CANCINO, 2006).

2.1.2.1 Bases teóricas para a forma e afilamento do tronco

Segundo Finger et al. (1995), inúmeros estudos descrevem os fatores que podem afetar o afilamento do tronco de árvores, dentre os quais citam-se:

- a) **Local de crescimento e espaçamento** - Árvores crescendo livres de competição e árvores que crescem sob competição diferem marcadamente em suas formas de tronco. Árvores que crescem isoladas possuem copas vigorosas, e assim o tronco assume proporções fortemente cônicas. Árvores crescendo em povoamentos possuem o tronco menos afilado, fato também associado ao decréscimo do comprimento da copa (LARSON, 1963; TRINCADO e BURKHART 2006).

A forma do tronco em plantios depende estritamente da densidade do povoamento. Conforme Baldwin et al. (2000), é esperado que árvores plantadas em maiores espaçamentos iniciais apresentem troncos mais cônicos, em comparação com árvores sob espaçamentos mais reduzidos.

- b) **Desenvolvimento da copa** - O desenvolvimento da copa dentro de um povoamento também é dependente do espaçamento entre as árvores. Espaçamentos mais amplos geram copas maiores e mais vigorosas. Uma copa longa e vigorosa exerce uma profunda influência sobre os padrões de crescimento da árvore e, consequentemente, na forma do tronco. Normalmente, árvores jovens têm copas compridas e um tronco altamente afilado. Quando o povoamento cresce e inicia a competição, os galhos inferiores começam a morrer e progressivamente a parte do tronco livre de galhos aumenta. A

mudança no comprimento da copa e outros fatores associados resultam no decréscimo do afilamento do tronco principal (LARSON, 1963).

- c) **Posição sociológica** - Árvores dominantes possuem copas mais vigorosas e tendem a apresentar maior afilamento que árvores dominadas. Gray (1943), explicou essa diferença sugerindo que a dominância é caracterizada pelo crescimento em diâmetro relativamente maior que o crescimento em altura. Árvores suprimidas possuem forma geralmente muito cilíndrica devido a uma forte redução do incremento na parte inferior do tronco e consequentemente uma concentração do crescimento na parte superior do tronco (LARSON 1963). Em árvores com mesmo diâmetro (DAP) e alturas (h), aquelas com copas mais longas apresentam troncos mais afilados, mostrando que a copa é o fator de relevância no estudo de forma das árvores (LARSON, 1963).
- d) **Idade** - Segundo Machado (1982) a idade afeta a forma do fuste e quanto mais velha a árvore, menor é a sua conicidade ou afilamento da base para o ápice. Burger et al. (1980) estudaram o desenvolvimento da forma de *Araucaria angustifolia* e com base no fator de forma de Hohenadl encontrado por idade, os autores chegaram à conclusão de que a forma geométrica das árvores está em constante melhoria. Há uma tendência natural do tronco das árvores se tornarem mais cilíndricos com o aumento da idade. Nas idades jovens a mudança da forma é bastante rápida, enquanto que nas idades avançadas a forma muda levemente. A taxa de mudança de

forma da árvore devido à idade pode variar entre as diferentes classes de copas ou posições sociológicas dentro do mesmo povoamento (FRIEDL, 1989).

Larson (1963), afirmou que as árvores ficam mais cilíndricas com a idade devido a um aumento relativamente maior no crescimento em altura do que no crescimento em diâmetro. Em outras palavras, o decréscimo no afilamento do tronco com a idade é primeiramente um efeito aditivo do crescimento contínuo em altura. Árvores com crescimento livre, por outro lado, tendem a superar a influência da idade e manter seu elevado afilamento do tronco até mais tarde, deixando suas copas vigorosas.

A taxa de mudança na forma do tronco com a idade pode também ser mostrada pela variação entre as diferentes classes de copa dentro de um povoamento.

- e) **Poda ou desrama** - Segundo Koslowski (1971), a poda inibe o crescimento na base do tronco e faz com que ocorra acréscimo do xilema na porção acima de onde ocorreu a poda, ou seja, na porção não desgalhada. A poda tende a reduzir a conicidade do tronco, mas seu efeito depende da severidade e da época em que é aplicada e das características das copas das árvores.
- f) **Desbaste** - Quando se realiza o desbaste, a competição entre as árvores dentro do povoamento diminui, o crescimento em diâmetro é favorecido e, dessa forma, contribuindo para o aumento do afilamento. Desbastes leves, na maior parte das vezes, produzem árvores com menos galhos e troncos mais

cilíndricos do que desbastes pesados, que tendem a aumentar a conicidade, segundo Flury (1903) citado por Larson (1963).

- g) **Sítio** - Figueiredo Filho (1991) mencionou que a qualidade do sítio afeta a forma do tronco. Em sítios de baixa capacidade produtiva, as árvores normalmente têm maior conicidade ou formas indesejáveis. Nesses sítios, o crescimento em altura para árvores de mesmo diâmetro é menor e como consequência o fuste é mais afilado. Sítios mais produtivos permitem que as árvores tenham maior crescimento e melhor desenvolvimento da copa, contribuindo para a diminuição no afilamento dos troncos.

2.1.3 Métodos de expressão da forma dos troncos

Segundo Scolforo et al. (1998); Yang et al. (d) (2009), dentre as alternativas para quantificar e expressar a forma do tronco de árvores, podem ser considerados: o fator de forma, o quociente de forma, os modelos de afilamento ou *taper*, as funções *spline*, etc.

2.1.3.1 Fator de forma

A utilização do fator de forma é um dos métodos amplamente empregados para estimação do volume de árvores individuais, sendo o método mais simples e de fácil aplicação (CONCEIÇÃO, 2004).

O Fator de forma é uma razão entre o volume da árvore e o volume de um sólido geométrico, normalmente o de um cilindro com o mesmo diâmetro e altura da árvore. Esse fator multiplicado pelo volume do cilindro representa o volume total da árvore, ou seja, o fator de forma

é um fator de redução para obtenção do volume das árvores (PRODAN et al., 1997).

O fator de forma é influenciado pela espécie, sítio, espaçamento, desbaste, idade etc. Além disso, ele varia de acordo com o ponto onde é calculada a área seccional (g). Para estar de acordo com os sólidos geométricos, o diâmetro deveria ser tomado na base da árvore. No entanto, pela praticidade e pela irregularidade da seção causada pelo sistema radicular, é sempre qualificada ao nível do DAP (FERREIRA, 1999).

O fator de forma, conforme Prodan et al. (1997), pode ser real ou verdadeiro, e falso ou artificial, dependendo da altura em que for medido o diâmetro do cilindro de referência. Dessa maneira, se o diâmetro do cilindro de referência for medido em altura relativa, o fator de forma será denominado real ou verdadeiro. E, caso seja medido a uma altura absoluta, o fator de forma denominar-se-á falso ou artificial.

Após o diâmetro e a altura, o fator de forma constitui a terceira variável, em ordem de importância, na estimação de volumes. O crescimento em altura é o elemento que mais influencia o fator de forma. Desse modo, sabe-se que duas árvores geometricamente idênticas, porém com alturas diferentes, têm diferentes fatores de forma artificial. Isso ocorre porque, sendo o fator de forma o resultado de uma divisão do volume cúbico pelo volume do cilindro, a variável altura, embora aplicada no cálculo dos dois volumes, não acarreta uma variação proporcional no volume da árvore quando se toma para comparação o cilindro ideal (FINGER, 1992).

2.1.3.2 Quociente de forma

O quociente de forma é definido como a razão entre dois diâmetros, enquanto fator de forma é a razão entre dois volumes. A aplicação do quociente de forma é a mesma dada ao fator de forma, ou seja, serve de fator de redução para o volume do cilindro. Entretanto, a estimativa do volume assim calculado não tem a mesma precisão que a obtida com fator de forma. Outra aplicação está no estudo da forma de árvores e em modelos estatísticos como variável independente (FINGER, 1992).

Vários são os estudos relacionados ao quociente de forma, todos buscando a melhor maneira de expressar a forma dos troncos a partir da razão entre dois diâmetros. Com isso, além do quociente de forma mais tradicional proposto por Schuberg, podem ser citados o quociente de forma de Johnson (k_J), quociente de forma de Girard (k_G), quociente de forma de Hohenadl (k_H).

2.2 Funções de afilamento

As funções de afilamento têm sido um dos temas mais importantes de estudo em mensuração e manejo florestal por quase um século (FANG et al., 1999). Muitas formas e tipos de modelos de perfil do tronco têm sido relatados e avaliados em relação à exatidão (STERBA, 1980; CLUTTER et al. 1983; Avery e BURKHART, 2002; KOZAK 2004 ROJO et al., 2005).

Neste âmbito existem duas razões principais para a importância dessa área de estudo. Em primeiro lugar, nenhuma teoria foi desenvolvida, que explica de forma adequada toda a variedade das formas que as árvores podem assumir. Em segundo, e mais importante do ponto de vista prático, uma função de afilamento é necessária para estimar o

volume de árvores em pé para usos múltiplos, principalmente quando é necessário o planejamento dos melhores talhões para produção ou outros fins como informações sobre tamanhos de seções, os melhores diâmetros e comprimentos (NEWNHAM, 1988; SHARMA e ZHANG, 2004; TRINCADO e BURKHART, 2006).

Segundo Kozak et al. (1969); Prodan et al. (1997) Huang et al. 2000; Kozak (2004) e Zhang e Zhang (2004); Adams (2005), os modelos de afilamento são relações funcionais que permitem descrever o perfil longitudinal de um tronco. São funções consideradas dinâmicas, porque possibilitam a estimativa do volume de árvores e toras por permitirem estimar quatro características básicas das árvores:

- a) Diâmetros em qualquer ponto do tronco;
- b) Altura no tronco em que se encontra um determinado diâmetro;
- c) Volume entre dois pontos quaisquer no tronco;
- d) Estudam a evolução da forma da árvore ao longo de sua vida.

Segundo Fischer et al. (2001); Fonweban et al. (2011), a aplicação dessas funções de afilamento é um poderoso instrumento para avaliar biológica e economicamente o maciço florestal e a resposta às práticas de manejo executadas, já que permite valorar de maneira detalhada quanto renderá o povoamento florestal. Souza (2007) sugeriu o uso de funções de afilamento para estimar diâmetros e alturas comerciais das árvores, uma vez que essa prática, quando realizada em campo pode tornar-se não operacional e essas informações são essenciais nos programas de seccionamento do tronco.

Mensurar variáveis de interesse, como diâmetro ou altura comercial, que sofrem influência das mudanças de forma nos troncos, diretamente no povoamento antes da colheita, torna-se não operacional.

A necessidade de tais informações, essenciais para o seccionamento do tronco, requer sua estimativa por modelos de afilamento (LEITES et al., 1995; Leite e Robinson 2004).

Função de afilamento é uma ferramenta dendrométrica um pouco mais complexa do que equações de volume, mas oferece uma maior quantidade de informações. Com isso é possível encontrar qualquer volume desejado (volume total, comercial ou de partes do tronco) para uma árvore (FERREIRA, 1999). O grau de exatidão ou acuracidade na obtenção das estimativas de afilamento varia, dependendo do modelo utilizado e da forma do tronco. Cada modelo descreve melhor a forma de uma determinada espécie, crescendo em um determinado local e sob condições ambientais específicas (ASSIS, 2000).

Segundo Figueiredo Filho et al. (1996) a primeira tentativa de representar a forma de árvores foi feita por Hojer em 1903. Desde então muitas formas e tipos de modelo de perfil tronco foram testados. No início os modelos eram relativamente simples, mas com o advento dos computadores, modelos mais complexos foram utilizados para gerar funções de afilamento, de modo que estimativas mais realistas poderiam ser feitas.

Segundo Cao et al. (1980); Lima (1981); Castedo-Dorado e González Álvarez (2000); Novo et al. (2003); Brooks et al. (2008); Cao (2009); Cao e Wang (2011); Özçelik et al. (2011), vários são os modelos de afilamento utilizados na atualidade. O melhor ou o pior desempenho desses modelos está na dependência das características da população para a qual se pretende empregá-los e das pressuposições básicas para as quais foi desenvolvido o modelo. Esse fato justifica a sua constante avaliação

para o uso em condições específicas. Dentre os vários tipos de modelos existentes, destacam-se os seguintes:

- (i) Equações compatíveis e não compatíveis com os modelos de volume (CAO et al., 1980),
- (ii) Equações não segmentadas e segmentadas, de acordo com o número de sub-funções (uma ou mais que uma), incluído o modelo de forma variável de Kozak (1988);
- (iii) Polinomial simples, polinomial segmentado, potencial, exponencial, forma variável, trigonométricas, e modelos logarítmicos, de acordo com a função matemática utilizada no modelo (CASTEDO-DORADO e ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, 2000; NOVO et al., 2003); e
- (iv) Polinomial simples, segmentado, e os modelos de forma variável (DIÉGUEZ-ARANDA et al., 2006).
- (v) Técnicas não-paramétricas (“*spline cubica*”) com estruturas de variância-covariância modeladas diretamente (LAPPI, 2006; PINHEIRO e BATES (1995).

Outro sistema para classificação dos modelos de afilamento foi feito por Muhairwe (1993). Nesse sistema os modelos são divididos em dois grandes grupos: os estáticos e os dinâmicos. Um modelo de afilamento estático é um modelo que prediz o diâmetro ao longo do tronco de árvore em um determinado momento. A função de afilamento dinâmica é um modelo que prevê a mudança de diâmetro ao longo do tronco da árvore ao longo do tempo. As funções dinâmicas, por exemplo, seriam funções de afilamento cujos diâmetros estimados ao longo de tronco fossem consistentes com os padrões observados de crescimento em diâmetro. Essas funções podem ser ajustadas em dois estágios. No

primeiro estágio, os parâmetros do modelo são estimados por árvore, os quais são relacionados com características da árvore ou do plantio no segundo estágio.

As características desejáveis de qualquer função de afilamento são: a possibilidade de estimar o diâmetro na ponta de cada tora, a possibilidade de estimar diretamente a altura para qualquer diâmetro do tronco (útil para a determinação da altura comercial de um determinado diâmetro), e que a função de forma possa ser integrada, obtendo-se assim uma função compatível de volume. Se a segunda e terceira condições não forem cumpridas, passa-se a necessitar de procedimentos iterativos demorados. As equações de afilamento que não possuem integral definida como Kozak (1988); (2004) e Newnham (1992) podem ser utilizadas, se melhoradas as estimativas de volume.

A abordagem usual é a de desenvolver uma função de afilamento primeiro e, em seguida, a função de volume. No entanto, alguns pesquisadores da área de modelagem (por exemplo, Demaerschalk 1973; Amateis e Burkhart 1987) avançaram na direção oposta derivando funções de afilamento das funções de volume existentes.

2.2.1 Modelos não segmentados

Segundo Demaerschalk e Kozak (1977), dentre as diversas técnicas estatísticas de modelagem, destacam-se os modelos não segmentados, que conseguem aliar eficiência à certa simplicidade de aplicação, quando comparados aos modelos segmentados. Desses, os primeiros modelos desenvolvidos e utilizados foram os polinômios de pequena ordem, em termos de altura relativa no tronco (ROJO et al., 2005).

Em 1923, Behre usou dados de “*Pine Ponderosa*” para verificar se a equação de Höjer (1903) poderia ser melhorada pela introdução de um novo termo, ou se uma equação diferente poderia ser encontrada para descrever a forma média do tronco das árvores. Como consequência desses estudos, uma nova equação foi desenvolvida, que descrevia a forma de maneira mais consistente.

Kozak et al. (1969) desenvolveram uma função de afilamento com base no pressuposto de que o tronco da árvore é um parabolóide quadrático, cuja equação baseia-se em um polinômio quadrático de segunda ordem.

Testando o desempenho de modelos polinomiais, de razões de volume e de funções *spline* cúbicas (LAPPI, 2006; PINHEIRO e BATES 1995), na estimativa de volumes comerciais, Rios (1997) verificou que os modelos polinomiais proporcionaram estimativas mais acuradas na descrição dos perfis das árvores, em que o Polinômio de Quinto Grau foi superior ao Polinômio de Potências Fracionárias. Em segundo lugar, ficaram as razões de volume e, em terceiro, as funções *spline*. O autor ainda sugere que as equações de afilamento sejam ajustadas por classe diamétrica para se obterem estimativas mais acuradas.

Lima (1986) avaliou a eficiência dos modelos propostos por Biging (1984), Demaerschalk (1973), Kozak et al. (1969) e Ormerod (1973) em árvores de *Pinus elliottii*, quanto à estimativa de volumes totais e comerciais e de diâmetros e alturas comerciais. O autor concluiu que o modelo mais preciso na estimativa do volume comercial foi o de Kozak et al. (1969), e o menos preciso o de Ormerod (1973). O modelo de Demaerschalk (1973) mostrou-se satisfatório para estimar todas as

variáveis, exceto o volume total, que teve o modelo de Biging (1984) como mais adequado.

Como algumas funções de afilamento eram inadequadas para descrever a área perto da base do tronco, polinômios de grau mais elevado foram utilizados para caracterizar corretamente a base (ROJO et al., 2005). Alguns modelos como de polinômio de 5º, Bruce et al. (1968) e Goulding e Murray (1976) utilizam polinômios de graus elevado para caracterizar o perfil do tronco.

Embora o polinômio do quinto grau forneça resultados suficientemente acurados para a maioria dos usos de equações de forma, ele exibe claras tendenciosidades. Parte das deformações da base são explicadas, mas os diâmetros são geralmente subestimados até cerca de 20% da altura total e superestimados acima de 80% da altura total (GORDON, 1983).

Hradetzky (1976) foi o primeiro a identificar que uma boa representação do tronco através de polinômios exige uma combinação apropriada de potências, sendo necessário, para sua determinação, que elas sejam submetidas ao processo de seleção “passo a passo” (*stepwise*), sendo que essas potências variam de 0,005 a 25.

Demaerschalk em (1972; 1973), desenvolveu funções de afilamento a partir de sistemas integrados para estimativas volumétricas das quais as funções de afilamento são derivadas de equações de volume total baseadas no modelo de Schumacher e Hall (1933), modelo de Spurr (1952), no modelo de Honer (1965) e outras variações.

Segundo Môra (2015), um grande número de modelos de afilamento foi desenvolvido com um objetivo de ter melhores resultados quanto a exatidão e a acuracidade para estimativas de variáveis

dendrométricas. Além dos trabalhos já citados pode-se citar outros como Ormerod (1973), Forslund (1982, 1991), Amidon (1984), Biging (1984), Baldwin e Feduccia (1991), Sharma e Oderwald (2001).

Souza (2008), analisando o desempenho de seis modelos não segmentados (lineares e não lineares) com dados de *Eucalyptus* sp. conduzidos para produção de madeira para serraria, concluiu que o modelo de Biging proporcionou maior acurácia nas estimativas da altura e volume comerciais, seguido pelo modelo de Garay (1979). No mesmo trabalho, o autor comparou o desempenho de modelos não segmentados com os segmentados e ressaltou que, além de mais simples, os melhores resultados foram obtidos com os modelos não segmentados.

2.2.2 Modelos segmentados

Segundo Demaerschalk e Kozak (1977), é necessário o uso de diferentes modelos para estudo do afilamento, um para a parte inferior e o outro para a superior das árvores, a fim de obter maior precisão nas estimativas. No entanto, estes autores afirmaram que o número de equações a serem usadas depende muito da forma do perfil das árvores.

Segundo Bi (2000), os pontos fracos compartilhados por muitas funções de afilamento são (1) a existência de um elevado grau de viés na predição do diâmetro sobre algumas porções do tronco, em particular a parte inferior (base) e a superior (ápice), apesar de o desvio total ser baixo, e (2) a incapacidade de levar em conta as diferenças na forma do tronco entre árvores.

O estudo de modelos de afilamento segmentados é bastante recente, Cao et al. (1980); Trincado e Burkhart (2006), comentam que o primeiro modelo segmentado desenvolvido foi o de Max e Burkhart 1976.

No Brasil, pode-se citar os trabalhos de Figueiredo-Filho et al., (1996), Rios, (1997), Ferreira, (1999), Figueiredo-Filho et al., (1999), Assis, (2000), Fischer et al. (2001) e Souza (2008).

Modelos de afilamento segmentados utilizam equações separadas para descrever os vários segmentos do tronco (MAX e BURKHAT, 1976; CAO et al., 1980; BYRNE e REED, 1986; LEITES e ROBINSON, 2004; TRINCADO e BURKHART, 2006; CAO 2009; BROOKS et al. 2008; ÖZÇELIK et al 2011; CAO e WANG 2011). Na maioria dos casos, os parâmetros dos modelos segmentados são difíceis de serem estimados e esses modelos nem sempre permitem prever a altura para um determinado diâmetro (KOZAK, 1988; PEREZ et al., 1990).

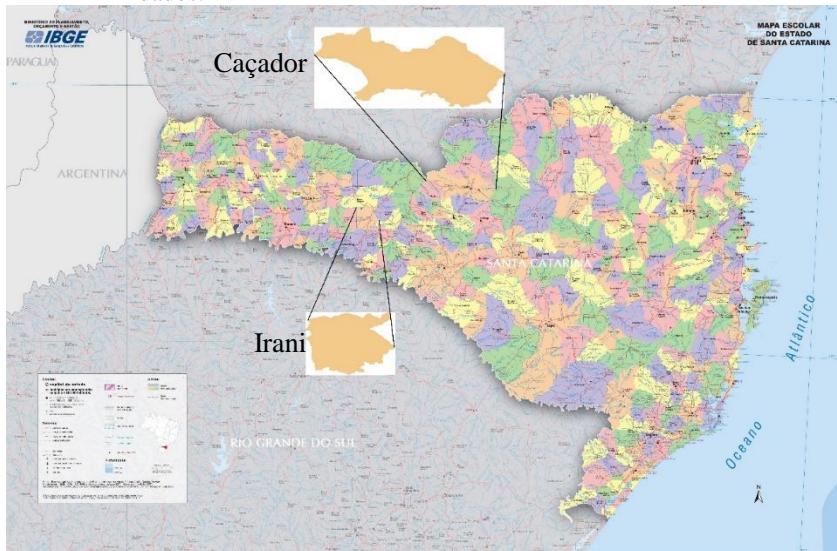
Métodos iterativos devem ser usados para encontrar a altura comercial para um determinado diâmetro. Além disso, a maioria dos modelos de afilamento publicados na literatura requerem vários parâmetros a serem estimados (mais do que quatro) e envolvem diferentes limitações, tais como um diâmetro nulo na parte superior do tronco. Além disso, esses modelos têm sido utilizados sem testar a hipótese sobre a forma como os parâmetros e/ou as formas de equações adequam-se a forma do tronco (BENBRAHIM; GAVALAND, 2003).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Localização e caracterização da área de estudo

O presente trabalho foi desenvolvido em dois florestamentos de *Araucaria angustifolia*, provenientes de incentivos fiscais. Os povoamentos foram implantados nas décadas de 1970 e 1980, e poucos são os dados informativos sobre sua implantação, como por exemplo, dados de espaçamento, tratamentos silviculturais, bem como a origem das sementes ou mudas utilizadas para a implantação. Estes povoamentos estão localizados na região oeste do estado de Santa Catarina, conforme demonstra a Figura 1. A “Área-1” está localizada no município de Caçador a qual pertence à Floresta Nacional de Caçador com coordenadas UTM 22J 478873m E e 7039421m S e “Área-2” no município de Irani com coordenadas UTM 22J 425256,34m E; 7021658,68m S, ambos localizados na região oeste do Estado de Santa Catarina. O clima da região é classificado como “Cfb” no sistema de Köppen, com temperatura média anual de 16,5° C e precipitação média anual de 1.600 milímetros (PANDOLFO et al., 2002).

