

UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA CATARINA
CAMPUS DE CURITIBANOS
DEPARTAMENTO DE AGRICULTURA, BIODIVERSIDADE E FLORESTAS
CURSO DE ENGENHARIA FLORESTAL

Gustavo Henrique Mozzer Regazolli

Modelagem do afileamento do fuste de *Araucaria angustifolia* em plantio comercial na Serra Catarinense

Curitibanos, SC

2023

Gustavo Henrique Mozzer Regazolli

Modelagem do afilamento do fuste de *Araucaria angustifolia* em plantio comercial na Serra Catarinense

Trabalho Conclusão do Curso de Graduação em Engenharia Florestal do Centro de Ciências Rurais da Universidade Federal de Santa Catarina como requisito para a obtenção do título de Bacharel em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Vinicius Costa Cysneiros, Dr.

Curitibanos, SC

2023

Ficha de identificação da obra

Mozzer Regazolli, Gustavo Henrique
Modelagem do afilamento do fuste de Araucaria angustifolia em
plântio comercial na Serra Catarinense / Gustavo Henrique Mozzer
Regazolli ; orientador, Vinicius Costa Cysneiros, 2023.
42 p.

Trabalho de Conclusão de Curso (graduação) - Universidade
Federal de Santa Catarina, Campus Curitibanos, Graduação em
Engenharia Florestal, Curitibanos, 2023.

Inclui referências.

1. Engenharia Florestal. 2. Perfil do fuste. 3. Manejo
florestal. 4. Teste de identidade. 5. Manejo para multiprodutos.
I. Costa Cysneiros, Vinicius. II. Universidade Federal de Santa
Catarina. Graduação em Engenharia Florestal. III. Título.

Gustavo Henrique Mozzer Regazolli

Modelagem do afilamento do fuste de *Araucaria angustifolia* em plantio comercial na Serra Catarinense

Este Trabalho Conclusão de Curso foi julgado adequado para obtenção do Título de “Bacharel em Engenharia Florestal” e aprovado em sua forma final pelo Curso de Engenharia Florestal

Curitibanos, SC, 17 de novembro de 2023.



Documento assinado digitalmente
MARCELO BONAZZA
Data: 04/12/2023 11:07:06-0300
CPF: ***.641.899-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Marcelo Bonazza, Dr.
Coordenador do Curso

Banca Examinadora:



Documento assinado digitalmente
VINICIUS COSTA CYSNEIROS
Data: 05/12/2023 14:39:22-0300
CPF: ***.971.537-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof. Vinicius Costa Cysneiros, Dr.
Orientador
UFSC – Campus Curitibanos



Documento assinado digitalmente
RITA CAROLINA DE MELO
Data: 04/12/2023 11:48:46-0300
CPF: ***.498.439-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Prof^a. Rita Carolina de Melo, Dr^a.
Avaliadora
UFSC – Campus Curitibanos



Documento assinado digitalmente
MARIO DOBNER JUNIOR
Data: 04/12/2023 11:49:53-0300
CPF: ***.250.659-**
Verifique as assinaturas em <https://v.ufsc.br>

Eng. Florestal, Mario Dobner Jr, Dr.
Avaliador
Florestal Gateados Ltda.

Dedico esse trabalho à Deus, à minha família e a todos os meus amigos.

AGRADECIMENTOS

Agradeço à Deus, à amada família, aos verdadeiros amigos, aos grandes professores, ao meu orientador Vinicius Costa Cysneiros por toda ajuda e motivação, à empresa Florestal Gateados LTDA e a Universidade Federal de Santa Catarina pela oportunidade de aprender e evoluir como pessoa e como profissional.

RESUMO

O presente estudo teve como objetivo ajustar e selecionar funções de afilamento para descrever o perfil do fuste de plantios comerciais de *Araucaria angustifolia* na Serra Catarinense e testar a possibilidade de agrupar modelos ajustados para diferentes estratos por meio do teste de identidade de Graybill. A base de dados foi composta por 78 árvores, divididas em dois estratos, nos quais 80 % das árvores foram selecionadas aleatoriamente para o ajuste dos modelos e 20 % para a validação. As árvores foram mensuradas por meio de cubagem rigorosa, usando alturas absolutas e não considerando a altura do toco. As funções de afilamento escolhidas para o ajuste foram o polinômio de 5º grau de Schöpfer (1966) e o modelo de Kozak *et al.* (1969). Para avaliar a adequabilidade dos ajustes foram utilizados os critérios: Análise Gráfica dos Resíduos; Coeficiente de Determinação Ajustado (R^2_{aj}); Erro Padrão da Estimativa (S_{yx} e $S_{yx}\%$). O teste de identidade de modelos de Graybill foi aplicado com o objetivo de investigar a possibilidade da utilização de um modelo reduzido (genérico), para cada função de afilamento, em todo o conjunto de dados. Por meio da análise dos resultados, a função de Kozak foi a mais indicada para estimar o perfil do fuste no presente estudo, em diâmetros superiores a 10 cm, devido sua boa acurácia e maior simplicidade em relação à função de Schöpfer. O teste de identidade de modelos de Graybill revelou a necessidade de modelos completos (específicos) para os dois estratos. A necessidade da utilização de modelos completos, pode ser devido principalmente a diferença de densidade de plantio entre os dois estratos.

Palavras-chave: Perfil do fuste, Teste de identidade, Manejo florestal, Manejo para multiprodutos.

ABSTRACT

The present study aimed to adjust and select taper functions to describe the stem profile of commercial plantations of *Araucaria angustifolia* in the Serra Catarinense and test the possibility of grouping adjusted models for different estratos using the Graybill identity test. The database consisted of 78 trees, divided into two strata, with 80 % of the trees randomly selected for model fitting and 20 % for validation. The trees were measured using rigorous cubage, using absolute heights and not considering stump height. The chosen taper functions for data fitting were the 5th-degree polynomial by Schöpfer (1966) and the model by Kozak *et al.* (1969). To assess the appropriateness of the fittings, the criteria used were: Graphical Analysis of Residues; Adjusted Coefficient of Determination (R^2_{aj}); Standard Error of Estimate (Syx and Syx%). The Graybill identity test was applied with the aim of investigating the possibility of using a reduced (generic) model for each taper function across the entire dataset. Through the analysis of the results, the Kozak function was deemed most suitable for estimating the stem profile in this study, for diameters greater than 10 cm, due to its good accuracy and greater simplicity compared to the Schöpfer function. The Graybill identity test revealed the necessity of complete (specific) models for both strata. The requirement for complete models may be primarily due to the difference in planting density between the two strata.

Keywords: Stem profile, Identity test, Forest management, Multi-product management.

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO	9
1.1	OBJETIVOS.....	10
1.1.1	Objetivo Geral	10
1.1.2	Objetivos Específicos	10
2	REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1	ESPÉCIE DE ESTUDO.....	11
2.2	MULTIPRODUTOS NO SETOR FLORESTAL	11
2.3	PERFIL DO FUSTE DAS ÁRVORES.....	12
2.4	FUNÇÕES DE AFILAMENTO.....	13
2.5	HISTÓRICO DO USO DE FUNÇÕES DE AFILAMENTO	15
2.6	TESTE DE IDENTIDADE DE MODELOS	17
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	17
3.1	ÁREA DE ESTUDO	17
3.2	COLETA DOS DADOS	17
3.3	AJUSTE, AVALIAÇÃO E SELEÇÃO DOS MODELOS.....	18
3.4	IDENTIDADE DE MODELOS	20
3.5	VALIDAÇÃO DOS MODELOS	21
4	RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	22
4.1	AJUSTE E SELEÇÃO DOS MODELOS	22
4.2	TESTE DE IDENTIDADE DE MODELOS	30
4.3	VALIDAÇÃO DOS MODELOS	32
5	CONCLUSÃO.....	44

1 INTRODUÇÃO

Araucaria angustifolia (Bertol.) Kuntze, conhecida popularmente como araucária ou pinheiro-do-Paraná é uma espécie ameaçada de extinção e por isso tem seu corte restrito por lei (Medina-Macedo *et al.*, 2016). Por essa razão sua principal fonte de madeira é provinda de plantações comerciais (Figueiredo Filho *et al.*, 2015). Portanto, é de extrema importância investir na viabilização econômica dos plantios comerciais da espécie (Sanquetta *et al.*, 2016).

A forma do fuste da árvore – conhecida como afilamento ou taper – é caracterizada pela diminuição do diâmetro com o aumento da altura. A determinação do afilamento das árvores de maneira direta para toda a população é um processo oneroso, que demanda muito tempo e é economicamente inviável (Andrade; Terra; Carvalho, 2022). Uma das maneiras para obter o perfil de fuste de maneira indireta e possibilitar a viabilização econômica dos plantios comerciais de araucária, é por meio de equações matemáticas, conhecidas com funções de afilamento ou modelos de afilamento (Silva *et al.* 2011; Favalessa *et al.*, 2012; Yoshitani Junior *et al.*, 2012).