Figura 1 – Croqui de representação da região oeste do estado de Santa Catarina, com os pontos onde se localizam as áreas que foram coletados os dados.



Fonte: IBGE (2010), modificado por CIARNOSCHI, 2015.

3.2 Informações coletadas

Para o ajuste das equações previstas neste trabalho, foi efetuada a cubagem rigorosa de 111 árvores, sendo 60 indivíduos oriundos da Área-1 e 51 indivíduos oriundos da Área-2, as árvores foram distribuídas em oito classes de diâmetro (DAP) e oito classes de altura.

A Tabela 1 relaciona as características dendrométricas das árvores-amostras distribuídas por classe de altura e diâmetro. Para determinação das classes utilizou-se do critério, se menor ou igual ao limite superior da classe a árvore entra na classe x, já se maior que o limite superior ela entra na classe x+1.

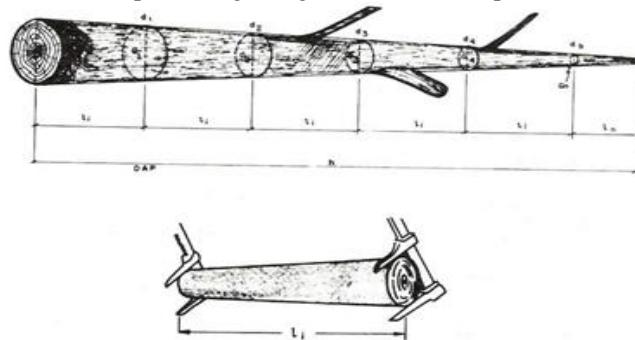
Tabela 1 - Distribuição dos indivíduos em classes de diâmetro a altura do peito (DAP) e em classes de alturas, além da escolha dos indivíduos para realizar a validação das equações (30%).

Altura (m)	Classes de Diâmetro (cm)								Total	
	11	17	23	29	35	41	48	54		
9	3 (1)								3	
11	8 (3)		2 (1)						10	
13	4 (1)	8 (2)	1						13	
15		11 (3)	10 (3)	3 (1)					24	
17		2 (1)	12 (3)	8 (3)	4 (1)	2 (1)			28	
19			4 (2)	7 (2)	6 (2)	5 (1)			22	
21				1			1	3 (1)	2	7
23							2 (1)	2 (1)	4	
Total	15	21	29	19	10	8	5	4	111	
30(%)	5	6	9	6	3	2	2	1	33	

Fonte: produção do próprio autor.

A cubagem das 111 árvores foi efetuada pelo método de Smalian (FIGURA 4), sendo que para todas as árvores foi utilizado o método destrutivo, isto é, com corte dos indivíduos. Os diâmetros reais foram determinados pelo método de Smalian, em todas as 111 árvores, obtendo as medidas dos diâmetros a 0.1, 0.3, 1.3, 2, 2.3, 3, 3.3 ..., h_n . Para a medição dos diâmetros em campo foi utilizada a suta, a trena para medição da altura. Os dados foram divididos em dois grupos sendo 70% utilizado para o ajuste das equações e 30% dos dados utilizados para a validação de cada função ajustada.

Figura 2 - Procedimento para cubagem rigorosa dos troncos por Smalian.



Fonte: Finger (1992).

Para realização das cubagens, inicialmente foram selecionados os indivíduos das classes de diâmetro estabelecidos para a floresta, onde foram medidos os diâmetros à altura do peito (DAP) e marcados os locais desta medida para utilizar como base para as demais medidas do diâmetro, abaixo de 1,3m e acima de 1,3m.

Na Tabela 2 são apresentados de forma resumida os dados dendrométricos dos indivíduos estudados.

Tabela 2 – Características dendrométricas das árvores de *Araucaria angustifolia*.

Dados	Variável	Frequência	Média	Mínimo	Máximo	Desvio Padrão
	DAP (cm)		26,7	9,7	55,3	11,6
Ajuste	h (m)	78	16,2	7,8	23,6	3,1
	v (m^3)		0,6693	0,0419	2,8227	0,6294
	DAP (cm)		26,6	8,2	52,4	10,7
Validação	h (m)	33	15,5	7,7	22,8	3,0
	v (m^3)		0,6322	0,0259	2,3494	0,6055

Fonte: produção do próprio autor.

3.3 Modelos de afilamento testados

Foram testados 19 modelos de afilamento, sendo separados em modelos de afilamento não segmentados (NSE) e segmentados (SEG).

Os modelos não segmentados (Tabela 3), foram expressos dentro das classes: exponenciais (EXN), representados pelos modelos 1, 2, 3 e 4, polinomiais (P), pelos modelos 5, 6, 7 e 8, forma variável (FV), pelos modelos 13, 14, 15 e 16 e trigonométricos (T), pelos modelos 17, 18 e 19.

Nos modelos polinomiais o ajuste do modelo proposto por Hradetzky foi realizado pelo processo de regressão “passo - a - passo” (“*stepwise*”), realizado no Sistema de Análise Estatística SAS V. 9.3 (SAS Institute Inc., 2004). As potências utilizadas foram: 0,005; 0,01; 0,02; 0,03; 0,04; 0,05; 0,06; 0,07; 0,08; 0,09; 0,1; 0,2; 0,3; 0,4; 0,5; 0,6; 0,7; 0,8; 0,9; 1; 2; 3; 4; 5; 6; 7; 8; 9; 10; 15; e 25, como sugerido por Figueiredo Filho et al. (1996).

Os modelos segmentados ajustados foram oriundos de revisão de literatura e utilizou-se os modelos na sua forma original, os quais estão representados pelos números 9, 10, 11 e 12 na Tabela 3.

Tabela 3 - Modelos estatísticos utilizados para estimativa do afilamento dos troncos de *Araucaria angustifolia*, na região oeste de Santa Catarina.

Autor	Modelo
1 - Hojer (1903)	$\frac{d_i}{DAP} = \left[\beta_0 * \ln \left[\frac{\beta_1 + \left(\frac{h-h_i}{h-1,3} \right)}{\beta_2} \right] \right] + e_i$
2 - Ormerod (1973)	$\left(\frac{d_i}{DAP} \right)^2 = \left[\left(\frac{h-h_i}{h-1,3} \right)^{\beta_1} \right] + e_i$
3 - Demaerchalk (b) (1973)	$\left(\frac{d_i}{DAP} \right)^2 = \left[\beta_1 * \left(\frac{1}{DAP^2 * h} \right) * (Z)^{\beta_2} + \beta_3 * Z^{\beta_4} \right] + e_i$
4 - Forslund (1990)	$\frac{d_i}{DAP} = \left[(1-X^{\beta_1})^{1/\beta_2} \right] + e_i$
5 - Polinômio 5°	$\frac{d_i}{DAP} = [\beta_0 + \beta_1 * X + \beta_2 * X^2 + \beta_3 * X^3 + \beta_4 * X^4 + \beta_5 * X^5] + e_i$

Continua..

Continuação...

Tabela 3 - Modelos estatísticos utilizados para estimativa do perfil dos troncos de *Araucaria angustifolia*, na região oeste de Santa Catarina.

6 - Polinômio 3º	$\frac{d_i}{DAP} = [\beta_0 + \beta_1 * X + \beta_2 * X^2 + \beta_3 * X^3] + e_i$
7 - Kozak (1969)	$\left(\frac{d_i}{DAP} \right)^2 = [\beta_0 + \beta_1 * X + \beta_2 * X^2] + e_i$
8 - Hradetzky (1976)	$\frac{d_i}{DAP} = [\beta_0 + \beta_1 * X^{p_1} + \beta_2 * X^{p_2} + \beta_3 * X^{p_3} + \dots + \beta_{n-1} * X^{p_{n-1}} + \beta_n * X^{p_n}] + e_i$
9 - Max e Burkhart (1976)	$\left(\frac{d_i}{DAP} \right)^2 = [\beta_1 * (X-1) + \beta_2 * (X^2-1) + \beta_3 * (\beta_5-X)^2 * I_1 + \beta_4 * (\beta_6-X)^2 * I_2] + e_i$ $I_1 = \begin{cases} 1 & \text{se } X \leq \beta_5 \\ 0 & \text{se } X > \beta_5 \end{cases} \quad I_2 = \begin{cases} 1 & \text{se } X \leq \beta_6 \\ 0 & \text{se } X > \beta_6 \end{cases}$
10 - Valentini e Cao (1986)	$\left(\frac{d_i}{DAP} \right)^2 = [\beta_1 * Z + \beta_2 * Z^2 + \beta_3 * (Z-\beta_5) * I_1 + \beta_4 * (Z-\beta_6) * I_2] + e_i$ $I_1 = \begin{cases} 1 & \text{se } Z \geq \beta_5 \\ 0 & \text{se } Z < \beta_5 \end{cases} \quad I_2 = \begin{cases} 1 & \text{se } Z \geq \beta_6 \\ 0 & \text{se } Z < \beta_6 \end{cases}$

Continua..

Continuação...

Tabela 3 - Modelos estatísticos utilizados para estimativa do perfil dos troncos de *Araucaria angustifolia*, na região oeste de Santa Catarina.

Autor	Modelo
11 - Byrne e Reed (1986)	$\left(\frac{di}{DAP}\right)^2 = \left[\left(\frac{\beta_0}{k} \right) * 2 * Z + \beta_1 * (3 * Z^2 - 2 * Z) + \left(\beta_2 * (Z - \beta_3)^2 \right) * I_1 + \left(\beta_4 * (Z - \beta_5)^2 \right) * I_2 \right] + e_i$ $I_1 = \begin{cases} 1 & \text{se } Z \geq \beta_3 \\ 0 & \text{se } Z < \beta_3 \end{cases} \quad I_2 = \begin{cases} 1 & \text{se } Z \geq \beta_5 \\ 0 & \text{se } Z < \beta_5 \end{cases}$
12 - Parresol et al. (1987)	$\left(\frac{di}{DAP}\right)^2 = [Z^2 * (\beta_1 + \beta_2 * Z) + (Z - \beta_5)^2 * [\beta_3 + \beta_4 * (Z + 2 * \beta_5)] * I] + e_i$ $OI = \begin{cases} 1 & \text{se } Z \geq \beta_5 \\ 0 & \text{se } Z < \beta_5 \end{cases}$
13 - Lee et al. (2003)	$d_i = \left[\beta_0 * DAP^{\beta_1} * (1 - (X))^{\beta_2 * X^2 + \beta_3 * X + \beta_4} \right] + e_i$
14 - Kozak (1988)	$d_i = \left[\beta_1 * DAP^{\beta_2} * \beta_3^{DAP} * \left[\frac{1 - \sqrt{X}}{1 + \sqrt{X}} \right]^{\beta_4 * X^2 + \beta_5 * \ln(X + 0.001) + \beta_6 * \sqrt{X} + \beta_7 * e^X + \beta_8 * \left(\frac{DAP}{h} \right)} \right] + e_i$

Continua..

Continuação...

Tabela 3 - Modelos estatísticos utilizados para estimativa do perfil dos troncos de *Araucaria angustifolia*, na região oeste de Santa Catarina.

Autor	Modelo
15 - Amidon (1984)	$\frac{d_i}{DAP} = \left[(\beta_0 + \beta_1 * \ln(1 - \sqrt[3]{X})) * \left(1 - e^{-\left(\frac{\beta_0}{\beta_1}\right)} \right) \right] + e_i$
16 - Leite e Garcia (2001)	$\left(\frac{d_i}{DAP} \right)^2 = \left[10^{(2*\beta_0)} * DAP^{(2*\beta_1-2)} * h^{(2*\beta_2)} * (h-h_i)^{(2*\beta_3)} * e^{\left(\beta_4 * \left(\frac{1}{DAP} \right) \right)} \right] + e_i$
17 - Schalaegel (1981)	$\left(\frac{d_i}{DAP} \right)^2 = \left[\beta_1 * (X-1) + \beta_2 * \sin(2*\pi*X) + \beta_3 * \cot\left(\frac{\pi*X}{2}\right) \right]$
18 - Thomas e Parresol (1991)	$\left(\frac{d_i}{DAP} \right)^2 = \left[\beta_1 * (X-1) + \beta_2 * (X^2-1) * \sin(\beta_4 * \pi*X) + \beta_3 * \cot\left(\frac{\pi*X}{2}\right) \right] + e_i$

Continuação..

Continuação...

Tabela 3 - Modelos estatísticos utilizados para estimativa do perfil dos troncos de *Araucaria angustifolia*, na região oeste de Santa Catarina.

19 - Bi (2000)	$\frac{d_i}{DAP} = \left[\left(\beta_0 + \left(\beta_1 * \sin \frac{\pi}{2^*(\frac{h_i}{h})} \right) \right) \right. \\ \left. \left(\ln \left(\sin \frac{\pi}{2*X} \right) \right) \right. \\ \left. \left(\ln \left(\sin \frac{\pi}{2^*\frac{1.3}{h}} \right) \right) \right] \\ \left. + \left(\beta_2 * \cos \left(3 * \left(\frac{\pi}{2*X} \right) \right) \right) + \left(\beta_3 * \sin \left(\frac{\left(\frac{\pi}{(2*X)} \right)}{X} \right) \right) + e_i \right. \\ \left. (\beta_4 * DAP) + (\beta_5 * X * \sqrt{DAP}) + (\beta_6 * X * \sqrt{h}) \right]$
----------------	---

Em que: $\beta_0..,\beta_8$ = Coeficientes do modelo; d_i = Diâmetro a altura h_i ; h_i = Altura relativa da base ao topo; DAP = Diâmetro à altura do peito (1.3m); h = Altura total do tronco; $k = PI/40000$; \ln = Logaritmo neperiano; e = Função exponencial; I_i = Valor de restrição do modelo segmentado; $p_1..p_n$ = Exponente fracionário; \sin = Seno; \cos = Cosseno; \cot = Cotangente; π = Valor de PI (3,1416...); $X = (h_i/h)$; $Z = ((h-h_i)/h)$.

Fonte: produção do próprio autor

Ao longo do trabalho, após ajustados, os modelos, em sua forma original foram tratados como equações 1, 2,..,19, respectivamente. Os modelos foram ajustados pelo procedimento iterativo de Gauss Newton. Todos os ajustes dos modelos foram realizados no Sistema de Análise Estatística SAS V. 9.3 (SAS Institute Inc., 2004).

3.3.1 Estimativa das alturas relativas

As estimativas das alturas relativas (h_i) foram realizadas por processos iterativos utilizando o suplemento solver do Excel 2016®.

3.3.2 Estimativa dos volumes

Como nem todos os modelos ajustados apresentavam integrais definidas empregou-se para as estimativas dos volumes a técnica de integração numérica, onde o objetivo é manter um padrão de estimativa para todas as equações, mesma metodologia utilizada por Costa et al. (2015) e Môra (2015).

3.4 VALIDAÇÃO DOS MODELOS

Os modelos foram ajustados e tiveram seus desempenhos comparados para as estimativas dos perfis (d_i), estimativas das alturas relativas (h_i) e para o volume de cada indivíduo (v).

Para a validação do ajuste dos modelos utilizou-se os critérios do coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$), o erro padrão da estimativa relativo ($S_{yx}\%$), Critério de Informação Akaike e resíduo em porcentagem ($R_{aj.}\%$).

A acurácia das estimativas dos perfis dos troncos foi examinada em testes dos resíduos (TABELA 4), conforme metodologia usada por Figueiredo-Filho et al. (1996), Scolforo et al. (1998), Souza (2009) e Costa et al. (2015).

Tabela 4 - Estatísticas utilizadas para avaliar a acurácia das estimativas dos diâmetros (d_i), das alturas (h_i) e do volume (v), dos troncos de *Araucaria angustifolia* amostrados.

Estatística	Fórmula
Desvio (D)	$\frac{\sum_{j=1}^n (y_j - \hat{y}_j)}{N}$
Soma do Quadrado do Erro Relativo (SQER)	$\sum_{i=1}^n \left[\frac{(y_j - \hat{y}_j)}{y_j} \right]^2$
Resíduo Porcentagem (RP)	$\frac{\left[\sum_{i=1}^n \left(\frac{(y_j - \hat{y}_j)}{y_j} \right) \right] * 100}{N}$

Em que: y_j = Valor observado; \hat{y}_j = Valor estimado; N = Número de observações.

* Valores pequenos são melhores resultados.

Com essas estatísticas foi elaborado um ranking para expressar o desempenho dos modelos testados na estimativa dos diâmetros (d_i), alturas (h_i) ao longo do tronco e volume (v). Considerando cada uma das estatísticas auxiliares foram atribuídas notas de 1 a 19, respectivamente, sendo o valor “1” para o modelo com melhor desempenho e valor “19” para o de menor desempenho na estimativa, procedimento esse utilizado por Figueiredo Filho et al. (1996), Fischer (1997), Scolforo et al. (1998), Assis et al. (2001), Figueiredo et al. (2006), Queiroz (2006), Souza (2007; 2009), Costa et al. (2015).

3.5 Teste de validação (qui-quadrado)

O grupo de árvores separadas para validação das equações de afilamento foi o mesmo utilizado para realizar o teste de validação. Esse processo consistiu em estimar as variáveis dependentes dessas árvores pela função da equação de afilamento e compará-las com seus respectivos valores estimados pelo teste do qui-quadrado (χ^2).

$$\chi^2_{\text{calculado}} = \sum \frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{\hat{y}_i}$$

Em que: y_i = Valor observado; \hat{y}_i = Valor estimado;

A amostra para a validação deve ser independente dos dados utilizados no ajuste, cobrindo todas as condições de idade, sítios e de manejo (PRODAN, 1997). Segundo Snee citado por Prodan et al. (1997), depois do desenvolvimento de um modelo de regressão deve ser realizado o controle da validação e qualidade de suas previsões, de modo que se tenha a confiança no uso do modelo.

3.6 Sortimento para *Araucaria angustifolia*

Os sortimentos foram definidos com base nos diâmetros mínimos de uso, chamados diâmetros de topo. As classes de sortimentos determinadas para este trabalho (TABELA 5), foram obtidas a partir de informações pessoais coletadas junto à algumas empresas que trabalham com a espécie em duas diferentes regiões do estado de Santa Catarina (Oeste). As dimensões sugeridas estão de acordo ao que tem sido

atualmente utilizado pelas indústrias que operam com matéria prima de plantios florestais de *Pinus* spp., *Eucalyptus* spp. e *Araucaria angustifolia*.

Tabela 5 - Classes de sortimento para *Araucaria angustifolia*, na região oeste do estado de Santa Catarina.

Sortimento	Diâmetro mínimo (cm)	Comprimento das Toras (m)
S1 - Laminação	35,0	3,1
S2 - Serraria 1	25,0	4,2
S3 - Serraria 2	18,0	3,1
S4 - Celulose	8,0	2,4
S5 - Energia	6,0	2,4

Onde: S1, S2,...,S5 = Sortimentos determinados por meio de pesquisa na industria local.

Fonte: produção do próprio autor.

4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

4.1 AJUSTE DOS MODELOS DE AFILAMENTO PARA *Araucaria angustifolia*

Os parâmetros estimados para os dezenove modelos testados são apresentados na Tabela 6. A acurácia do ajuste foi avaliada pelos critérios do Erro Padrão da Estimativa em percentagem ($S_{yx}\%$), Coeficientes de Determinação Ajustado ($R^2_{aj.}$), Critério de Informação de Akaike (AIC) e Análise Gráfica dos Resíduos (%). Para complementar a estatística utilizou-se testes complementares descritos na Tabela 4, permitindo assim uma avaliação mais detalhada de cada modelo e sua acurácia para determinar a forma do tronco.

Na Tabela 7 apresenta-se a ordem dos modelos com melhores resultados para as estatísticas de validação. Os modelos de forma variável tiveram os melhores valores de maneira geral, seguidos pelos modelos exponenciais, modelos polinomiais, modelos trigonométricos e como piores resultados tem-se os modelos segmentados.

A equação 3 referente ao modelo de Demaerchalk (b) (1973) obteve o coeficiente b_1 não significativo, assim como ocorreu com Moura (2015), a equação 13 a qual representa o modelo de Lee et al. (2003) teve o coeficiente b_1 não significativo e na equação 14, representando o modelo de Kozak (1988), os coeficientes b_4 e b_5 não foram significativos, assim como ocorreu para Moura (2015) no ajuste de modelos para *Pinus taeda* L. e *Eucalyptus saligna* Sm. A equação 19 representando o modelo de Bi (2000) teve os coeficientes b_1 e b_7 não significativos.

Os coeficientes não significativos permaneceram nos modelos devido ao fato de se retirar algum coeficiente estará interferindo na

estrutura do modelo e não utilizando na sua forma original, sendo que cada modelo testado quando foi desenvolvido para ajustar-se ao afilamento de diferentes espécies florestais espalhadas pelas mais diferentes regiões do planeta.

Os modelos testados apresentaram Coeficiente de Determinação ajustado ($R^2_{aj.}$) superiores a 0,95 indicando que as equações conseguem explicar apropriadamente as estimativas da variação do diâmetro ao longo do tronco. O Erro Padrão da Estimativa em porcentagem ($S_{yx}\%$) variou entre 6 e 14% e valores de Akaike (AIC) entre 964,5 a 2663,1.

Tabela 6 – Estatísticas de ajustes dos modelos de afilamentos segundo sua forma original.

Equação	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7	β_8	R ² aj.	S _{yx} %	AIC
1	0,4008	1,1182	0,0889							0,9699	10,00	1994,1
2	0,8892									0,9730	9,34	1800,4
3	198,3200	0,1272 ns	1,1377	1,0263						0,9764	8,97	1686,2
4	1,1835	2,2239								0,9659	10,43	2113,3
5	1,0522	-0,2293	-0,6509							0,9558	12,25	2572,0
6	1,1568	-1,8898	3,7114	-2,9164						0,9788	8,58	1562,2
7	1,1743	-2,9423	12,8467	-30,0808	32,5488	-13,5210				0,9805	8,23	1445,0
8	-55,1670	123,5069	-67,5830	-0,2670	-0,8833	1,9388	-1,5322			0,9809	8,15	1418,4
9		0,0350 ns	-0,8148	53,6831	1,6708	0,0785	0,4325			0,9799	8,33	1480,0
10		1,3677	0,2734	-0,8160	6,2766	0,2885	0,9454			0,9804	8,25	1451,3
11	0,00000041	-0,2712	1,6762	0,5686	53,8014	0,9217				0,9802	8,26	1454,0
12		6,3035	-7,5030	0,2093	6,4259	0,5772				0,9504	12,64	2663,1
13	1,3774	0,9435	1,4789	-2,2491	1,3437					0,9826	7,61	1220,0
14		0,9151	1,0349	0,9991	-0,2565 ns	0,0079 ns	-1,0420	0,6018	0,0615	0,9847	7,09	1024,5

Continua..

Continuação

Tabela 6 – Estatísticas de ajustes dos modelos de afilamentos segundo sua forma original.

Equação	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	β_6	β_7	β_8	R ² aj.	S _{yx} %	AIC
15	1,0127	1,3597								0,9521	13,01	2742,2
16	-0,0426 ns	1,0290	-0,4890	0,4885	3,8165					0,9760	8,99	1695,0
17		-1,1448	-0,0711	0,0023						0,9787	8,60	1566,8
18		-1,1760	-0,1158	0,0020	-2,0247					0,9813	8,12	1405,1
19		0,4309	-0,1885	0,0046 ns	-0,1437	-0,0006	0,0228	0,0047 ns		0,9852	6,95	964,5

Em que: $\beta_0..\beta_8$ = Coeficientes do modelo; R²aj. = Coeficiente de determinação ajustado; S_{yx} % = Erro padrão da estimativa relativo; AIC = Critério de informação Akaike; ns = coeficiente não significativo a um valor $\alpha = 5\%$ de probabilidade de erro.

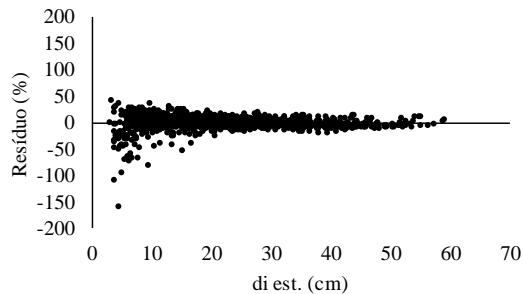
Fonte: produção do próprio autor

Portanto para a análise dos ajustes das equações pode-se aferir que a equação 19 a qual representa o modelo de Bi et al. (2000), quando comparada com as outras equações, foi a que demonstrou os melhores resultados estatísticos no ajuste. Porém como objetivo do trabalho não é apenas ajustar as equações e sim selecionar a equação com maior acuracidade de estimativas das variáveis dependentes deve-se proceder com um teste de validação.

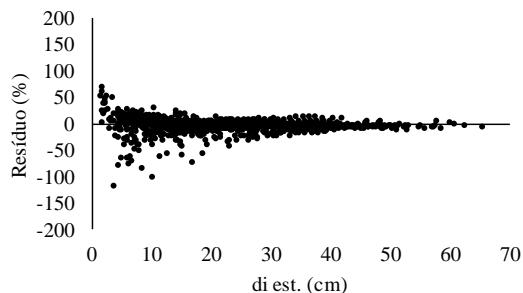
A Figura 3 demonstra os gráficos de resíduos das equações selecionadas para o ajuste dos diâmetros ao longo do tronco, dentro de cada grupo de equações e para as equações individualmente, os gráficos são mostrados no Apêndice A. Pode-se observar que nem sempre a equação que apresentou os melhores resultados estatísticos, apresenta as melhores estimativas para o diâmetro ao longo do tronco, indicando que não se pode utilizar somente o valor dos critérios estatísticos como referência na escolha de um modelo.

Figura 3 – Gráfico de resíduos (%) dos dados de ajuste das equações de afilamento em função do diâmetro (d_i), em cada posição medida.

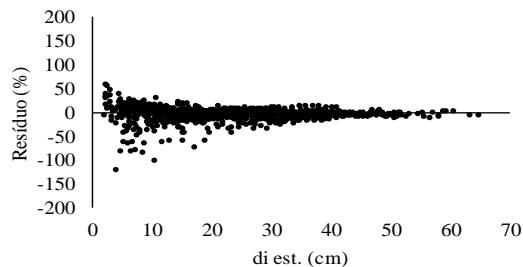
Demaerchalk (b) (1973)

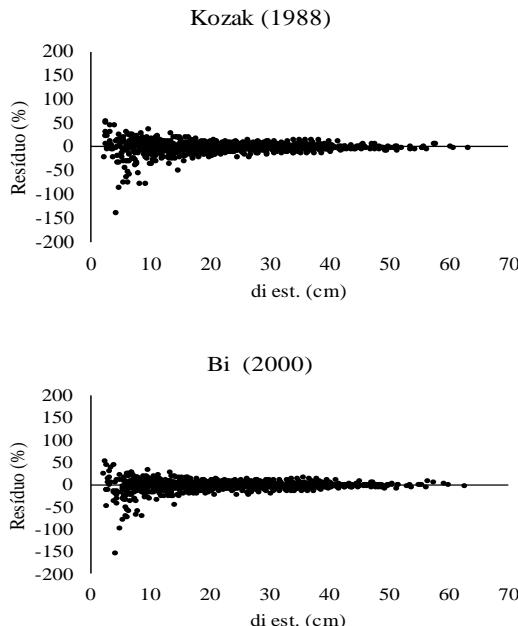


Hradetzky (1976)



Valentini e Cao (1986)





Fonte: produção do próprio autor

De maneira geral os gráficos dos resíduos demonstraram homogeneidade da variância, contudo percebe-se que os ajustes das equações tendem a superestimar o valor dos diâmetros na parte apical (80% da altura total) do tronco e pode-se notar uma homogeneidade nos resíduos na parte central e base dos troncos. A heterogeneidade na parte apical do tronco pode ser explicada pela grande variação que ocorre nos diâmetros das partes superiores do indivíduo, pois nesta região é o local onde se tem maior irregularidade do tronco devido a inserção de galhos o que provoca aumento e diminuição de medidas de diâmetros.

Moura (2011), trabalhando com híbrido de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake x *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden., verificou que os

modelos de Demaerschalk (b) (1973) e Omerod (1973) mostraram ausência de tendência nas estimativas utilizando a forma original do modelo.

Campos et al. (2014) testando os modelos de afilamento de Kozak et al. (1969), Demaerschalk (1973), Omerod (1973), Garay (1979) e Garcia et al. (1993), concluíram que todos os modelos apresentam baixa tendenciosidade de superestimação em diâmetros menores e em torno da média, também notou que os modelos de Dermaerschalk e Garay apresentaram menor tendência e menor amplitude de dispersão de resíduos, porém em seu trabalho o modelo de Dermaerschalk não foi o que melhor representou a forma do tronco ao longo do fuste.

Silva et al. (2011) testou doze modelos de afilamento para estimar os diâmetros de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*, e observou que o modelo de Dermaerschalk (1973) apresentou tendenciosidade para as estimativas do fuste.

O modelo polinomial de Hradetzky (1976) trabalha com potências fracionárias selecionadas por meio de “*stepweise*” e apresentou uma distribuição homogênea em suas partes intermediárias, porém como todos os polinômios ele apresenta problemas em suas extremidades, ou seja, nas porções de 0% - 20% e de 80 - 100%, como citado por Gordon (1983).

Rios (1997) verificou que os modelos polinomiais proporcionaram estimativas mais acuradas na descrição dos perfis das árvores, em que o Polinômio de Quinto Grau foi superior ao Polinômio de Potências Fracionárias.

Silva et al. (2011), trabalhando com uma seleção de equações de afilamentos não segmentados e algumas polinomiais atestou que o

modelo proposto por Hradetzky (1976), teve o melhor desempenho para a estimativa dos diâmetros ao longo do fuste de *Pinus caribaea* var. *hondurensis*.

Ferreira (2004), trabalhando com funções de afilamento para representar o perfil do fuste de *Pinus taeda*, na região norte do Estado do Paraná, ao analisar os gráficos de resíduos verificou que o polinômio de potências fracionárias teve as menores variações na dispersão dos resíduos.

Eisfeld et al. (2004), avaliando o polinômio de 5º grau e o polinômio de potências variáveis ajustadas por regressão não linear, concluíram que os modelos do polinômio do 5º grau e o modelo de Hradetzky (1976) possuem perfis semelhantes, os quais tem bons ajustes, porém tem problemas na estimativa dos seus extremos tanto no ápice como na base.

Analizando o gráfico de resíduo a equação 10 que representa o modelo segmentado de Valentini e Cao (1986) percebe-se que não existe uma tendência na estimativa dos diâmetros ao longo do fuste, atestado por Figueiredo Filho et al. (1996a) que, testando cinco modelos de afilamento, dois não segmentados Kozak (b) et al. (1969) e Schöepfer (1966) e três segmentados (Max e Burkhart (1976), Parresol et al. (1987) e Clark et al. (1991)), obtiveram estimativas acuradas de diâmetro para *Pinus taeda* nos modelos segmentados.

Assis et al. (2001), testando os modelos de Clark et al. (1991), Max e Burkhart (1976), Hradetzky (1976) e Goulding e Murray (1976), para *Pinus taeda*, também encontraram melhores estimativas nos modelos segmentados em relação aos não segmentados.

Quando analisado os modelos de forma variável pode-se perceber que o modelo de forma variável que melhor apresentou homogeneidade no resíduo foi a equação 14, a qual representa o modelo proposto por Kozak (1988).

Rojo et al. (2005) testando trinta e um modelos de afilamento para *Pinus pinaster* Ait., no Norte Ocidental da Espanha, dividiram os modelos em simples, segmentados e de forma variável e verificaram que os modelos de Kozak (1988), Riemer et al. (1995) e Kozak (2004), fornecem boas estimativas para os diâmetros em pontos diferentes ao longo do fuste.

Costa et al. (2015), testando três modelos de afilamento concluíram que Kozak (1988) e Lee et al. (2003) apresentam uma ótima flexibilidade e eficiência na estimativa de diâmetros ao longo do fuste.

Dentro da classe dos modelos trigonométricos a equação 19 foi a que se destacou, esta equação foi proposta por Bi (2000), o qual apresentou os melhores resultados estatísticos e também a melhor distribuição gráfica dos resíduos apresentando a menor heterogeneidade dos resíduos.

Segundo Le e Weiskittel (2009) testando equações de afilamento para três diferentes espécies de coníferas primárias no Norte dos Estados Unidos, a equação desenvolvida por Bi (2000) teve um bom ajuste se destacando na estimativa dos diâmetros ao longo do fuste para duas das espécies testadas, seguida por Kozak (2004), a qual também teve um bom desempenho e Valentini e Gregoire (2001) ajustou-se para apenas uma espécie estudada.

Rojo et al. (2005), testando modelos de afilamento para *Pinus pinaster* Aiton., concluiu que o modelo de Bi (2000) poderia ser utilizado

para estimativas de diâmetros ao longo do fuste, pois apresentou bons resultados de ajustes, porém quando comparado com outros modelos na validação não foi o que melhor apresentou os resultados.

Para Bi e Long (2000), equações trigonométricas apresentam melhores resultados que equações de forma variável como, por exemplo, Kozak (1988, 1997), Foursland (1991) e Newnham, (1988, 1992), pelo motivo dos fustes apresentarem formas diferentes com o aumento da altura.

4.2 VALIDAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE AFILAMENTO PARA A ESTIMATIVA DE DIÂMETROS AO LONGO DO TRONCO

Na Tabela 7, são apresentadas as estatísticas complementares resultantes de resíduos para a escolha da equação que melhor estimou os diâmetros ao longo do tronco. As estatísticas apresentadas do Desvio (D), Soma de Quadrados do Erro Relativo (SQER) e Resíduo em Porcentagem (RP), relacionadas a tendências das estimativas, corroboram os resultados da análise gráfica dos resíduos.

Avaliando os grupos das equações testadas percebe-se que as equações de Forma Variável apresentaram melhores valores das estatísticas utilizadas para realizar o teste de validação das equações (Tabela 7), seguido pelo grupo das equações Exponenciais, Polinomiais, Trigonométricas e com pior resultado as equações segmentadas.

Tabela 7 – Análise estatística dos valores residuais para a validação das equações de estimativa de diâmetros ao longo do tronco de *Araucaria angustifolia* na região oeste do estado de Santa Catariana.

Equação	Forma do Modelo	D*	SQER*	RP*
1	Exponencial	-0,2856	7,8178	-0,8987
2		-0,0114	9,0667	-1,4906
3		-0,1241	12,1441	-2,1048
4		0,0304	10,3247	-1,5928
5	Polinômio	-0,3290	8,3802	-1,0388
6		-0,2794	6,5446	-0,5317
7		-0,1296	13,8218	-1,0648
8		-0,3839	8,2655	-1,9322
9	Segmentado	-0,4687	9,2279	-3,3062
10		-0,4241	7,8322	-2,6190
11		-0,4061	9,0937	-3,0138
12		-0,2882	29,7123	-3,7155
13	Forma Variável	-0,0796	6,8361	-0,3338
14		-0,1195	7,1889	-1,6239
15		0,4153	25,2341	4,9515
16		-0,0947	7,3070	-0,9046
17	Trigonométrico	-0,4953	9,8360	-3,5637
18		-0,3559	6,9206	-1,7178
19		-0,2032	8,5176	-2,5805

Em que: D = Desvio (cm); SQER = Soma de Quadrados do Erro Relativo; RP = Resíduo Porcentagem; * Valores pequenos são melhores.

Fonte: produção do próprio autor.

Os menores valores médios de Desvio foram encontrados para o grupo de equações de forma variável com valor médio da estatística desvio de 0,0304, seguido pelo grupo de equações exponenciais com valor médio de -0,0977, na sequência vem o grupo das equações,

Polinômios com média de -0,2804, equações Trigonométricas com média de -0,3515 e como pior resultado os modelos Segmentados com média de -0,3968.

Dentre estes resultados a equação que apresentou os menores valores para a estatística do Desvio foi a equação 2 pertencente ao grupo exponencial desenvolvida por Omerod (1973), com valor de 0,0114, seguida pela equação 4 desenvolvida por Forslund (1990), com valor de 0,0304. O terceiro menor valor de Desvio foi da equação 13, a qual foi desenvolvida por Lee et al. (2003), com valor de -0,0796.

O maior valor para a estatística do desvio (0,4953) foi para a equação 17, equação desenvolvida por Schalaegel (1981), a qual é um modelo pertencente ao grupo Trigonométrico.

Loureiro et al. (2012), trabalhando com quatro modelos de afilamento para *Araucaria angustifolia*, obteve com o modelo de Omerod (1973) melhor estatística de desvio para a estimativa de diâmetro ao longo do tronco com valor de 0,0200.

Môra et al. (2014), testando modelos de afilamento para híbrido de *Eucalyptus sp.* demonstrou que os modelos de Omerod (1973) e Demaerschalk (1973), mostraram ausência de tendência nas estimativas dos diâmetros pelo modelo original, mesma metodologia aplicada neste estudo.

Campos et al. (2014), trabalhando com cinco modelos de afilamento para híbrido de *Eucalyptus sp.* constataram que o modelo de Omerod (1973), gerou melhor estimativas para os diâmetros ao longo do tronco.

O grupo de modelos que apresentou melhores resultados para a estatística da Soma de Quadrados do Erro Relativo (SQER) foram os

modelos Trigonométricos com valor médio de 8,4248, seguido pelos modelos Polinomiais (9,2530), modelos Exponenciais (9,8383), Modelos de Forma Variável (11,6415) e como pior resultado temos os modelos Segmentados (13,9665).

Dentre os modelos que apresentaram os menores valores estão, a equação 6 (Polinômio de 3º), com valor de SQER 6,5446, o grupo das equações de Forma Variável representado pela equação 13 (Lee et al. (2003)), apresentando valor de SQER 6,8361 e logo na sequência a equação 18 (Thomas e Parresol (1991)), com valor de SQER 6,9206.

Queiroz (2006), testando equações de afilamento para *Mimosa scabrella* Bentham em povoamentos nativos na região metropolitana de Curitiba/PR, concluiu que para a estatística SQER naquele estudo a equação Polinomial de Hradetzky (1976), foi a que obteve os melhores resultados.

Favalessa (2011), testando equações de afilamento segmentadas e não segmentadas para povoamentos de *Tectona grandis* L.f., no município de Rosário Oeste/MT, constatou que o modelo de polinomial de Hradetzky (1976), foi o modelo que apresentou os melhores resultados para a estatística SQER. O autor também menciona que o modelo segmentado de Clark et al. (1991), também pode ser utilizado para estimativa de diâmetros ao longo do tronco. Assim como esta tendência foi também demonstrada por Conceição (2004) e por Souza (2005), para *Eucalyptus* spp. e igualmente por Assis et al. (2002) e por Machado et al. (2004), para *Pinus* spp.

Para a estatística de Resíduo em Porcentagem, percebe-se na Tabela 6 que o grupo que melhor apresentou resultados foi o grupo de equações de Forma Variável com valor médio de 0,5223, sendo inferior

ao restante dos outros grupos e representando que as equações geram subestimativas dos valores de diâmetros, na sequência vem o grupo dos Polinômios com valor médio de -1,1419, podendo-se concluir que os polinômios podem gerar superestimativas no ajuste dos diâmetros, e após temos o grupo das equações Exponenciais com valor médio de -1,5217, o grupo das equações Trigonométricas apresentou valor médio de -2,6206 e como pior grupo de equações tem-se as Segmentadas com valor médio de -3,163.

Dentre as equações a que teve os melhores resultados para a estimativa do Resíduo em Porcentagem foi a equação 13 (Lee et al. (2003)), com valor igual a -0,3338, significando que a equação superestimava os valores dos diâmetros, a equação 6 (Polinômio de 3º), com valor de Resíduo em Porcentagem de -0,5317, a equação 1 (Hojer (1903)), com um valor médio de Resíduo em Porcentagem igual a -0,8987.

Andrade (2014), testando 18 modelos de afilamento, sendo 6 não segmentados, 2 segmentados e 10 de forma variável para híbridos de *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*, concluiu que os modelos de Forma Variável resultaram em estimativas mais acuradas dos diâmetros ao longo do tronco.

Figueiredo Filho et al. (1996), ajustaram equações segmentadas e não segmentadas para estimativa de diâmetros em *Pinus taeda*, e obtiveram melhor acurácia com os modelos segmentados, assim como para Môra (2015), que encontrou melhores valores de desvio para as equações de forma variável. Enquanto as equações com as maiores tendências nas estimativas dos diâmetros na estatística do desvio foram as equações não segmentadas.

Figueiredo et al. (2004), trabalhando com seleção de modelos polinomiais para representar o perfil e volume do fuste de *Tectona grandis* L. f. constatou que o modelo do Polinômio de 5º não foi eficaz nas estimativas dos diâmetros ao longo do fuste, também constatou que o modelo de Hradtzky (1976) apresentou valores intermediários e o modelo que melhor apresentou resultados para as estatísticas foi o modelo de Goulding e Murray (1976), pois apresentou em apenas 6,61% das vezes a pior colocação nas estatísticas.

Favalessa (2011), trabalhando com Funções de afilamento Segmentada e não segmentada atestou que o modelo Polinomial de Hradtzky (1976), foi o que melhor apresentou resultados na estatística do Resíduo Percentual.

Queiroz (2006), avaliando funções de afilamento para *Mimosa scabrella* Bentham, em povoados nativos na região metropolitana de Curitiba/PR, afirmou que o modelo Polinomial de Hradtzky (1976) apresentou melhor resultado para a estatística Resíduo em Porcentagem.

Costa et al. (2015), trabalhando com três modelos de afilamento para as alturas relativas (hi/h) para *Araucaria angustifolia*, afirmou que na porção de 0% – 40% a equação de Kozak (1988) tem os melhores valores para estatística do Resíduo em Porcentagem na estimativa dos diâmetros. Para a porção de 40% - 60% a equação de Sharma e Zhang (2004) foi a que melhor representou os diâmetros na estatística Resíduo em Porcentagem, já para a porção que trata de 60% - 100% da altura total a equação que melhor apresentou resultados foi a equação de Lee et al. (2003), valores esses semelhantes aos encontrados neste estudo.

Para seleção da melhor equação utilizou-se o critério estatístico do Valor Ponderado (Tabela 8), o qual consiste do somatório da

pontuação de cada estatística avaliada (D, SQER e RP), para selecionar a equação que melhor representa as estimativas dos diâmetros ao longo do tronco.

Tabela 8 – Resultado dos valores ponderados para as estatísticas de validação das equações de estimativa de diâmetros ao longo do tronco de *Araucaria angustifolia* na região oeste do estado de Santa Catarina.

Equação	Pontuação (D)	Pontuação (SQER)	Pontuação (RP)	VP
1	10	6	3	19
2	1	11	7	19
3	6	16	12	34
4	2	15	8	25
5	12	9	5	26
6	9	1	2	12
7	7	17	6	30
8	14	8	11	33
9	18	13	16	47
10	17	7	14	38
11	15	12	15	42
12	11	19	18	48
13	3	2	1	6
14	5	4	9	18
15	16	18	19	53
16	4	5	4	13
17	19	14	17	50
18	13	3	10	26
19	8	10	13	31

Fonte: produção do próprio autor.