As funções de afilamento fazem a descrição da mudança do diâmetro ao longo das diferentes alturas do fuste (Schröder; Pereira; Hofiço, 2013) e podem ser não-segmentadas ou segmentadas. As não-segmentadas possuem um único modelo para representação de todo o fuste, já as segmentadas fazem usos de submodelos dentro de um mesmo modelo, um submodelo representando cada porção do fuste (Favalessa *et al.*, 2012). Todas essas funções permitem estimar os estoques florestais em diferentes sortimentos de toras, proporcionando a quantificação dos diversos multiprodutos existentes em um plantio florestal (Ferreira, 2004; Queiroz *et al.*, 2008). Os multiprodutos florestais estão relacionados aos diferentes produtos presentes no fuste de uma árvore, como madeira destinada à laminação, à serraria, à celulose e papel, à energia, entre outras finalidades (Soares *et al.*, 2003). Por isso, essas funções têm extrema importância econômica, já que os diferentes multiprodutos possuem diferentes valores agregados (Fischer *et al.*, 2001; Mendonça *et al.*, 2015; Souza *et al.*, 2016).

Diversos fatores afetam a forma da árvore como a idade, espaçamento, densidade de plantio e a qualidade do sítio, dificultando o ajuste das funções de afilamento (Finger *et al.*, 1995; Queiroz *et al.*, 2008; Araújo, 2015; Figueiredo Filho *et al.*, 2015; Martins *et al.*, 2017a, Martins *et al.*, 2017b). Um sítio florestal é uma área homogênea que é classificada segundo sua capacidade produtiva levando em consideração a combinação entre condições biológicas,

climáticas e edáficas (Scolforo, 1998). Uma forma de investigar se há influência significativa desses elementos nos ajustes das funções é por meio dos testes de identidade de modelos. Estudos com esses testes não são muito comuns na literatura brasileira, principalmente para *Araucaria angustifolia*, mas dentre eles destaca-se o de Graybill (1976) (Queiroz *et al.*, 2008).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

O presente estudo teve como objetivo ajustar e selecionar funções de afileamento para descrever o perfil do fuste de plantios comerciais de *Araucaria angustifolia* na Serra Catarinense e testar a possibilidade de agrupar os modelos em diferentes estratos por meio do teste de identidade de Graybill.

1.1.2 Objetivos Específicos

- Mensurar o diâmetro em diferentes alturas por meio de cubagem rigorosa;
- Testar os modelos não-segmentados de Kozak *et al.* (1969) e de Schöpfer (1966) para estimar o diâmetro em diferentes alturas;
- Testar a possibilidade de agrupar os modelos em diferentes estratos por meio do teste de identidade de Graybill;
- Selecionar o modelo que melhor se ajusta à base de dados.

2 REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 ESPÉCIE DE ESTUDO

Araucaria angustifolia, conhecida popularmente como araucária, pinheiro ou pinheiro-do-Paraná, pertence à classe *Coniferopsida*, à ordem *Coniferae* e à família *Araucariaceae*. É uma árvore perenifólia, secundária longeva e com características de espécie pioneira (Imaguire, 1979). A araucária ocorre de forma natural no Brasil, nos estados do Paraná, Santa Catarina, Rio Grande do Sul, com pequenas manchas no estado de São Paulo, Minas Gerais e Rio de Janeiro (Carvalho, 2003). Suas sementes são chamadas de pinhões, que possuem em seu interior uma amêndoa rica em reservas energéticas, com aproximadamente 55 % de amido, sendo uma tradicional alimentação humana no sul do Brasil e importante fonte de proteína (Carvalho, 2003).

Como é uma espécie na lista de ameaçadas de extinção, o seu corte é restrito pela lei (Medina-Macedo *et al.*, 2016). Assim, a principal fonte de madeira de araucária provém de plantações comerciais (Figueiredo Filho *et al.*, 2015). Portanto, é de extrema importância investir na viabilização econômica dos plantios comerciais e, para isso, é necessário um manejo eficiente que proporcione o aumento da produção de madeira e seja economicamente viável (Sanquetta *et al.*, 2016).

2.2 MULTIPRODUTOS NO SETOR FLORESTAL

Dobner Júnior, Higa e Rocha (2012), citando Mancini (2011) afirmam que a produção de multiprodutos florestais pode diminuir o risco econômico, diversificando o mercado de atuação e aumentando o lucro, pois o mercado tende a valorizar madeira de melhor qualidade. O conceito de multiprodutos para uma floresta é que de um mesmo fuste consegue-se extrair madeira para laminação, serraria, celulose, biomassa, entre outras finalidades (Soares *et al.*, 2003). Para a produção de multiprodutos são necessárias técnicas que possibilitem a quantificação e qualificação desses produtos. Essas técnicas têm como base o conhecimento e a descrição do perfil do fuste das árvores (Mendonça *et al.*, 2015; Souza *et al.*, 2016).