Analizando a Tabela 8, percebe-se que a equação que melhor apresentou os resultados para estimativas de diâmetros ao longo do tronco foi a equação 13 o qual representa a equação desenvolvida por Lee et al. (2003), com um valor ponderado de 6, seguido pela equação 6, a qual

representa o modelo do Polinômio de 3º com valor ponderado de 12, como terceira melhor equação temos a equação 16, a qual representa o modelo descrito por Leite e Garcia (2001), com valor ponderado de 13 pontos, na quarta colocação a equação 14 a qual representa o modelo descrito por Kozak (1988) com valor ponderado de 18 pontos. Os piores resultados obtidos foram para a equação do grupo da Forma Variável 15, a qual representa o modelo descrito por Amidon (1984) que apresentou valor ponderado de 53 pontos, seguido pela equação 17, a qual representa o modelo Schalaegel (1981) e a equação segmentada 12, representando o modelo de Parresol et al. (1987).

Das quatro primeiras equações selecionadas três são do grupo de Forma Variável, uma do grupo dos Polinômios. Os modelos segmentados obtiveram as piores colocações.

Machado et al. (2004) ajustaram os modelos de afilamento de Kozak et al. (1969), Prodan (1965) e Hradetzky (1976) para diferentes idades e regimes de desbaste em plantações de *Pinus oocarpa* Schiede ex Schltdl., na região de Agudos – SP, e concluíram que o modelo que melhor descreveu o perfil do tronco para os dados utilizados no trabalho foi o modelo de Polinomial de potências fracionárias de Hradetzky.

Scolforo et al. (1998) trabalhando com dados de *Pinus elliottii* Engelm., na região nordeste do Estado do Paraná, ajustaram cinco modelos de afilamento, os autores destacaram que as funções “splines” cúbicas e a equação de afilamento de Clutter não são recomendadas para estimar o diâmetro ao longo do tronco de *Pinus elliottii*. Ainda, que a equação de afilamento de Amateis e Burkhardt e as equações polinomiais apresentaram estimativas acuradas do diâmetro ao longo do tronco.

Campos et al. (2014), estudaram cinco modelos de afilamento utilizados para conversão de fustes de árvores em multiprodutos, sendo os de Kozak et al. (1969), Demaerschalk (1972), Omerod (1973), Garay (1979), e Garcia et al. (1993), afirmam que todos os modelos apresentam resíduos com baixa tendenciosidade nas estimativas em diâmetros menores e em torno da média, onde o modelo que apresentou menor tendenciosidade foi o modelo de Demaerschalk (1972), seguido por Garay (1979). O modelo que apresentou o pior resultado foi o Kozak et al. (1969).

Figueiredo Filho et al. (1996), ajustaram cinco modelos sendo dois polinômios, o de Kozak et al. (1969) e Polinômio de quinto grau e três modelos segmentados, o de Max e Burkhart (1976), de Parresol et al. (1987) e Clark et al. (1991) encontraram estatísticas semelhantes para os modelos Segmentados e Polinomiais com exceção ao modelo de Kozak et al. (1969), que apresentou uma grande variação nas extremidades principalmente na base, onde encontra-se a parte mais valiosa da árvore. Segundo os autores, o modelo mais indicado para a estimativa seria o modelo de Clark et al. (1991) que apresentou pequena vantagem em comparação com os outros modelos testados.

Brooks et al. (2008) trabalhando na estimativa de diâmetro para Pinho da Grã-Bretanha, Cedro e Cedro do Líbano, concluiu que os modelos segmentados geram estimativas com acurácia e precisão.

Souza (2005) e Souza (2007), trabalhando com dados de *Eucalyptus* sp., compararam modelos segmentados e não segmentados e afirmaram que, além de serem menos complexos, os modelos não segmentados foram mais precisos do que os segmentados.

Lansanova et al. (2013), ajustando e avaliando modelos de afilamento não segmentados de Schöepfer (1966), Kozak et al. (1969), Hradetzky (1976) e Demaerschalk (1972) adaptado por Moura (1994), na forma original, para a estimativa de diâmetros ao longo do fuste para espécies florestais comercialmente exploradas na Amazônia Mato-grossense, encontraram resultados satisfatórios, sendo o melhor ajuste verificado pelo modelo de Demaerschalk (1972) adaptado, enquanto o modelo de Kozak et al. (1969) mostrou o pior ajuste.

Môra et al. (2014) testaram as equações de afilamento de Baldwin e Feduccia (1991), Demaerschalk (1973), Kozak et al. (1969) e Ormerod (1973) para análise de diferentes formas de ajuste de funções de afilamento e concluíram que para estimativa dos modelos na sua forma original, o modelo de Demaerschalk (1973), foi o que apresentou os melhores resultados quanto a acurácia.

Costa et al. (2015), estudando aproximação de integração numérica aplicada a modelos de afilamento para *Araucaria angustifoila*, testou três modelos de afilamento Kozak (1988), Lee et al. (2003) e Sharma e Zhang (2004), por meio das estatísticas de validação concluíram que o modelo de Lee et al. (2003), foi o que melhor estimou os diâmetros para compor o perfil do fuste dos indivíduos.

Andrade (2014), testando 18 modelos de afilamento para estimativa de perfil de fustes de *Eucalyptus* sp. concluiu que modelos de Forma Variável tem superioridade nas estimativas quando comparados com modelos Exponenciais e modelos Segmentados. Também Figueiredo Filho et al (1996) e Assis et al. (2001), concluíram que o modelo segmentado de Clark et al. (1991) é superior ao modelo de Max e Burkhart (1976).

Silva et al. (2011), trabalharam com dados de *Pinus caribea var. hondurensis*, e obtiveram melhor precisão com o modelo Exponencial de Baldwin Jr e Feduccia (1991) quando comparado com os modelos de Garay (1979), Demaerschalk (1971) e de Ormerod (1973).

Eisfeld et al. (2004), avaliaram o ajuste do polinômio de 5º grau, polinômio de potências variáveis ajustadas por regressão não linear e concluíram que os modelos do polinômio do 5º grau e o modelo de Hradetzky (1976) possuem perfis semelhantes.

4.3 VALIDAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE AFILAMENTO PARA A ESTIMATIVA DE ALTURAS EM DIFERENTES DIÂMETROS AO LONGO DO TRONCO

A equação de afilamento deve ter precisão em estimar o diâmetro em diferentes alturas, bem como também deve ter uma boa estimativa das alturas (h_i) em diferentes diâmetros (d_i) ao longo do tronco.

Portanto, processos iterativos utilizando o algoritmo GRG Não Linear, com a ferramenta Solver do programa Microsoft Excel 2016®, foram realizados para validar equações que possam gerar as estimativas das alturas relativas em diferentes diâmetros.

As equações ajustadas segundo sua forma original apresentam precisão satisfatória no que diz respeito a estimativa de diâmetros, porém quando rearranjadas para estimativa de alturas não garantem um bom desempenho. Sendo necessário realizar análises estatísticas descritas na Tabela 4, e ajustes para avaliação das funções em relação a essa variável.

Na Tabela 9, são demonstrados os valores das estatísticas utilizadas para validação das equações para estimativa das alturas.

Tabela 9 - Análise estatística dos valores residuais para validação das equações para gerar estimativas das alturas ao longo do tronco de *Araucaria angustifolia*, na região oeste do Estado de Santa Catarina.

Equação	Forma do Modelo	D*	SQER*	RP*
1	Exponencial	0,0234	339,9348	439,4148
2		0,2149	169,1180	322,5212
3		-0,0525	63,5554	167,6612
4		-	-	-
5	Polinômio	-0,1816	0,5404	-0,6215
6		-0,2003	1,2829	5,3262
7		-0,1931	50,5425	188,9462
8		-0,2116	0,1549	-5,2362
9	Segmentado	-0,7883	11,7619	-70,0063
10		-0,2368	0,4977	-0,6922
11		-0,1824	0,3104	-1,0249
12		-0,0730	2,8908	15,8164
13	Forma Variável	-0,1070	2,0164	11,7832
14		-0,1471	0,1457	-4,9396
15		0,0067	200,3761	360,2926
16		-0,0603	74,3605	183,8578
17	Trigonométrico	-0,0106	57,2412	169,1205
18		-0,0416	36,4914	126,6407
19		-0,1696	0,1184	-5,6071

Em que: D = Desvio (cm); SQER = Soma de Quadrados do Erro Relativo; RP = Resíduo Porcentagem; * Valores pequenos são melhores.

Fonte: produção do próprio autor.

Dentre os grupos de equações, vale ressaltar que as que não obtiveram ajuste foram eliminadas evitando-se assim, tendências no momento da escolha da equação. Dentro do grupo das exponenciais a equação 4 a qual representa o modelo descrito por Forslund (1990), não estimou dados de altura abaixo de 1,3 m, sendo excluída.

Das análises por grupo de equações pode-se perceber que o grupo das equações Trigonométricas apresentou melhores resultados nas estatísticas, seguida pelos grupos de Forma Variável e Segmentadas, as equações Polinomiais e como pior resultado o grupo das equações Exponenciais.

Na estatística do Desvio o grupo que obteve melhor valor da estatística de maneira geral foram as equações Exponenciais com valor médio de 0,0619, seguida pelas equações Trigonométricas com média de -0,0740, equações de Forma Variável com média de -0,0769, Equações Polinomiais com média de -0,1966 e como pior resultado as equações segmentadas com valor médio de desvio -0,3201.

Para Soma de Quadrados do Erro Relativo (SQER), o grupo de modelos que apresentou melhores resultados foram as equações Segmentadas, com média de 3,8652, seguido pelas equações Polinomiais com média de 13,1302, equações Trigonométricas apresentando um valor médio de 31,2836, equações de Forma Variável com média de 69,2247 e como piores resultados para essa estatística temos as equações Exponenciais com valor médio de 190,8694, possuindo uma grande diferença dos demais grupos de equações.

Para o Resíduo em porcentagem (RP) por grupo de equações conclui-se que as equações Segmentadas apresentam valor médio de -13,9767, seguido pelas equações Polinomiais com valor médio de 47,1037, equações Trigonométricas com valor médio de 96,7180, as equações de Forma Variável com valor médio de 137,7485, e como pior resultado se tem as equações Exponenciais com valor médio de 309,8657.

Souza et al. (2008), trabalhando com a avaliação de modelos de afilamento não segmentados de Demaerschalk (1972), Ormerod (19730,

Polinômio de Quinto Grau (1966), Hradetzky (1976), Garay (1979) e Biging (1984) para estimativa da altura comercial de *Eucalyptus* sp. concluíram que os modelos de Hradetzky (1976) e o Polinômio de Quinto Grau (1966), foram os que apresentaram ausência de tendência nas estimativas. Como pior resultado os mesmos autores encontraram o modelo de Garay (1979), para a estatística do desvio.

Souza et al. (2008), trabalhando com avaliação de modelos de afilamento segmentados Modelo de Max e Burkhart (1976), Demaerschalk e Kozak (1977) e Parresol et al. (1987) na estimativa da altura comercial de fustes de *Eucalyptus* sp., constataram que na estatística do Desvio o modelo de Demaerschalk e Kozak (1977), apresentou os melhores resultados.

Môra (2011), estudando a influência na forma de ajuste e do comprimento das seções no desempenho de funções de afilamento de Kozak (1969), Demaerschalk (1972), Ormerod (1973) e Baldwin (1991), constatou que para a estatística Desvio os modelos de Demaerschalk (1972), Ormerod (1973) e Baldwin (1991), existe ausência de tendência nas estimativas, o que não ocorre para Kozak (1969).

Avaliando as equações individualmente, temos a Tabela 10 a qual apresenta a pontuação que foi gerada através da análise do melhor valor estatístico para cada critério avaliado na Tabela 9.

Tabela 10 - Resultado dos valores ponderados para as estatísticas de validação das equações de estimativa das alturas ao longo do tronco de *Araucaria angustifolia* na região oeste do Estado de Santa Catariana.

Equação	Pontuação (D)	Pontuação (SQER)	Pontuação (RP)	VP
1	3	18	18	39
2	16	16	16	48
3	5	14	12	31
5	11	6	1	18
6	14	7	6	27
7	13	12	15	40
8	15	3	5	23
9	18	10	10	38
10	17	5	2	24
11	12	4	3	19
12	7	9	9	25
13	8	8	8	24
14	9	2	4	15
15	1	17	17	35
16	6	15	14	35
17	2	13	13	28
18	4	11	11	26
19	10	1	7	18

Fonte: produção do próprio autor.

Para estimativa das alturas em diferentes diâmetros a equação 14 do grupo de Forma Variável, modelo descrito por Kozak (1988), foi a que apresentou melhor valor ponderado com 15 pontos, sendo a equação se que ajusta melhor as variações que ocorrem nas estimativas das alturas ao longo do tronco dos indivíduos, na sequência temos a equação 5 que representa o Polinômio de quinto grau e a equação 19, representando o modelo descrito por Bi (2000) ambas com 18 pontos. A equação 11

representa o modelo descrito por Byrne e Reed (1986) apresentou pontuação de 19 pontos sendo a melhor equação segmentada, e como pior resultado para estimativas das alturas ficou a equação 2, representando o modelo descrito por Ormerod (1973) (48 pontos), sendo que está equação pertence ao grupo das equações Exponenciais.

Souza et al. (2008), avaliaram modelos segmentados para estimativa de alturas comerciais em *Eucalyptus* sp. e concluíram que o modelo de Max e Burkhart (1976) apresentou melhores resultados na estimativa desta variável.

Souza et al. (2008), avaliaram seis modelos de afilamento não segmentados para estimativa de alturas comerciais em *Eucalyptus* sp. e não conseguiram concluir qual o melhor modelo para estimar a altura pela metodologia do valor ponderado, sendo que dois deles apresentaram valores iguais. Partindo desta igualdade na pontuação do valor ponderado os autores avaliaram a acurácia dos modelos por meio do gráfico dos resíduos e concluíram que o modelo de Biging (1984) foi o melhor.

Lima (1986), em um estudo com a espécie *Pinus elliotti*, concluiu que, para a estimativa da altura comercial o modelo de Kozak et al. (1969), foi o que apresentou maior precisão ao longo do tronco, com o modelo de Biging (1984), apresentando o pior resultado.

Mendonça (2006), trabalhando com dados provenientes de *Eucalyptus* sp., testando modelos de afilamento não-segmentados, concluiu que o modelo do Polinômio de quinto grau foi o mais apropriado para estimativa da altura comercial.

Souza (2007), avaliando as estimativas de altura comercial, volume comercial e volume ao longo do tronco obtidas por três modelos segmentados e seis não-segmentados, encontrou melhores resultados com

os modelos não-segmentados, sendo o modelo de Biging (1984) o que apresentou os melhores resultados nas estimativas das variáveis altura comercial e volume comercial. Esse resultado é bastante interessante, pelo fato de que os modelos não segmentados são menos complexos e, consequentemente, com maior facilidade de serem ajustados e manuseados.

4.4 VALIDAÇÃO DAS EQUAÇÕES DE AFILAMENTO PARA A ESTIMATIVA DO VOLUME

As equações de afilamento devem ter boas estimativas de diâmetros (d_i), alturas (h_i) e também de volumes em diferentes pontos ao longo dos troncos.

Na Tabela 11 estão demonstrados os resultados das análises estatísticas obtidas com o ajuste dos modelos utilizados para as estimativas dos volumes do tronco dos indivíduos.

Tabela 11 - Análise estatística dos valores residuais para validação das equações para gerar estimativas dos volumes do tronco de *Araucaria angustifolia*, na região oeste do Estado de Santa Catarina.

Equação	Forma do Modelo	D*	SQER*	RP*
1	Exponencial	-0,0339	0,0583	-2,6059
2		-0,0072	0,0380	1,4209
3		-0,0146	0,1418	-2,0966
4		-0,0079	0,0926	2,6128
5	Polinômio	-0,0186	0,0735	0,9349
6		-0,0193	0,0736	0,8516
7		-0,0290	0,0760	-0,5919
8		-0,0194	0,0745	0,8458

Continua..

Continuação..

Tabela 11 - Análise estatística dos valores residuais para validação das equações para gerar estimativas dos volumes do tronco de *Araucaria angustifolia*, na região oeste do Estado de Santa Catariana.

Equação	Forma do Modelo	D*	SQER*	RP*
9	Segmentado	-0,0213	0,0714	0,5029
10		-0,0204	0,0696	0,5649
11		-0,0174	0,0737	1,0993
12		-0,0150	0,0768	1,4592
13	Forma Variável	0,0004	0,0028	0,2318
14		0,0041	0,0026	0,3859
15		-0,0013	0,1446	-3,4985
16		-0,0135	0,0276	-1,5449
17		-0,0227	0,0754	0,3966
18	Trigonométrico	-0,0191	0,0761	0,9302
19		0,0006	0,0155	-0,4722

Em que: D = Desvio (cm); SQER = Soma de Quadrados do Erro Relativo; RP = Resíduo Porcentagem; * Valores pequenos são melhores.

Fonte: produção do próprio autor.

Na análise dos critérios estatísticos realizada por grupo de equações é possível perceber que o grupo de equações de Forma Variável apresentou os melhores resultados para as estatísticas analisadas, seguida pelos grupos de equações Trigonométricas, Segmentadas e Polinomiais e como as piores estatísticas foram para o grupo das equações Exponenciais.

Para o critério do Desvio o grupo que obteve melhor média geral foram as equações de Forma Variável com valor médio de -0,00575, seguida pelas equações Trigonométricas com valor médio de -0,0138, equações Exponenciais com valor médio de -0,0159, Equações

Segmentadas com valor médio de -0,0185 e com pior resultado as equações Polinomiais com valor de desvio com valor médio do grupo de -0,0216.

Os resultados indicam que as equações tendem a superestimar os volumes, pois os valores de desvio foram negativos, exceto para os modelos 13 (Lee et al. (2003), modelo 14 Kozak (1988) e modelo 19 Bi (2000) os quais subestimam a variável ao longo do tronco.

Quanto a estatística da Soma de Quadrados do Erro Relativo (SQER), o grupo de modelos que apresentou melhores resultados foram as equações de Forma Variável, com média de 0,00888, seguido pelas equações Trigonométricas com valor médio de 0,0557, equações segmentadas com valor médio de 0,0729, equações Polinomiais com valor médio de 0,0744, e com piores resultados as equações Exponenciais com média de 0,0827.

Na análise da estatística do Resíduo em Porcentagem (RP), para estimativa dos volumes para o tronco inteiro por grupo de equações concluímos que as equações Exponenciais apresentam valor médio de -0,1672, seguido pelas equações Trigonométricas as quais apresentam um valor médio de 0,2849, equações Polinomiais com média de 0,5101, as equações Segmentadas com média de 0,9066 e com os piores resultados as equações de Forma Variável com valores médios de -1,1064.

As equações dos grupos exponencial, polinomial, segmentado, apresentaram de maneira geral superestimava do volume, nas equações de forma variável, apenas as equações de Amidom (1984) e Leite e Garcia (2001) superestimam os volumes já as equações de Kozak (1988) e Lee et al. (2003) subestimam os volumes totais dos troncos. No grupo das equações trigonométricas as equações de Schalaegel (1981) e Thomas e

Parresol (1991) superestimam os volumes totais dos troncos, enquanto que o modelo proposto por Bi (2000) subestima o volume do tronco.

Resultado esse semelhante ao encontrado por Môra (2015), o qual encontrou como melhor grupo de equações as de forma variável seguida pelas equações segmentadas e não segmentadas para *Pinus taeda*.

Souza et al. (a) (2008), trabalhando com modelos de afilamentos não segmentados na estimativa da altura e do volume comercial de *Eucalyptus* sp. concluíram que todos os modelos testados apresentam boas estimativas em relação a estimativas dos volumes.

Souza et al. (b) (2008), estudaram modelos de afilamento segmentados na estimativa da altura e volume comercial de troncos de *Eucalyptus* sp. e concluíram que o modelo de Max e Burkhart (1976) apresentou a melhor estimativa de volume, porém todos os outros modelos testados apresentaram valores estatísticos com validação aceitáveis.

A Tabela 12 apresenta a pontuação obtida pelo valor ponderado dos escores estatísticos para cada critério avaliado.

Tabela 12 - Resultado dos valores ponderados para as estatísticas de validação das equações de estimativa do volume do tronco de *Araucaria angustifolia* na região oeste do Estado de Santa Catariana.

Nº	Pontuação (D)	Pontuação (SQER)	Pontuação (RP)	VP
1	19	6	17	42
2	5	5	13	23
3	8	18	16	42
4	6	17	18	41
5	11	9	11	31
6	13	10	9	32
7	18	14	7	39
8	14	12	8	34
9	16	8	5	29
10	15	7	6	28
11	10	11	12	33
12	9	16	14	39
13	1	2	1	4
14	4	1	2	7
15	3	19	19	41
16	7	4	15	26
17	17	13	3	33
18	12	15	10	37
19	2	3	4	9

Em que: D = Desvio (cm); SQER = Soma de Quadrados do Erro Relativo; RP = Resíduo Porcentagem; * Valores pequenos são melhores.

Fonte: produção do próprio autor

Para estimativa dos volumes totais dos troncos, a equação que apresentou os melhores resultados foi a equação 13, equação esta

desenvolvida por Lee et al. (2003), com um valor ponderado de 4, seguida pela equação 14 a qual foi desenvolvida por Kozak (1988), com valor ponderado de 7, e como terceira melhor tem-se a equação 19 desenvolvida por Bi (2000) com valor ponderado de 9. As equações que apresentaram os piores resultados foram as equações 1 e 3 sendo desenvolvidas por Hojer (1903) e Demaerchalk (b) (1973) ambas respectivamente com valor ponderado de 42.

Na análise da estatística do Desvio (D), a equação 13 desenvolvida por Lee et al. (2003) foi a que apresentou o melhor resultado obtendo valor de $0,0004\text{m}^3$, seguida da equação 19, desenvolvida por Bi (2000), a qual obteve valor de Desvio igual a $-0,0006\text{m}^3$, como terceira melhor temos a equação 15 a qual foi desenvolvida por Amidon (1984) com valor de $-0,0013\text{m}^3$. A equação que apresentou o pior resultado foi a equação 1 a qual foi descrita por Hojer (1903), apresentando valor de Desvio igual a $-0,0339\text{m}^3$.

Na estatística Soma do Quadrado do Resíduo do Erro (SQER), a equação que melhor apresentou resultados no teste de validação da estimativa dos volumes foi a equação 14 descrita por Kozak (1988) com valor de SQER 0,0026, seguida pela equação 13, desenvolvida por Lee et al. (2003), com valor de 0,0028, e na sequência tem-se a equação 19 que foi descrita por Bi (2000) com valor de 0,0155. Para esta estatística de SQER temos como pior equação a de número 15, descrita por Amidon (1984) com valor da estatística igual a 0,1446.

A estatística do Resíduo em Porcentagem (RP), teve como melhor resultado a equação 13 que foi descrita por Lee et al. (2003) com valor de 0,2318, seguido pela equação 14 desenvolvida por Kozak (1988), com valor de 0,3859, na sequência temos a equação 17, descrita por

Schalaegel (1981) com valor da estatística de RP de 0,3966, e como pior resultado desta estatística temos a equação 15, descrita por Amidon (1984), com valor RP de -3,4985.

Figueiredo et al. (2006), trabalhando com a seleção de modelos de afilamento polinomiais, especificamente o Polinômio 5º, o modelo de Hradetzky (1976) de Goulding e Murray (1976), para representar o perfil e volume do fuste de *Tectona Grandis* L.F. atestaram que na estimativa de volume o modelo de Goulding e Murray (1976) foi o que obteve melhores ajustes seguido pelos modelos de Hradetzky (1976) e Polinômio 5º.

Barbosa et al. (2012), estudando o sortimento de *Tectona grandis* L.f. no município de Nossa Senhora do Livramento-MT, compararam as estimativas de volume dos modelos não segmentados de Demaerschalk (1972), Hradetzky (1976) e Omerod (1973). Dentre as equações testadas a mais acurada para a estimativa foi a equação de Hradetzky (1976).

Scavinski et al. (2012), ajustando as funções de afilamento de Kozak (1969), Polinômio 5º e de Hradetzky (1976), para *Pinus elliotti* na Flona de Irati, concluíram que para estimativa de volume a equação de Hradetzky (1976) teve valores das estatísticas de validação superiores aos das demais equações testadas.

Campos et al. (2014), testaram o efeito de modelos de afilamento utilizados sobre a conversão de troncos de árvores em multiprodutos. Os autores ajustaram os modelos de Kozak (1969), Dermaerschalk (1972), Ormerod (1973), Garay (1979) e Garcia et al. (1993). Concluíram que o modelo de Garay (1979), teve o melhor desempenho e o modelo de

Ormerod (1973) teve pior desempenho, porém sem diferença estatística entre os dois.

Kozak (1988), testando a equação de afilamento Kozak (1988), do tipo Forma Variável, concluiu que ela tem acurácia nas estimativas de volume em grande parte do fuste dos indivíduos, porém o único problema desta equação é que não tem uma integral definida, mas o autor cita que ela gerou com acurácia o ajuste dos diâmetros, sendo assim, podendo ser aplicado técnica de Integração Numérica para estimativa dos volumes.

Môra et al. (2014), realizaram análise para o ajuste de funções de afilamento, sendo as funções de Kozak et al. (1969), Demaerschalk (1972), Ormerod (1973) e Baldwin e Feduccia (1991) testadas. Os autores por meio de testes de validação concluíram que a função de Demaerschalk (1972), foi a mais precisa, apresentando ausência de tendência na estimativa do volume.

Souza (2007), avaliando volume comercial e volume ao longo do fuste obtidas por três modelos segmentados e seis não-segmentados, encontrou melhores resultados com os modelos não-segmentados, sendo o modelo de Biging (1984) o que apresentou os melhores resultados na estimativa do volume comercial.

Costa et al. (2015) testando 3 equações de afilamento de forma variável por meio de teste de validação concluíram que a equação de Lee et al. (2003) foi a equação que melhor estimou o volume para troncos de *Araucaria angustifolia*.

4.5 SELEÇÃO DA MELHOR EQUAÇÃO QUANTO ÀS ESTIMATIVAS DE DIÂMETRO (d_i), ALTURA TOTAL (h) E RELATIVA (h_i) E VOLUME TOTAL DO TRONCO (v)

Segundo Kozak (1988) as equações de afilamento devem apresentar estimativas acuradas de diâmetros ao longo do tronco (d_i), altura total (h), altura em qualquer ponto ao longo do tronco (h_i) e volume total ou entre secções do tronco.

Nem sempre a equação que melhor estimou uma das variáveis poderá estimar as outras duas, neste intuito, procurou-se selecionar a equação que melhor consegue representar as variáveis testadas (d_i , h_i e v).

Na Tabela 13, estão as estatísticas de validação das equações testadas, com as quais selecionou-se para estimar as três variáveis dendrométricas.

Tabela 13- Estatística de validação para as três variáveis estimadas durante o processo de validação dos dados de *Araucaria angustifolia*, na região oeste do Estado de Santa Catarina.

Modelo	d_i			h_i			V		
	D*	SQER*	RP*	D*	SQER*	RP*	D*	SQER*	RP*
1	-0,3362	0,0133	-0,8484	0,0234	339,9348	439,4148	-0,0339	0,0583	-2,6059
2	-0,0107	0,0154	-1,4072	0,2149	169,1180	322,5212	-0,0072	0,038	1,4209
3	-0,1172	0,0206	-1,9871	-0,0525	63,5554	167,6612	-0,0146	0,1418	-2,0966
4	0,0287	0,0175	-1,5037	**	**	**	-0,0079	0,0926	2,6128
5	-0,3487	0,0142	-0,9807	-0,1816	0,5404	-0,6215	-0,0186	0,0735	0,9349
6	-0,3560	0,0111	-0,5020	-0,2003	1,2829	5,3262	-0,0193	0,0736	0,8516
7	-0,3780	0,0234	-1,0052	-0,1931	50,5425	188,9462	-0,029	0,076	-0,5919
8	-0,3819	0,0140	-1,8241	-0,2116	0,1549	-5,2362	-0,0194	0,0745	0,8458
9	-0,4425	0,0156	-3,1213	-0,7883	11,7619	-70,0063	-0,0213	0,0714	0,5029
10	-0,4004	0,0133	-2,4725	-0,2368	0,4977	-0,6922	-0,0204	0,0696	0,5649
11	-0,3834	0,0154	-2,8452	-0,1824	0,3104	-1,0249	-0,0174	0,0737	1,0993
12	-0,6442	0,0503	-3,3834	-0,0730	2,8908	15,8164	-0,015	0,0768	1,4592
13	-0,0751	0,0116	-0,3151	-0,1070	2,0164	11,7832	0,0004	0,0028	0,2318

Continua..

Continuação...

Tabela 13- Estatística de validação para as três variáveis estimadas durante o processo de validação dos dados de *Araucaria angustifolia*, na região oeste do Estado de Santa Catarina.

Modelo	d_i			h_i			V		
	D*	SQER*	RP*	D*	SQER*	RP*	D*	SQER*	RP*
14	-0,1128	0,0122	-1,5331	-0,1471	0,1457	-4,9396	0,0041	0,0026	0,3859
15	0,3920	0,0428	4,6746	0,0067	200,3761	360,2926	-0,0013	0,1446	-3,4985
16	-0,0894	0,0124	-0,8540	-0,0603	74,3605	183,8578	-0,0135	0,0276	-1,5449
17	-0,4676	0,0167	-3,3643	-0,0106	57,2412	169,1205	-0,0227	0,0754	0,3966
18	-0,3360	0,0117	-1,6217	-0,0416	36,4914	126,6407	-0,0191	0,0761	0,9302
19	-0,1918	0,0144	-2,4361	-0,1696	0,1184	-5,6071	0,0006	0,0155	-0,4722

Em que: d_i = Diâmetro ao longo do tronco estimado; h_i = Altura ao longo do tronco estimada; v = volume estimado; D = Desvio (cm); SQER = Soma de Quadrados do Erro Relativo; RP = Resíduo Porcentagem.

* Valores pequenos são melhores.

**Equação não se ajustou aos dados.

Fonte: produção do próprio autor

Na análise dos dados de validação por variável estimada, se pode perceber que dois grupos obtiveram melhores estatísticas para as três variáveis, sendo que para o diâmetro (d_i) e volume (v_i) foram as equações de forma variável, e para a variável altura (h_i) o grupo das equações trigonométricas foram superiores.

Na Tabela 13, se nota que para os diâmetros o grupo de equações que se destacou foram as equações de forma variável, sendo que das três estatísticas de validação elas foram superiores em duas, sendo elas o Desvio (D) e o Resíduo Percentagem (RP). Porém, para a Soma de Quadrado do Erro Relativo (SQER) as equações trigonométricas se destacaram. A equação que teve destaque como a mais acurada e com menor valor ponderado (Tabela 14), foi a equação 13, modelo descrito por Lee et al. (2003), a qual foi a melhor equação entre todas. Os piores resultados das três estatísticas de validação para estimativa de diâmetros (d_i) ao longo do tronco foi o grupo das equações segmentadas.

Para a estimativa da variável altura (h_i), o grupo de equações de melhor desempenho nas estimativas pelas estatísticas da validação foram as equações segmentadas (Tabela 13), a qual foi superior em duas, na Soma de Quadrado do Erro Relativo (SQER) e Resíduo Porcentagem (RP), e para o Desvio (D) o grupo de equações que se destacou foram as Exponenciais. Porém a equação que se destacou nesta variável foi a equação 14, modelo este desenvolvido por Kozak (1988), com maior valor ponderado (Tabela 14), a qual está situada dentro do grupo das equações de forma variável. A equação com pior acurácia para estimativa das alturas em diferentes pontos do tronco foi a equação 2, desenvolvida por Ormerod (1973), sendo a com maior valor ponderado.

Para variável volume o grupo de equações que se destacaram foram as equações do grupo segmentadas, obtendo uma média melhor dos valores ponderados (Tabela 15), porém em nem uma das estatísticas as equações foram melhores (Tabela 13). Para esta variável a equação que se destacou como melhor foi a equação 13, descrita por Lee et al. (2003), a qual segundo o autor é derivada da equação de Kozak (1988), equação esta pertencente ao grupo das equações de forma variável.

Na Tabela 14 são apresentadas as pontuações obtidas de cada modelo em cada estatística testada para a três variáveis testadas (d_i , h_i e v).

Tabela 14 - Resultado dos valores ponderados para as estatísticas de validação das equações de estimativa de diâmetros ao longo do tronco, alturas ao longo do tronco e volumes do tronco de *Araucaria angustifolia* na região oeste do Estado de Santa Catariana.

Modelo	d_i			h_i			v			VP*
	D	SQER	RP	D	SQER	RP	D	SQER	RP	
1	9	6	3	3	18	18	19	6	17	99
2	1	11	7	16	16	16	5	5	13	90
3	6	16	12	5	14	12	8	18	16	107
4	2	15	8	**	**	**	6	17	18	123
5	10	9	5	11	6	1	11	9	11	73
6	11	1	2	14	7	6	13	10	9	73
7	12	17	6	13	12	15	18	14	7	114
8	13	8	11	15	3	5	14	12	8	89
9	17	13	16	18	10	10	16	8	5	113
10	16	7	14	17	5	2	15	7	6	89
11	14	12	15	12	4	3	10	11	12	93
12	19	19	18	7	9	9	9	16	14	120

Continua..

Continuação...

Tabela 14 - Resultado dos valores ponderados para as estatísticas de validação das equações de estimativa de diâmetros ao longo do tronco, alturas ao longo do tronco e volumes do tronco de *Araucaria angustifolia* na região oeste do Estado de Santa Catarina.

Modelo	d_i			h_i			v			VP*
	D	SQER	RP	D	SQER	RP	D	SQER	RP	
13	3	2	1	8	8	8	1	2	1	34
14	5	4	9	9	2	4	4	1	2	40
15	15	18	19	1	17	17	3	19	19	128
16	4	5	4	6	15	14	7	4	15	74
17	18	14	17	2	13	13	17	13	3	110
18	8	3	10	4	11	11	12	15	10	84
19	7	10	13	10	1	7	2	3	4	57

Em que: di = Diâmetro estimado; hi = Altura estimada; v = volume estimado; D = Desvio (cm); SQER = Soma de Quadrados do Erro Relativo; RP = Resíduo Porcentagem.

* Valores pequenos são melhores.

**Equação não se ajustou aos dados.

Fonte: produção do próprio autor.

Portanto ao analisar o valor ponderado (VP), na Tabela 14, se pode concluir que o modelo 13, descrito por Lee et al. (2003), dentro do grupo das equações de forma variável, foi a equação que obteve maior acurácia quando somado as três variáveis que se desejavam as estimativas, ou seja, nas estimativas dos Diâmetros ao longo do tronco, nas estimativas de alturas em diferentes diâmetros e na estimativa dos volumes totais dos troncos. Na sequência tem a equação 14, modelo descrito por Kozak (1988), equação esta que também pertence ao grupo das equações de Forma Variável. E como terceira melhor equação temos a equação 19, modelo este descrito por Bi (2000), equação que pertence ao grupo das equações Trigonométricas.

As três melhores equações estão representadas na Tabela 15, onde os modelos foram descritos na sua forma original, com todas as suas variáveis independentes e os respectivos coeficientes ajustados.

Tabela 15 – Representação das melhores equações com seus respectivos coeficientes para estimativa do diâmetro (d_i), altura (h_i) e volume (v), de *Araucaria angustifolia*, na região oeste do Estado de Santa Catarina.

Autor	Equação
Lee et al. (2003)	$d_i = \left[1,377434 * DAP^{0,9435} * \left(1 - \left(\frac{h_i}{h} \right) \right)^{1,47887 * \left(\frac{h_i}{h} \right)^2 - 2,2491 * \left(\frac{h_i}{h} \right) + 1,34374} \right]$
Kozak (1988)	$d_i = \left[0,9151 * DAP^{1,0349} * 0,9991^{DAP} * \left[\frac{1 - \sqrt{\left(\frac{h_i}{h} \right)}}{1 - \sqrt{\left(\frac{1,3}{h} \right)}} \right]^{-0,2565 * \left(\frac{h_i}{h} \right)^2 + 0,0079 * \ln \left(\left(\frac{h_i}{h} \right) + 0,001 \right) - 1,0420 * \sqrt{\left(\frac{h_i}{h} \right)} + 0,6018 * e^{\left(\frac{h_i}{h} \right)} + 0,0615} \right]$

$$\text{Bi}_{(2000)} = \frac{d_i}{DAP} = \left[\begin{array}{l}
 \left[\frac{\left(\ln \left(\sin \frac{\pi}{2 * \left(\frac{h_i}{h} \right)} \right) \right)^{\left(0,4309 + \left(-0,1885 * \sin \frac{\pi}{2 * \left(\frac{h_i}{h} \right)} \right) \right)}}{\left(\ln \left(\sin \frac{\pi}{2 * \frac{1,3}{h}} \right) \right)} + \left(0,0046 * \cos \left(3 * \left(\frac{\pi}{2 * \left(\frac{h_i}{h} \right)} \right) \right) \right) + \right. \\
 \left. -0,1437 * \sin \left[\left(\frac{\pi}{\left(2 * \left(\frac{h_i}{h} \right) \right)} \right) \right] \right] + (-0,0006 * DAP) + \left(0,0228 * \left(\frac{h_i}{h} \right) * \sqrt{DAP} \right) + \left(0,0047 * \left(\frac{h_i}{h} \right) * \sqrt{h} \right)
 \end{array} \right]$$

Em que: d_i = Diâmetros ao longo do tronco; h_i = Altura ao longo do tronco; DAP = Diâmetro a 1,3m; h = Altura total do tronco;

\ln = Logaritmo neperiano; \sin = Seno; \cos = Cosseno; π = Constante PI (3,1416).

Fonte: produção do próprio autor.

4.6 TESTE DE VALIDAÇÃO QUANTO AS ESTIMATIVAS DE DIÂMETRO (d_i), ALTURA (h_i) E VOLUME (v)

Na Tabela 16, estão apresentados os resultados do teste do qui-quadrado (χ^2) calculados para o nível de probabilidade de confiança de 95%, bem como os graus de liberdade para cada variável estimada.

Os valores tabelados foram comparados com os valores calculados. Se o $\chi^2_{\text{calculado}}$ for menor que o χ^2_{tabelado} , se aceita a hipótese de que o modelo de afilamento utilizado para a estimativa é acurado e pode ser utilizado para gerar estimativas.

Os valores de $\chi^2_{\text{calculado}}$ foram inferiores aos valores de χ^2_{tabelado} , para o nível de probabilidade de confiança de 95%. Portanto, todos os modelos validados podem ser usados nas estimativas dos diâmetros (d_i), alturas (h_i) e volumes (v).

Todos os modelos apresentaram valores significativos no teste de qui-quadrado sendo que todos poderiam ser utilizados para os ajustes, exceto o modelo 4, o qual não apresentou ajuste para as estimativas de alturas inferiores a 1,3m. Portanto os modelos apesar de terem apresentados ajustes satisfatórios na maioria dos critérios estatísticos analisados no computo geral foram inferiores as estatísticas dos modelos 13, 14 e 19, descritos por Lee et al. (2003), Kozak (1988) e Bi (2000), respectivamente. Sendo estes indicados para fazer as estimativas dos diâmetros (d_i) ao longo do tronco, alutaras (h_i) ao longo do tronco em diferentes diâmetros e dos volumes (v).

Tabela 16 – Teste de qui-quadrado para validação das equações de afilamento quanto as suas estimativas de diâmetros (di) ao longo do tronco, alturas (hi) ao longo do tronco e dos volumes (v) do tronco, para *Araucaria angustifolia*, no oeste do estado de Santa Catarina.

Equação	d _i (556 GL)		h _i (556 Gl)		v (32 Gl)	
	χ^2 calculado	χ^2 tabelado	χ^2 calculado	χ^2 tabelado	χ^2 calculado	χ^2 tabelado
1	105,9465 ^{ns}	611,9637	463,9007 ^{ns}	611,9637	0,0751 ^{ns}	46,1943
2	80,8413 ^{ns}	611,9637	336,2792 ^{ns}	611,9637	0,0210 ^{ns}	46,1943
3	81,2148 ^{ns}	611,9637	247,1478 ^{ns}	611,9637	0,0228 ^{ns}	46,1943
4	101,0821 ^{ns}	611,9637	s	s	0,0351 ^{ns}	46,1943
5	89,6713 ^{ns}	611,9637	122,2507 ^{ns}	611,9637	0,0483 ^{ns}	46,1943
6	77,6167 ^{ns}	611,9637	132,5080 ^{ns}	611,9637	0,0496 ^{ns}	46,1943
7	121,3020 ^{ns}	611,9637	338,4048 ^{ns}	611,9637	0,0729 ^{ns}	46,1943
8	78,2351 ^{ns}	611,9637	226,7353 ^{ns}	611,9637	0,0502 ^{ns}	46,1943
9	68,0443 ^{ns}	611,9637	421,2152 ^{ns}	611,9637	0,0530 ^{ns}	46,1943
10	66,2303 ^{ns}	611,9637	110,6824 ^{ns}	611,9637	0,0502 ^{ns}	46,1943
11	66,9184 ^{ns}	611,9637	334,2971 ^{ns}	611,9637	0,0456 ^{ns}	46,1943
12	110,0403 ^{ns}	611,9637	104,5397 ^{ns}	611,9637	0,0420 ^{ns}	46,1943
13	74,8943 ^{ns}	611,9637	119,1250 ^{ns}	611,9637	0,0023 ^{ns}	46,1943

Continua..

Continuação...

Tabela 16 – Teste de qui-quadrado para validação das equações de afilamento quanto as suas estimativas de diâmetros (d_i) ao longo do tronco, alturas (h_i) ao longo do tronco e dos volumes (v) do tronco, para *Araucaria angustifolia*, no oeste do estado de Santa Catarina.

Equação	d_i (556 GL)		h_i (556 GI)		v (32 GI)	
	χ^2 calculado	χ^2 tabelado	χ^2 calculado	χ^2 tabelado	χ^2 calculado	χ^2 tabelado
14	59,2076 ^{ns}	611,9637	89,3735 ^{ns}	611,9637	0,0027 ^{ns}	46,1943
15	587,6431 ^{ns}	611,9637	529,3779 ^{ns}	611,9637	0,0485 ^{ns}	46,1943
16	79,7288 ^{ns}	611,9637	262,1079 ^{ns}	611,9637	0,0156 ^{ns}	46,1943
17	72,2243 ^{ns}	611,9637	217,7799 ^{ns}	611,9637	0,0577 ^{ns}	46,1943
18	66,9726 ^{ns}	611,9637	192,2307 ^{ns}	611,9637	0,0501 ^{ns}	46,1943
19	61,8416 ^{ns}	611,9637	102,2802 ^{ns}	611,9637	0,0055 ^{ns}	46,1943

Em que: d_i = Diâmetros ao longo do tronco; h_i = Altura ao longo do tronco; v = Volume do tronco;

^{ns}: Não significativo ao nível de 5%,

^s: Significativo ao nível de 5%.

Fonte: produção do próprio autor.

4.7 VOLUME DOS SORTIMENTOS PARA *Araucaria angustifolia* POR CLASSE DE DIÂMETRO

O sortimento foi feito para cada classe de diâmetro em três diferentes alturas, a mesma representada na Tabela 1. Na Figura 7, são apresentadas as quantificações do volume em porcentagem para cada sortimento, sendo estes caracterizados e definidos previamente (serraria, escora e lenha). Cabe ressaltar que esses valores resultam de uma análise específica do tronco da árvore média de cada classe de diâmetro.

Percebe-se na Figura 7, na classe de diâmetro 11cm e nas três classes de altura, mais de 80% do volume total dos indivíduos tem potencial para ser destinado a Celulose e 15 - 20% tem como destino a Energia e Biomassa. Na classe de 17cm, para Energia o valor diminui passando para uma média de 3,64%, a porcentagem destinada a Celulose tem um aumento passando a ter uma média de 96,36% do volume, sendo na classe de altura de 11,8m é onde tem a maior porcentagem de volume com possível destinação a Celulose e na classe de altura de 17,8m onde tem um menor valor em relação a porcentagem do volume total médio do tronco destinado a Celulose. Estas duas classes apresentadas são de diâmetros pequenos, as quais não apresentam grande lucratividade ao produtor.

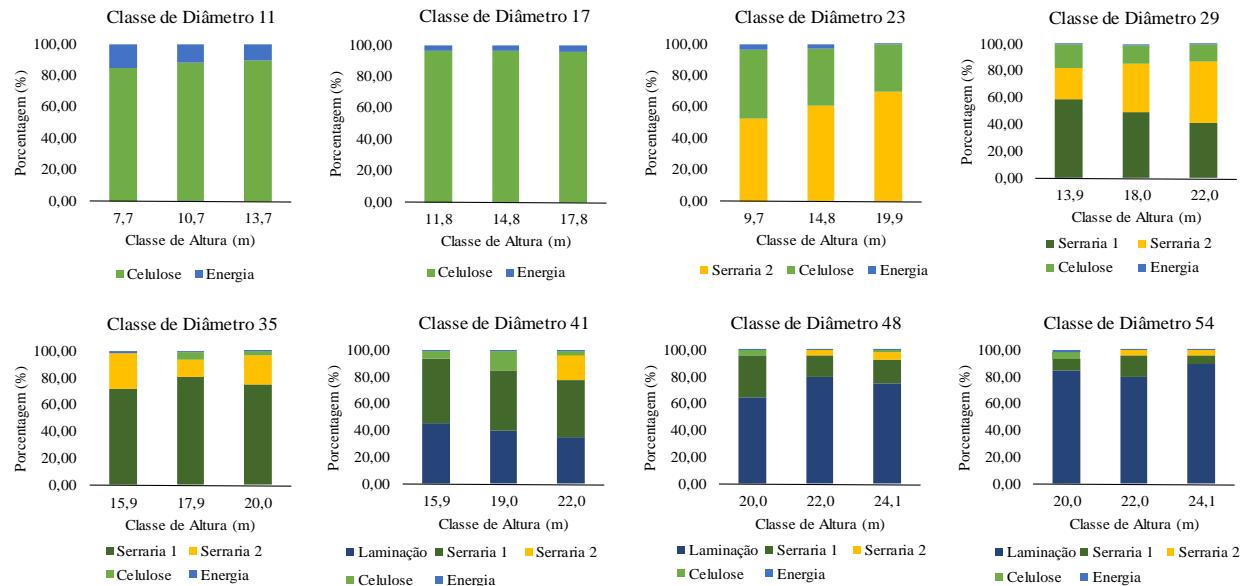
Na classe diamétrica de 23cm, percebesse a grande diminuição na porcentagem média do volume destinada a Celulose (36,98%) e Energia (2,01%), sendo que aproximadamente 61,01% do volume médio da classe já pode ser comercializada como tora para Serraria 2, onde o produtor pode ter uma maior lucratividade. Na classe de 29cm, os volumes de madeira média destinada a Energia são de 0,31%, Celulose 14,81%, Serraria 2 34,97% e Serraria 1 49,90%. Esta classe foi

considerada como uma classe com diâmetros intermediários, variando de 20,5cm à 31cm de DAP.

A confecção de uma tabela de sortimento de madeira para determinada espécie é de fundamental importância para o planejamento da empresa e/ou produtor florestal. Visto que os produtores sempre visam ao lucro, sendo normalmente nas classes de diâmetros maiores onde os troncos apresentam a sua porção com maiores valores agregados.

Sendo assim na classe 35cm de diâmetro percebe-se que 75,66% do volume do tronco pode ser destinada para Serraria 1, 20,68% é destinada a Serraria 2. Na classe 35cm de diâmetro, quando realizado o sortimento de madeira destinada a celulose, se pode perceber que para a classe de altura 15,9m não tem valor relativo ao sortimento de madeira destinada a Celulose, fato este que não houve comprimento mínimo exigido pela indústria compradora. Portanto, encontram-se valores médios relativos apenas para as outras duas classes, sendo o valor médio igual a 4,18% destinado a Celulose e aproximadamente 0,88% do volume é destinado a Biomassa e Energia.

Figura 4 - Gráfico representativo dos sortimentos realizados para as classes de diâmetros em diferentes classes de altura de *Araucaria angustifolia*, na região oeste do estado de Santa Catarina



Fonte: produção do próprio autor.

A classe 41cm de diâmetro tem o surgimento da madeira destinada a Laminação e em média 39,91% do volume total dos troncos podem ser destinados a Laminação, para Serraria 1 em média aproximadamente 45,37%. Porém, para Serraria 2, devido à falta de medidas nas classes de altura de 15,9m e 19m, apenas a classe de altura de 22m obteve como volume relativo como possível destino o sortimento de Serraria 2 com volume relativo de 18,63%, e como destinos menos lucrativos tem-se 7,64% do volume total do tronco destinado a Celulose e 0,83% do volume relativo destinado a Biomassa e Energia.

Para a classe 48 de diâmetros se nota um aumento considerável no volume de madeira destinada a Laminação com valor médio de 73,21%, uma redução da madeira destinada a Serraria 1 com 21,89%, Serraria 2 com 3,10%, e para as partes dos troncos menos valorizada tem uma porcentagem de 2,42% para Celulose, sendo que esta classe não teve madeira devido à falta de características dendrométricas na classe de altura de 22m, podendo se dizer o mesmo para madeira destinada a Biomassa e Energia com 0,19% de volume relativo.

Analizando a classe 54, pode-se perceber que é onde apresenta a maior proporção do volume destinada a Laminação com valor médio de aproximadamente 84,83%, para Serraria 1 valor médio de aproximadamente 10,55% do tronco, Serraria 2 3,60% do tronco, sendo que no sortimento destinado a Serraria 2 a classe de altura de 20m não teve produção devido à falta de características dendrométricas. Ainda na classe de 20m de altura, 4,88% do tronco é destinada para Celulose, sendo que as outras duas classes de altura (22m e 24,1m), não possuem características dendrométricas que se enquadrem no sortimento e para

Biomassa e Energia temos um valor médio de aproximadamente 0,59% do volume total de cada classe de altura.

Na tabela 17, são apresentados os volumes absolutos dos sortimentos dentro de cada classe de Diâmetro, onde percebe-se que nas classes 11, 17, 23 e 19 e 35 não são observados volumes destinados a Laminação. Nas classes 11, 17 e 23 não se obteve valores de volume para Serraria 1. Para a classe 11 e 17 não é registrado volume para Serraria 2, ficando única e exclusivamente destinada a Celulose e Energia.

Tabela 17 – Distribuição dos volumes reais para cada sortimento dentro de cada classe de diâmetro e para três diferentes classes de altura para *Araucaria angustifolia*, na região oeste do estado de Santa Catarina.

Classe de Diâmetro	Altura (cm)	Volume Sortimento (m ³)										Volume Total (m ³)		
		Total (m)	Laminação		Serraria 1		Serraria 2		Celulose		Energia			
		v (m ³)	NT	v (m ³)	NT	v (m ³)	NT	v (m ³)	NT	v (m ³)	NT			
11,0	7,7							0,0384	2	0,0070	1	0,0454		
	10,7							0,0562	3	0,0074	1	0,0636		
	13,7							0,0740	4	0,0083	2	0,0824		
17,0	11,8							0,1542	4	0,0055	1	0,1597		
	14,8							0,1938	5	0,0072	1	0,2011		
	17,8							0,2343	6	0,0095	1	0,2438		
23,0	9,7			0,1218	1	0,1017	2	0,0077	1			0,2312		
	14,8			0,2340	2	0,1411	3	0,0098	1			0,3849		
	19,9			0,3339	3	0,1455	4	0,0008	1			0,4801		

Continua..

Continuação...

Tabela 17 – Distribuição dos volumes reais para cada sortimento dentro de cada classe de diâmetro e para três diferentes classes de altura para *Araucaria angustifolia*, na região oeste do estado de Santa Catarina.

Classe de Diâmetro	Altura (cm)	Volume Sortimento (m ³)										Volume Total (m ³)
		Laminação		Serraria 1		Serraria 2		Celulose		Energia		
		Total (m)	v (m ³)	NT	v (m ³)	NT	v (m ³)	NT	v (m ³)	NT	v (m ³)	NT
29,0	13,9		0,3062	2	0,1183	1	0,0913	2	0,0011	1	0,5168	
	18,0		0,3265	2	0,2439	2	0,0927	2	0,0049	1	0,6680	
	22,0		0,3420	2	0,3747	3	0,1062	3	0,0001	1	0,8229	
35,0	15,9		0,6081	3	0,2260	2		0	0,0106	1	0,8447	
	17,9		0,7696	4	0,1239	1	0,0529	1	0,0115	1	0,9579	
	20,0		0,7993	4	0,2392	2	0,0304	1	0,0021	1	1,0710	
41,0	15,9	0,5169	1	0,5487	3		0	0,0649	1	0,0081	1	1,1386
	19,0	0,5371	1	0,6213	4		0	0,1892	2	0,0161	1	1,3638
	22,0	0,5527	1	0,6702	4	0,2963	1	0,0529	1	0,0095	1	1,5817

Continua..

Continuação...

Tabela 17 – Distribuição dos volumes reais para cada sortimento dentro de cada classe de diâmetro e para três diferentes classes de altura para *Araucaria angustifolia*, na região oeste do estado de Santa Catarina.

Classe de Diâmetro	Altura (cm)	Volume Sortimento (m ³)										Volume Total (m ³)
		Laminação		Serraria 1		Serraria 2		Celulose		Energia		
		Total (m)	v (m ³)	NT	v (m ³)	NT	v (m ³)	NT	v (m ³)	NT	v (m ³)	NT
48,0	20,0	1,2461	2	0,6165	3	0,0000	0	0,0644	1	0,0069	1	1,9340
	22,0	1,7003	3	0,3495	2	0,0764	1		0	0,0034	1	2,1296
	24,1	1,7518	3	0,4044	2	0,1329	1	0,0351	1	0,0010	1	2,3252
54	20,0	2,0483	3	0,2179	2		0	0,1179	1	0,0312	1	2,4153
	22,0	2,1235	3	0,4364	2	0,0954	1		0	0,0043	1	2,6596
	24,1	2,6200	4	0,1811	1	0,1055	1		0	0,0095	1	2,9161

Em que: v = Volume em metros cúbicos; NT = Número de toras por sortimento;

Fonte: produção do próprio autor.

Portanto pode-se concluir que nas classes de menor diâmetro a maior proporção da madeira é destinada aos sortimentos de Celulose e Energia enquanto os troncos de maior diâmetro apresentam maior aproveitamento no que diz respeito ao processamento para Laminacão, Serraria 1 e Serraria 2 apresentando um baixo volume destinado a resíduos para Energia e madeira destinada a Celulose.

5 CONCLUSÕES

Diante dos resultados obtidos pode-se concluir que:

- A validação das equações para estimativas de diâmetros (di) ao longo do tronco em diferentes alturas (hi), obteve os melhores resultados para o grupo de equações de forma variável.
- A equação que apresentou melhores valores estatísticos nos critérios de validação para as estimativas de diâmetros (di) ao longo do tronco, foi a equação descrita por Lee et al. (2003).
- Na validação para a estimativa das alturas (hi) as equações trigonométricas tiveram um melhor desempenho.
- A equação desenvolvida por Kozak (1988) foi a que apresentou melhor valor ponderado (VP) para as estatísticas de validação.
- Na estimativa dos volumes totais (v) dos troncos o grupo de equações que se destacou foram as equações de forma variável.
- Como melhor equação para estimativa de volume (v) a equação que teve seu melhor desempenho e maior acurácia quanto aos critérios estatísticos avaliados foi a equação descrita por Lee et al. (2003).
- Para as estimativas das três variáveis diâmetro (di), altura (hi) e Volume (v), o grupo de equações que apresentou melhor desempenho foram as de forma variável, sendo as que apresentaram melhores resultados nos testes de validação.
- No teste de validação de qui-quadrado a um nível de 5% de significância para todas as variáveis estimadas apenas a equação de Forslund (1990), não apresentou valores significativos.
- Para a tabela de sortimento pode-se perceber a evolução do sortimento dentro das classes de diâmetros, sendo que indivíduos que

apresentam maiores dimensões apresentam maiores possibilidades de diversificar sua destinação.

6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ADAMS, J.W. 2005 Green weight, volume and taper equations for Virginia pine (*Pinus virginiana*) in the piedmont Region of North Carolina. 107 pp. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), North Carolina State University, 2007.

AMATEIS, R. L.; H. E. BURKHART. Tree volume and taper of Loblolly Pine varies by stand origin. **Southern Journal of Applied Forestry**, Bethesda, v.11, n.4, p. 185-189, 1987.

AMIDON, E. L. A general taper functional form to predict bole volume for five mixed-conifer species in California. **Forest Science**, Washington, v.30, n.1, p.166-171, 1984.

ANDRADE, V. C. L. Novos modelos de taper do tipo expoente-forma para descrever o perfil do fuste de árvores. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v.34, n.80, p.1-13, 2014.

ANGELO, H.; CASTRO, L. H. R.; HOSOKAWA, R. T.; KIRCHNER, F. F. Análise de componentes principais e função *spline* para definir a forma do tronco de *Pinus* tropicais. **Revista Floresta**, Curitiba, v. 25, n. 12, p. 55-67, 1995.

ASSIS, A. L.; SOARES, J. R. S.; MELLO, J. M.; OLIVEIRA, A. D. Avaliação de modelos polinomiais não segmentados na estimativa de

diâmetros e volumes comerciais de *Pinus taeda*. **Cerne**, Lavras, v.7, n.1, p.20-42, 2001.

ASSIS, A. L.; SOARES, J. R. S.; MELLO, J. M.; WEIMAR, F. A. OLIVEIRA, A. D. Comparação de modelos polinomiais segmentados e não segmentados na estimativa de diâmetros e volumes ao longo do fuste de *Pinus taeda*. **Cerne**, Lavras, v.7, n.1, p.20-42, 2001.

ASSMANN, E. **The principles of forest yield study**. New York, Pergamon Press. 506p, 1970.

AVERY, T.E.; BURKHART, H.E. **Forest Measurements**. 5th edn. McGraw-Hill, New York, NY, 456 pp., 2002.

BALDWIN JR, V. C.; FEDUCCIA, D. P. Compatible tree-volume and upper-stem diameter equations for plantation Loblolly Pines in the West Gulf region. **Southern Journal of Applied Forestry**, v. 15, n. 2, p. 92-97, 1991.

BALDWIN JR, V. C.; PETERSON, K. D.; CLARK III, A.; FERGUSON, R. B.; STRUB, M. R.; BOWER, D. R. The effects of spacing and thinning on stand and tree characteristics of 3-g-year-old Loblolly Pine. **Forest Ecology and Management**, Amsterdã, v.137, n.1-3, p. 91-102, 2000.

BARBOSA, H. V.; ROCHA, K. J.; FAVALESSA, C. M. C.; MÔRA, R.; LANSSANOVA, L. R. sortimentos de *tectona grandis* l.f. no município de Nossa Senhora do Livramento, Mato Grosso.. In: CONGRESSO

FLORESTAL DO PARANÁ, 4., 2012, Curitiba. **Anais...**
http://malinovski.com.br/CongressoFlorestal/Arquivos_HTML/4-Trabalhos-04.htm, 2012.

BEHRE, C. E. Preliminary notes on studies of tree form. **Journal of Forestry**, v.21, 507-511, 1923.

BENBRAHIM, M.; GAVALAND, A. A new stem taper function for short-rotation poplar. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v.18, p.377-383, 2003.

BI, H. Trigonometric variable-form taper equations for Australian Eucalyptus. **Forest Science**, Washington, v. 46, n.3, p. 397-407, 2000.

BI, H.; LONG, Y. Flexible taper equation for site-specific management of *Pinus radiata* in New South Wales, Australia, **Forest Ecology and Management**. n. 148, p. 79-92, 2001.

BING, G. S. Taper equations for second-growth mixed conifers of Northern California. **Forest Science**, Washington, v.30, n.4, p. 1103-1117, 1984.

BORGES, J. F. **Seccionamento, do fuste de *Pinus taeda* L. para obtenção do volume de madeira serrada, através da função de forma polinomial.** 91f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1981.

BROOKS, J.R.; JIANG, L.; OZÇELIK, R. Compatible stem volume and taper equations for Brutian pine, Cedar of Lebanon, and Cilicica fir in Turkey. **Forest Ecology and Management.** n. 256, pp. 147–151. 2008.

BRUCE, D.; CURTIS, R. O.; VANCOEVERING, C. Development of a system of taper and volume tables for Red Alder. **Forest Science**, Washington, v.14, n.3, p.339-350, 1968.

BURGER; D.; MACHADO, A.S.; HOSOKAWA, R.T.; Estudo do desenvolvimento da forma de Araucaria angustifolia com relação a idade. In: Anais do Encounter da International Union for Forestry Research Organization (IUFRO); 1979; Curitiba. Curitiba: IUFRO; 1980. p. 320-329.

BYRNE, J. C.; REED, D. D. Complex compatible taper and volume estimation systems for Red and Loblolly Pine. **Forest Science**, Washington, v.32, n.2, p.423-443, 1986.

CAMPOS, B. P. F.; BINOTI, D. H. B.; SILVA, M. L.; LEITE, H. G.; BINOTI, M. L. M. S. Conversão de árvores em multiprodutos da madeira utilizando programação inteira. **Revista Árvore**, Viçosa, v.37, n.5, p.881-887, 2013.

CAMPOS, B. P. F.; BINOTI, D. H. B.; SILVA, M. L.; LEITE, H. G.; BINOTI, M. L. M S. Efeito do modelo de afilamento sobre a conversão de fustes de árvores em muliprodutos. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, v. 42, n. 104, p. 513-520, dez. 2014.

CAMPOS, J. C. C. et al.; Variação da forma do fuste de clones de Eucalyptus. In: CONGRESSO FLORESTAL BRASILEIRO, 7., CONGRESSO FLORESTAL PANAMERICANO, 1., Curitiba, **Anais...**Curitiba: SBS/SBEF,1993. v. 2, p. 559-565, 1993.

CANCINO, J. **Dendrometría Básica**. Dirección de Docencia. Universidad de Concepción,171p., 2006.

CAO, Q. V.; BURKHART, H. E.; MAX, T. A. Evaluating of two methods for cubic-volume prediction of Loblolly Pine to any merchantable limit. **Forest Science**, Washington, v.26, n.1, p.71-80, 1980.

CAO, Q.V. Calibrating a segmented taper equation with two diameter measurements. **Southern Journal of Applied Forestry**. v. 33, n. 2 p.58–61, 2009.

CAO, Q.V.; WANG, J. Calibrating fixed- and mixed-effects taper equations. **Forest Ecology and Management**. Amisterdã, v. 262 n. 4, p.671–673, 2011.

CASTEDO-DORADO, F.; ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J.G. Construcción de una tarifa de cubicación con clasificación de productos para Pinus radiata D. Don en Galicia basada en una función de perfil del tronco. **Investigación Agraria. Sistemas y Recursos Forestales**, Madrid, v.9, n.2, p. 253–268, 2000.

CLARK III, A.; SOUTER, R. A.; SCHLAEDEL, B. E. **Stem profile equations for southern tree species** (Research Paper SE-282). USDA Forest Service, 113p., 1991.

CLUTTER, J.L.; FORTSON, J.C.; PIENAAR, L.V.; BRISTER, G.H.; BAILEY, R.L. **Timber Management: A Quantitative Approach**. John Wiley & Sons, New York, NY, 333 p; Commission, Edinburgh, 66 pp., 1983.

CONCEIÇÃO, M. B. **Comparação de métodos se estimativa de volume em diferentes idades em plantações de *Eucalyptus grandis* HILL. EX – MAIDEN**. 144p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal), Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2004.

COSTA, E. A.; FINGUER, C. A.; SCHNEIER, P. R.; MÜLLER, I.; Approximation of numerical integration applied to *Araucaria angustifolia* stem taper models. **Floresta**, Curitiba, v. 45, n. 1, p. 31-40, 2015.

DEMAERSCHALK, J. P. Converting volume equations to compatible taper equations. **Forest Science**, Washington, v.18, n.3, p.241–245, 1972.

DEMAERSCHALK, J. P. Integrated systems for the estimation of tree taper and volume. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v.3, n.1, p.90–94, 1973.

DEMAERSCHALK, J. P.; KOZAK, A. The whole-bole system: a conditional dual-equation system for precise prediction of tree profiles. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v.7, n.3, p.488-497, 1977.

DIÉGUEZ-ARANDA, U.; CASTEDO-DORADO, F.; ÁLVAREZ-GONZÁLEZ, J. G.; ROJO, A. Compatible taper function for Scots pine plantations in Northwestern Spain. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v.36, n.5, p.1190–1205, 2006.

EISFELD, R.L.; MELLO, A.A.; SANQUETTA. C.R.; WEBER. K.S. Avaliação de modelos polinomiais na estimativa de volume total e por sortimento de *Pinus taeda*. **Brasil Florestal**, Brasília, n.79, p.9-15, 2004.

FANG, Z.; BORDERS, B. E.; BAILEY, R L. **Tree volume and upper-stem diameter predictions for planted Loblolly and Slash Pine based on a compatible volume-taper system with segmented-stem form factors** (PMRC Technical Report 1999-3), 20p., 1999.

FAVALESSA, C. M. C. **Funções de afilamento segmentadas e não segmentadas para povoamentos de *Tectona grandis* L.f. no município de Rosário Oeste – MT.** 108f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais e Ambientais) – Universidade Federal de Mato Grosso, Cuiabá, 2011.

FERREIRA, M.Z. **Estudo de funções de afilamento para representar o perfil e o volume do fuste de *Pinus taeda* L.** 2004. 196p. Dissertação

(Mestrado em Engenharia Florestal). – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.

FERREIRA, S. O. **Estudo da forma do fuste de *Eucalyptus grandis* e *Eucalyptus cloeziana*.** 1999. 112 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

FIGUEIREDO FILHO, A. **Influência da resinagem no crescimento de *Pinus elliottii* Engelm. var. *elliotti* e sua avaliação econômica.** 155f. Tese (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1991.

FIGUEIREDO FILHO, A.; BORDERS, B. E.; HITCH, K. L. Numbers of diameters required to represent stem profiles using interpolated cubic splines. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v.26, n.7, p.1113-1121, 1996b.

FIGUEIREDO FILHO, A.; BORDERS, B. E.; HITCH, K. L. Taper equations for *Pinus taeda* in Southern Brazil. **Forest Ecology and Management**, Amsterdã, v.83, n.1, p. 39-46, 1996a.

FIGUEIREDO FILHO, A.; KOHLER, S. V.; FELDE, J. L.; DIAS, A. N. Dinâmica do afilamento do tronco e da produção de madeira em plantios de *Araucaria angustifolia*. **Cerne**, Lavras, v.20, n.4, p.595-603, 2014.

FIGUEIREDO FILHO, A.; SCHAAF, L. B. Comparison between predicted volumes estimated by taper equations and true volumes

obtained by the water displacement technique (Xylometer). **Canadian Journal of Forest Research**, Canadá, v. 29, p. 451-461, 1999.

FIGUEIREDO, E. O.; SCOLFORO, J.R.S.; OLIVEIRA, A. D. Seleção de modelos polinomiais para representar o perfil e volume do fuste de *Tectona grandis* L.f. **Acta Amazonica**, v.36, n.4, p.465-482, 2006.

FINGER, C. A. G. **Fundamentos de biometria florestal**. Santa Maria. UFSM. CEPEF-FATEC. 269. p. 1992.

FINGER, C. A. G.; ZANON, M. L. B.; SCHNEIDER, P. R.; KLEIN, J. E. M.; COELHO, M. C. B. Funções de forma para *Eucalyptus dunnii* Maiden implantados na depressão central e encosta do sudeste do Rio Grande do Sul. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.25, n.3, p.399-403, 1995.

FISCHER, F.; **Eficiência dos modelos polinomiais e das razões de volume na estimativa volumétrica dos sortimentos e do perfil do fuste de *Pinus taeda***. Dissertação de Mestrado, Universidade Federal de Lavras, Lavras, Minas Gerais. 167 p. 1997.

FISCHER, F.; SCOLFORO, J. R. S.; ACERBI JUNIOR, F. W.; MELLO, J. M.; MAESTRI, R. Exatidão dos modelos polinomiais não segmentados e das razões entre volumes para representar o perfil do tronco de *Pinus taeda*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.11, n.1, p.167-188, 2001.

FONWEBAN, J.; GARDINER, B.; MACDONALD, E.; AUTY, D. Taper functions for Scots pine (*Pinus sylvestris*, L.) and Sitka spruce

(*Picea sitchensis* (Bong.) Carr.) in Northern Britain. **Forestry**. v. 84, 49–60, 2011.

FORSLUND, R. R. A geometrical tree volume model based on the location of the centre of gravity of the bole. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v.12, n.2, p.215-221, 1982.

FORSLUND, R. R. The power function as a simple stem profile examination tool. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v.21, n.2, p.193–198, 1991.

FRIEDL, R. A. **Dinâmica e prognose na forma dos fustes em povoamentos plantados de Araucaria angustifolia (Bert.) O. Ktze.** 167f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1989.

GARAY, L. **Tropical forest utilization system** (contrib. 36). VIII. A taper model for entire stem profile including buttressing. Seatlhe. Coll. Forest. Resour., Inst. Forest Prod. Univ. Wash., 64p., 1979.

GORDON, A. Comparison of compatible polynomial taper equations. **New Zealand Journal of Forestry Science**, Rotorua, v. 13, n. 2, p. 146-155, 1983.

GOULDING, C. J.; MURRAY, J. C. Polynomial taper equations that are compatible with tree volume equations. **New Zealand Journal of Forestry Science**, Tiergartenstr, v.5, n.3, p.313–322, 1976.

GRAY, H. R. **The form and taper of forest-tree stems** (Institute Paper n° 32). Imperial Forestry Institute, University of Oxford, Oxford, 80p, 1956.

GRAY, H. R. Volume measurement of forest crops. **Australian Forestry**, Canberra, v.7, n.1, p.48-74, 1943.

HONER, T. G. A new total cubic foot volume function. **Forestry Chronicle**, Mattawa, v.41, n.4, p.476-493, 1965.

HRADETZKY, J. **Analyze und interpretation statistisher abränger keisen.** (Biometrische Beiträge zu aktuellen forschuns projekten). Baden: Württemberg Mitteilungen der FVA, 146p., 1976.

HUANG, S.; PRICE, D.; MORGAN, D.; PECK, K. Kozak's variable exponent taper equation regionalized for white spruce in Alberta. **West J Appl For** v. 15, p.75–85, 2000.

HUSCH, B.; BEERS, T. W.; KERSHAW JR., J. A. **Forest mensuration.** 4.ed, Hoboken, New Jersey: John Wiley & Sons, 443p., 2003.

KOSLOWSKI, T. T. **Growth and development of trees.** Madison, Wisconsin: University of Wisconsin, v. 2., 1971.

KOZAK, A. A variable exponent taper equation. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v.18, n.11, p.1363-1368, 1988.

KOZAK, A. My last words on taper equations. **Forestry Chronicle**, Mattawa, v. 80, n. 4, p. 507-515, 2004.

KOZAK, A.; MUNRO D. D.; SMITH J. H G. Taper functions and their application in forest inventory. **Forestry Chronicle**, Ottawa, v.45, n.4, p.278-283, 1969.

LANSSANOVA, L. R.; UBIALLI, J. A.; ARCE, J. E.; PELISSARI, A. L.; FAVALESSA, C. M.; DRESCHER, R. Avaliação de funções de afilamento para a estimativa de diâmetro de espécies florestais comerciais do bioma amazônico mato-grossense. **Floresta**, Curitiba, v.43, n.2, p.215-224, 2013.

LAPPI, J. A multivariate, nonparametric stem-curve prediction method. **Canadian Journal of Forest Research**. v. 36, p. 1017–1027, 2006.

LARSON, P. R. Stem form development of forest trees. **Forest Science** (Monograph), Washington, p.1-41, 1963.

LE, R.; WEISKITEL, A. R.; Comparison of model forms for estimating stem taper and volume in the primary conifer species of the North American Acadian Region. **Annals of Forest Science**, Springer Verlag, v. 67, p. 302, 2009.

LEE, W. K.; SEO, J. H.; SON, Y. M.; LEE, K. H.; von GADOW, K. Modeling stem profiles for *Pinus densiflora* in Korea. **Forest Ecology and Management**, Amsterdã, v.172, n.1, p.69-77, 2003.

LEITE, H. G. **Conversão de fustes em multiprodutos de madeira, utilizando programação dinâmica**. 1994. 230 f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 1994.

LEITE, H. G. et al. Emprego de um modelo de programação dinâmica para conversão de fustes em multiprodutos da madeira. **Revista Árvore**, v. 19, n. 4, p. 447-465, 1995.

LIMA, F. **Análise de funções de “taper” destinadas à avaliação de multiprodutos de árvores de *Pinus elliottii***. Viçosa: UFV. 1986. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, 1986.

LOUREIRO, G. H.; CURTO, R. A.; ROSOT, N. C.; MARANGON, G. P. Avaliação de equações de afilamento em um plantio de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze utilizando o diâmetro como variável dependente. In: CONGRESSO FORESTAL DO PARANÁ, 4., 2012, **Anais...** Curitiba: SBS/SBEF, 2012.

MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A.; **Dendrometria**. Curitiba. 2003. 309 p

MACHADO, S. A; URBANO, E.; CONCEIÇÃO, M. B.; FIGUEIREDO FILHO, A. FIGUEIREDO, D. J. Comparação de modelos de afilamento do tronco para diferentes idades e regimes de desbaste em plantações de *Pinus oocarpa* Schiede. **Boletim de Pesquisa Florestal**, Colombo, n. 48, p. 41-64, jan./jun., 2004

MACHADO, S.A.; Influência da idade na forma do fuste de *Araucaria angustifolia* em plantações no Brasil. In: **Anais...** 5º Seminário sobre atualidades e perspectivas florestais: o uso de funções de forma de tronco em estudo de volumetria de espécies florestais; 1982; Curitiba. Curitiba: EMBRAPA; 1982. p. 51-55.

MATTE, L. The taper of coniferous species with special reference to Loblolly Pine. **Forestry Chronicle**, Mattawa, v.25, n.1, p.21-31, 1949.

MAX, T. A.; BURKHART, H. E. Segmented polynomial regression applied to taper equations. **Forest Science**, Washington, v.22, n.3, p.283-289, 1976.

MENDONÇA, A. R. Avaliação de funções de afilamento visando a otimização de fustes para multiprodutos. **Cerne**, Lavras, v.13, n.1, p.71-82, jan. /mar. 2007.

MÔRA, R. **Influência da forma de ajuste e do comprimento das seções no desempenho de funções de afilamento. 81 f. Dissertação** (Mestrado em Ciências Florestais) - Universidade Federal do Espírito Santo, Espírito Santo, 2011.

MÔRA, R.; SILVA, G. F.; GONÇALVES, F. G.; SOARES, C. P. B.; CHICHORRO, J. F.; CURTO, R. A. Análise de diferentes formas de ajuste de funções de afilamento. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v.42, n.102, p.237-249, 2014.

MUHAIRWE, C. K. **Examination and modelling of tree form and taper over time for interior Lodgepole Pine**. 192f. Thesis (Doctor of Philosophy in The Faculty of Graduate studies Forest Resources Management) - University of British Columbia, British, 1993.

MUHAIRWE, C. K. Taper equations for *Eucalyptus pilularis* and *Eucalyptus grandis* for the north coast in New South Wales, Australia. **Forest Ecology and Management**, Amsterdã, v.113, n.2-3, p.251-269, 1999.

MÜLLER, I. **Forma de tronco e sortimentos de madeira para Eucalyptus grandis hill ex Maiden., manejado em alto fuste, na região sudeste do estado do Rio Grande do Sul**. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal). Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2004.

MUNRO, D. D.; DEMAERSCHALK, J. P. Taper-based versus volume-based compatible estimating systems. **Forestry Chronicle**, Mattawa, v.50, n.5, p.197-199, 1974.

NEWBERRY, J.; BURKHART, H. E. Variable-form stem profile models for Loblolly Pine. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v.16, n.1, p.109–114, 1986.

NEWNHAM R.M. A variable-form taper function. Information Report PI-X-83. Petawawa National Forest Institute. **Canadian Forest Service**, Petawawa, Ontario, Canada, 1988.

NEWNHAM, R. M. Variable-form taper functions for four Alberta tree species. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v.22, n.2, p.210-223, 1992.

NOVO, N.; ROJO, A.; ÁLVAREZ, J. G. Funciones de perfil del tronco y tarifas de cubicación con clasificación de productos para *Pinus sylvestris* L. en Galicia. **Investigación Agraria: Sistemas y Recursos Forestales**, Madrid, v.12, n.1, p.

ORMEROD, D. W. A simple bole model. **Forestry Chronicle**, Ottawa, v.49, n.3, p.136–138, 1973.

ÖZÇELIK, R.; BROOKS, J.R.; JIANG, L. Modeling stem profile of Lebanon cedar, Brutian pine, and Cilicica fir in Southern Turkey using nonlinear mixed-effects models. **European Journal of Forest Research**. V. 130, n. 4, p.613–621, 2011.

PANDOLFO, C.; BRAGA, H. J.; SILVA JÚNIOR, V. P.; MASSIGNAM, A. M.; PEREIRA, E. S.; THOMÉ, V. M. R.; VALCI, F.

V. **Atlas climatológico digital do Estado de Santa Catarina.**
Florianópolis: Epagri, 2002. 1 (CD-ROM).

PARRESOL, B. R.; HOTVEDT, J. E.; CAO, Q. V. A volume and taper prediction system for bald cypress. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v.17, n.3, p.250259, 1987.

PEREZ, D. N.; BURKHART, H. E.; STIFF, C. T. A variable-form taper function for *Pinus oocarpa* Schiede in Central Honduras. **Forest Science**, Washington, v.36, n.1, p.186191, 1990.

PINHEIRO, J.C.; BATES, D.M. Approximations to the log-likelihood function in the nonlinear mixed effects model. **Journal of Agricultural Research** v. 4, pp. 12–35, 1995.

PRODAN, M. et al. **Mensura Forestal.** San José: IICA, 1997. 586p. (Investigacion y educacion en desarollo sostenible, v. 1).

QUEIROZ, D. **Avaliação de função de afilamento e sortimentos para *Mimosa scabrella* Bentham em povoamentos nativos da região metropolitana de Curitiba/PR.** 134f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2006.

RIOS, M. S. **A eficiência das funções polinomiais, da função spline cúbica, e razões de volume para representar o perfil da árvore estimar os sortimentos de *Pinus elliottii*.** 116 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal). Universidade Federal de Lavras, Lavras. 1997.

ROJO, A.; PERALES, X.; SÁNCHEZ-RODRÍGUEZ, F.; GONZÁLEZ-ALVAREZ J. G.; Von GADOW, K. Stem taper functions for maritime pine (*Pinus pinaster* Ait.) in Galicia (Northwestern Spain). **European Journal of Forest Research**, Dordrecht, v.124, n.3, p.177-186, 2005.

SAS Institute. The SAS System for Windows. **Cary**: SAS Institute. 2004.

SCAVINSKI, V.; FIGUEIREDO-FILHO, A.; RETSLAFF, F. A. S.; IAS, A. N.; RETSLAFF, F. M. S., Ajuste de funções de afilamento para *Pinus elliottii*, na FLONA de Irati. In: CONGRESSO FLORESTAL DO PARANÁ, 4., 2012, **Anais...** Curitiba: SBS/SBEF, 2012.

SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C. A. G.; KLEIN, J. E. M.; TOTTI, J. A.; BAZZO, J. L. Forma do tronco e sortimentos de madeira de *Eucalyptus grandis* Maiden para o estado do Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.6, n.1, p.79-88, 1996.

SCHÖEPFER, W. **Autimatisierung des massen, sorten and wertberechnung stenender waaldbestande schriftenreihe bad.** [S.l.]: Wurtt-Forstl., 1966.

SCHUMACHER, F. X.; HALL, F. S. Logarithmic expression of timber-tree volume. **Journal of Agricultural Research**, Washington, v.47, n.9, p.719-734, 1933.

SCOLFORO, J. R. S.; RIOS, M. S.; OLIVEIRA, A. D.; MELLO, J. M.; MAESTRI, R. Acuracidade de equações de afilamento para representar o perfil do fuste de *Pinus elliottii*. **Cerne**, Lavras, v.4, n.1, p.100-122, 1998.

SHARMA, M.; ODERWALD, R. G. Dimensionally compatible volume and taper equations. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v.31, n.5, p.797-803, 2001.

SHARMA, M.; ZHANG, S. Y. Variable-exponent taper equations for Jack Pine, Black Spruce, and Balsam Fir in eastern Canada. **Forest Ecology and Management**, Amsterdã, v.198, n.1-3, p.39–53, 2004.

SILVA, F.; DALLA CORTE, A. P.; SANQUETTA, C. R. Equações de afilamento para descrever o volume total do fuste de *Pinus caribaea* var. hondurensis na região do Triângulo Mineiro. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 39, n. 91, p. 367-376, 2011.

SILVA, J. A.; PAULA NETO, F. **Princípios básicos de dendrometria**. Recife: UFRPE, 1979. 185 p.

SOUZA, A. N. **Crescimento, produção e análise econômica econômica de povoamentos clonais de *Eucalyptus* sp. em sistemas agroflorestais**. Tese, XXp. (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras – Minas Gerais. 2005.

SOUZA, A. N. **Crescimento, produção e análise econômica de povoamentos clonais de *Eucalyptus* sp. em sistemas agroflorestais**.

2005. 223 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras.

SOUZA, C. A. M. **Avaliação de modelos de taper não segmentados e segmentados na estimação de altura e volume comercial de fustes de *Eucalyptus* sp.** 107f. Dissertação (Mestrado em Produção Vegetal) - Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2007.

SOUZA, C. A. M. **Modelos de afilamento para *Pinus taeda* L. ajustados segundo a forma do tronco e métodos de estratificação.** 120f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

SOUZA, C. A. M.; CHASSOT, T.; FINGER, C. A. G.; SCHNEIDER, P. R.; FLEIG, F. D. Modelos de afilamento para o sortimento do fuste de *Pinus taeda* L. **Ciência Rural**, Santa Maria, v.38, n.9, p.2506-2511, 2008a.

SOUZA, C. A. M.; FINGER, C. A. G.; SCHNEIDER, P. R.; SILVA, G. F.; THOMAS, C. Eficiência de um modelo de afilamento ajustado sem e com estratificação por classe de quociente de forma para formação dos sortimentos de *Pinus taeda* L. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.22, n.1, p.125-135, 2012.

SOUZA, C. A. M.; SILVA, G. F.; XAVIER, A. C.; CHICHORRO, J. F.; SOARES, C. P. B.; SOUZA, A. L. Avaliação de modelos de afilamento

segmentados na estimativa da altura e volume comercial de fustes de *Eucalyptus* sp. **Revista Árvore**, Viçosa, v.32, n.3, p.453-463, 2008b.

SOUZA, C. A. M.; SILVA, G. F.; XAVIER, A. C.; MENDONÇA, A. R.; ALMEIDA, A. Q. Avaliação de modelos de afilamento não segmentados na estimativa da altura e volume comercial de *Eucalyptus* sp. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 18, n.3, p.387399, 2008c.

SPURR, S. H. **Forest inventory**. Ronald Press Co., N.Y., 1952.

STERBA, H. Stem curves: a review of the literature. **Forestry Abstracts**, v.41, n.4, p.141-145, 1980.

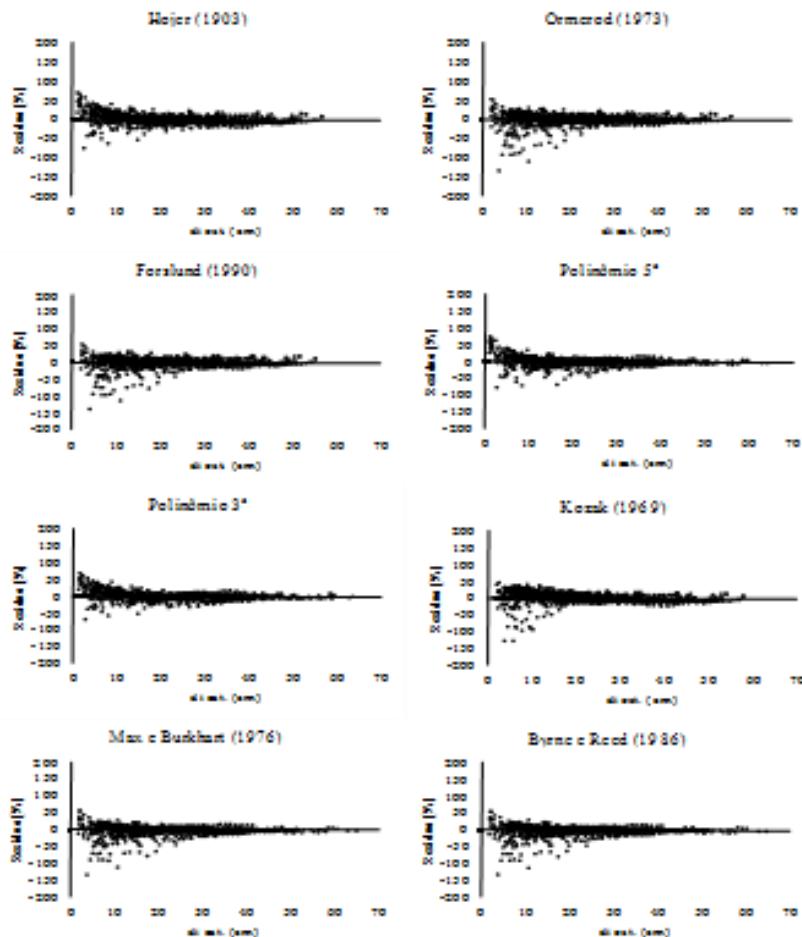
THOMAS, C. E.; PARRESOL, B. R. Simple, flexible, trigonometric taper equations. **Canadian Journal of Forest Research**, Ottawa, v.21, n.7, p.1132-1137, 1991.

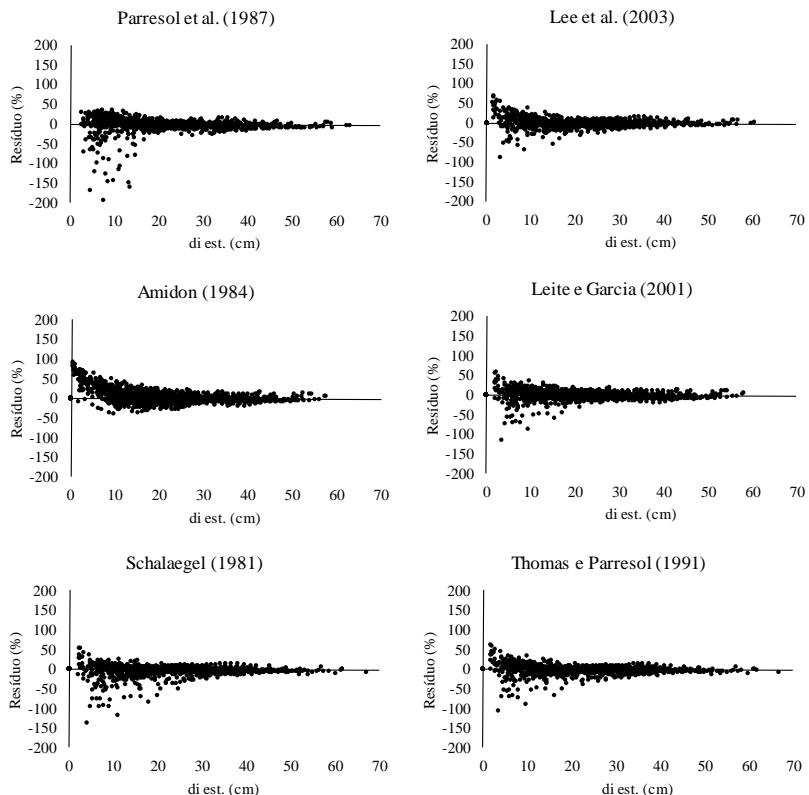
TRINCADO, G.; BURKHART, H. E. A generalized approach for modeling and localizing stem profiles curves. **Forest Science**, Washington, v.52, n.6, p.670–682, 2006.

YANG, Y.; HUANG, S.; TRINCADO, G.; MENG, S.X. Non-linear mixed-effects modeling of variable-exponent taper equations for lodgepole pine in Alberta, Canada. **European Journal of Forest Research**. v. 128, 415–429, 2009(d).

7 APÊNDICES

APÊNDICE A - Gráfico de resíduo dos dados utilizados para o ajuste dos modelos estatísticos para afilamento do tronco de *Araucaria angustifolia* no oeste do Estado de Santa Catarina.

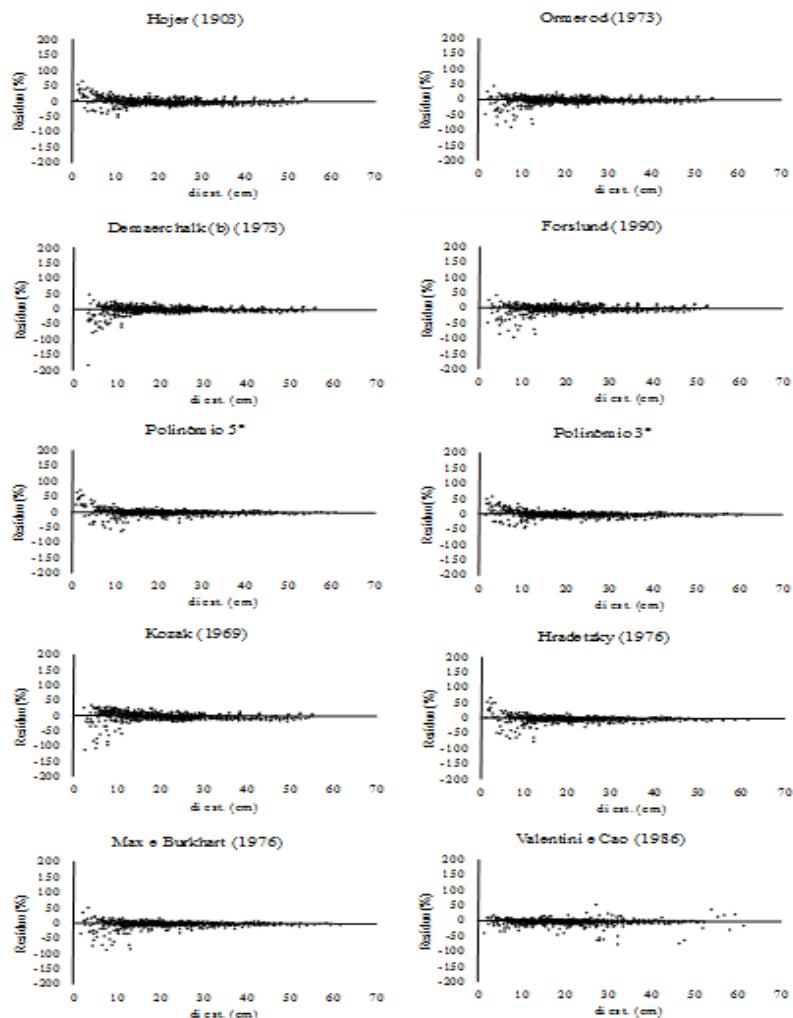


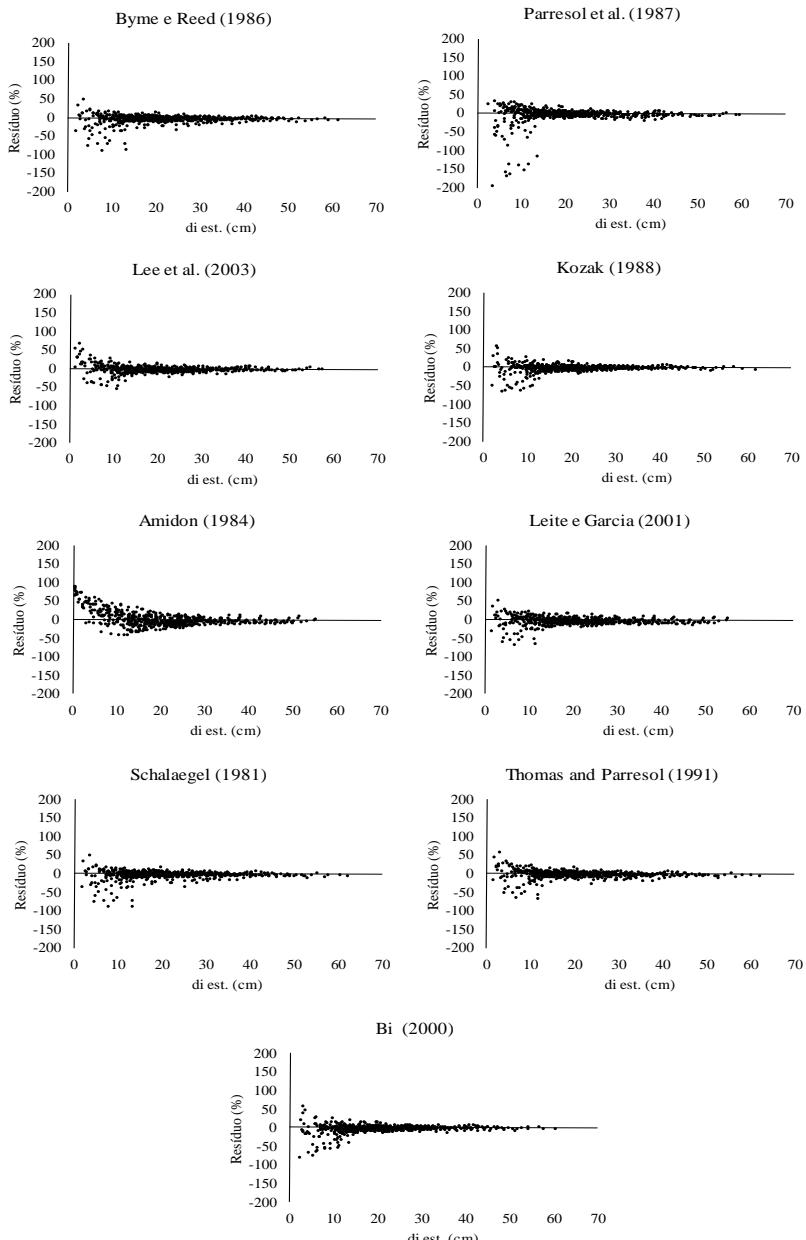


Fonte: produção do próprio autor.

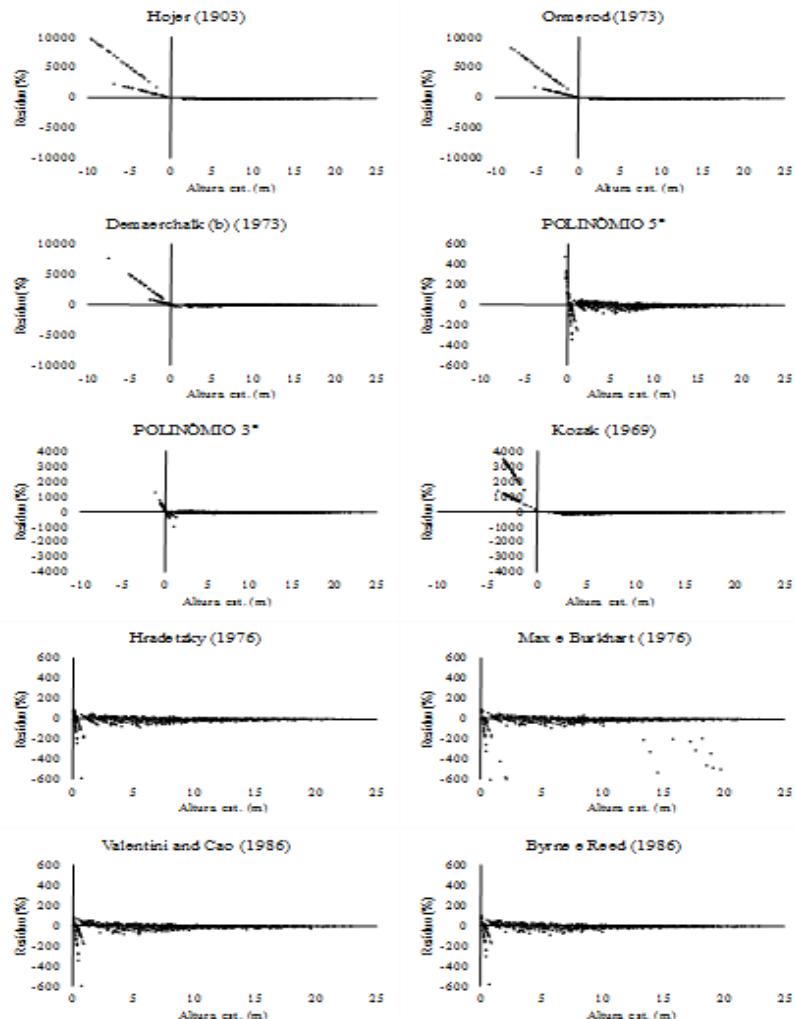
APÊNDICE B - Gráfico de resíduo dos dados utilizados para a validação dos modelos estatísticos utilizados na estimativa dos diâmetros do tronco

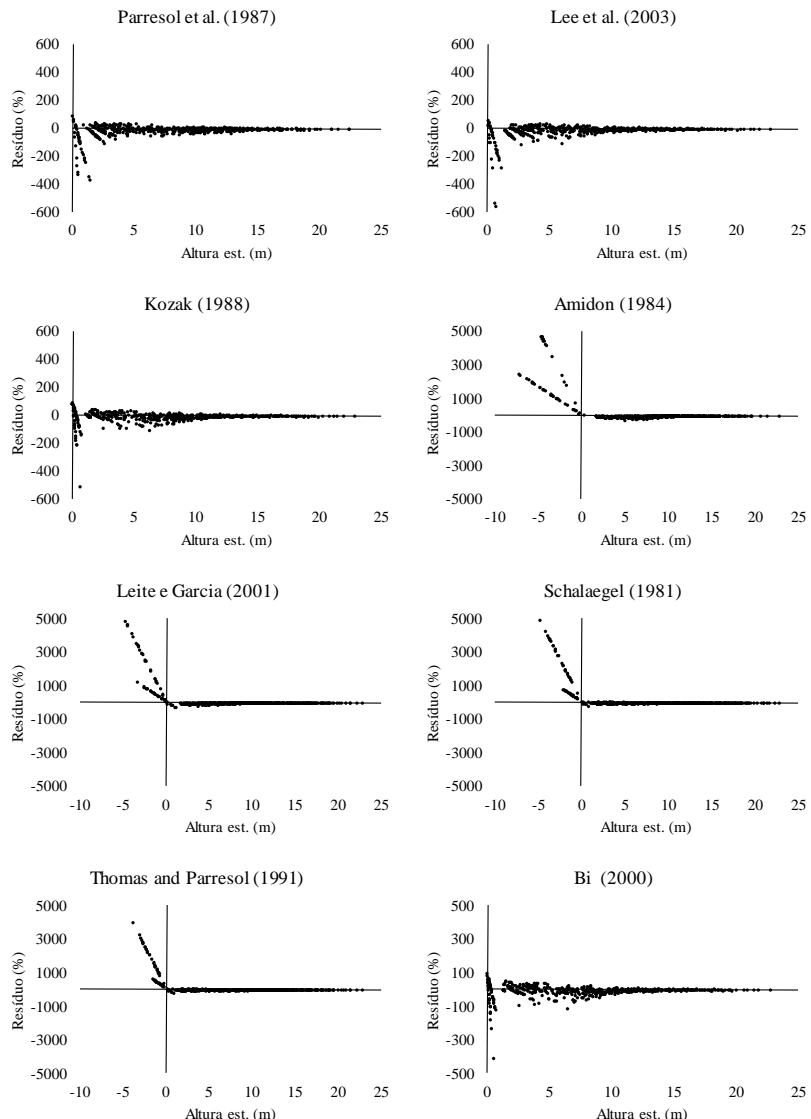
de *Araucaria angustifolia* no oeste do Estado de Santa Catarina.





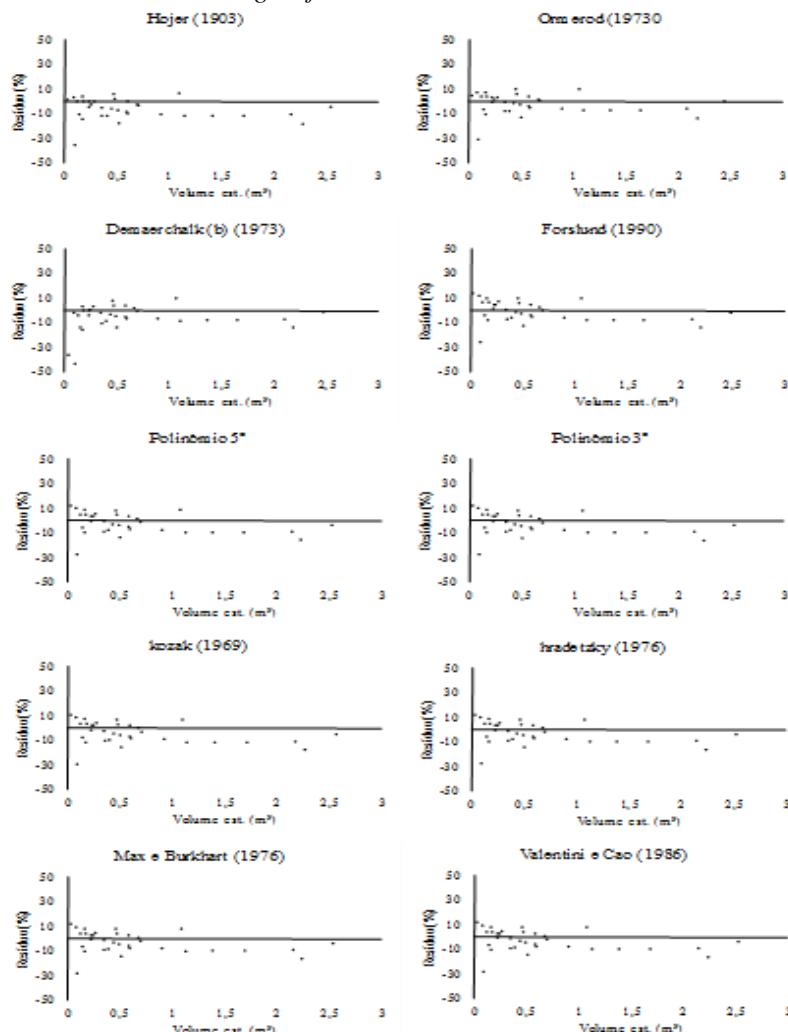
APÊNDICE C - Gráfico de resíduo dos dados utilizados para a validação dos modelos estatísticos utilizados na estimativa das alturas em diferentes diâmetros do tronco de *Araucaria angustifolia* no oeste do Estado de Santa Catarina.

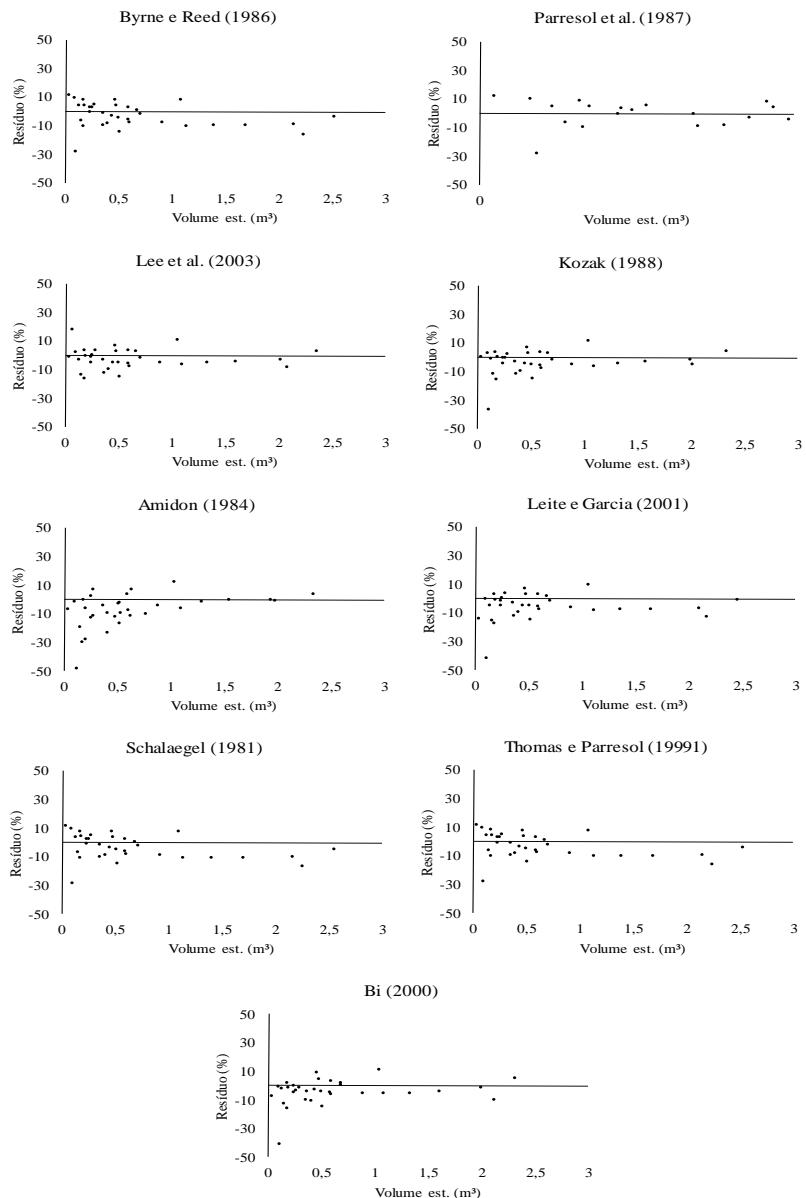




Fonte: produção do próprio autor.

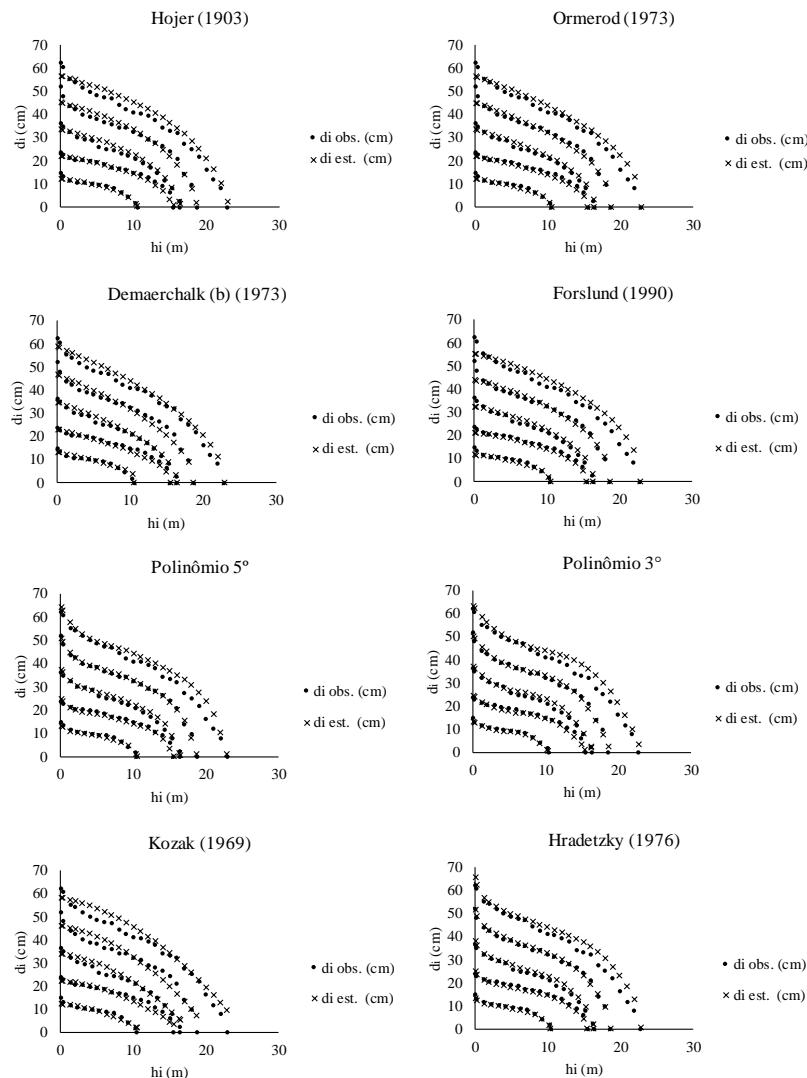
APÊNDICE D - Gráfico de resíduo dos dados utilizados para a validação dos modelos estatísticos utilizados na estimativa do volume total do tronco de *Araucaria angustifolia* no oeste do Estado de Santa Catarina.

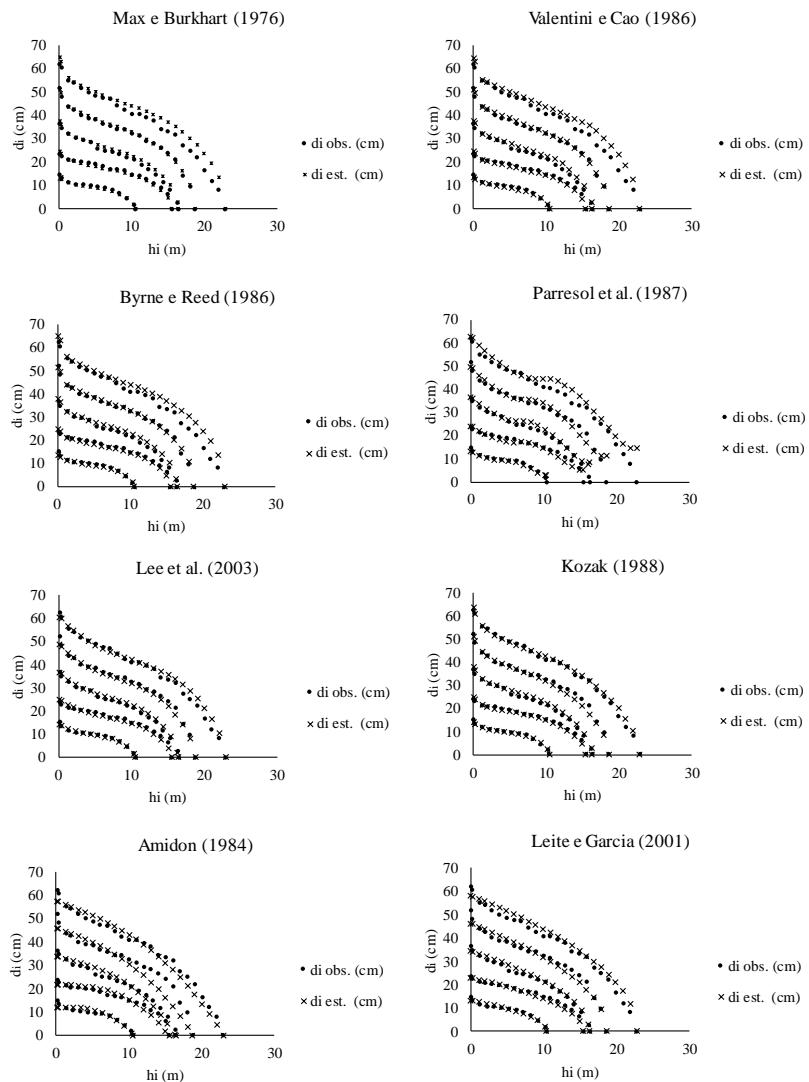




Fonte: produção do próprio autor.

APENDICE D - Representação gráficas dos diâmetros observados vs. diâmetros estimados para valores médios de cinco indivíduos selecionados aleatoriamente dos dados de ajuste.





Fonte: produção do próprio autor.