2.3 PERFIL DO FUSTE DAS ÁRVORES

O quão melhor se conhecer o perfil do fuste da árvore, melhor se conhecerá o volume total e comercial, assim como o volume comercial por sortimento, facilitando a tomada de decisões de gestores florestais (Ribeiro; Gama; Melo, 2014; Costa *et al.*, 2016; Andrade; Terra; Carvalho, 2022). Silva, Corte e Sanquetta (2011), citando Friedl (1989) e Favalessa *et al.* (2012) afirmam que a forma do fuste não se assemelha a forma de uma figura geométrica específica, mas sim com várias formas distintas dependendo da posição do fuste. Os mesmos autores citando Husch *et al.* (1972) afirmam que a forma geométrica do tronco da árvore na base pode ser comparada a um neilóide, um parabolóide no meio e um cone no ápice, não sendo possível determinar de maneira exata onde o tronco muda sua forma. Sendo assim, as maiores irregularidades no fuste de uma árvore, estão presentes em sua parte inferior (Favalessa *et al.*, 2012).

Existem muitos fatores que influenciam a forma da árvore, como os genéticos, ambientais e de competitividade entre indivíduos (Souza *et al.*, 2016). A idade também é um fator que pode influenciar. Kohler, Koehler e Figueiredo Filho (2013) ao estudarem modelos de afilamento para *Pinus taeda*, encontraram melhor qualidade no ajuste dos modelos estratificados por idade, com uma diferença de 1,33 % no erro médio da estimativa (6,24 % em comparação com 7,57 % do modelo reduzido). Já Machado *et al.* (2004), comparando modelos de afilamento para *Pinus oocarpa* não encontraram influência da idade e nem do número de desbastes no ajuste dos modelos de maior desempenho como o de Hradetzky (1976) e Polinômio de 5º Grau (1965), podendo ser explicada pela flexibilidade desses modelos para se adaptarem melhor a forma do fuste.

Figueiredo Filho, Borders e Hitch (1966b), inferiram que, para se obter com acurácia o perfil do fuste, é necessária a medição do diâmetro e altura de 10 pontos ao longo de sua extensão. Andrade, Terra e Carvalho (2022) reforçam que o afilamento das árvores de toda uma população florestal não é determinado durante a realização de um inventário florestal, de maneira direta, pois é um processo oneroso, quase que sempre inviável economicamente, além de demandar muito tempo. Como o importante para toda empresa é possuir informações precisas com o menor custo e em menor tempo (Bognola *et al.*, 2008), métodos indiretos são mais utilizados. Dentre esses métodos, as funções de afilamento se encaixam perfeitamente (Soares *et al.*, 2011; Sanquetta *et al.*, 2014).

2.4 FUNÇÕES DE AFILAMENTO

Segundo Fischer *et al.*, (2001), a aplicação das funções de afilamento é de extrema importância para as empresas com plantios florestais que visam a produção de multiprodutos, pois fazem a descrição da mudança do diâmetro ao longo das diferentes alturas do fuste (Schröder; Pereira; Hofiço, 2013), permitindo valorar de maneira detalhada quanto renderá o povoamento florestal.

[...] equação de afilamento permite determinar o perfil do fuste possibilitando quantificar os volumes comercial e total, além da determinação da altura e diâmetro comerciais de diferentes usos madeireiros, bem como o número de toras de possíveis sortimento de madeira [...] (Andrade; Terra; Carvalho, 2022, p. 1502).

Realizando a integração das funções de afilamento podemos obter o volume dos múltiplos produtos da madeira, o volume comercial ou até mesmo o volume total da árvore (Fischer *et al.*, 2001; Campos; Leite, 2006; Silva; Corte; Sanquetta, 2011; Costa *et al.*, 2016).

As funções de afilamento podem ser separadas em funções segmentadas e não-segmentadas. As não-segmentadas possuem um único modelo para toda extensão do fuste. Já as segmentadas fazem uso de submodelos, cada um representando em uma porção do fuste (Favalessa *et al.*, 2012).

As funções não-segmentadas podem ser sigmoidais ou polinomiais. As funções sigmoidais utilizam transformações de maneira que o modelo se assemelhe à forma natural dos fustes. Dentre elas, destacam-se a de Kozak *et al.*, (1969), a de Demaerschallk (1972) e a de Ormerod (1963) (Ferreira, 2004). Já as funções polinomiais são caracterizadas pelo ajuste realizado por regressão que relaciona vários diâmetros ao longo do fuste, e suas referentes alturas, ao d_{ap} ou ao $d_{0,10}$ (diâmetro aos 10 cm da altura) e à altura total das árvores, sendo as mais utilizadas, nessa categoria, a de Hradetzky (1976), a de Goulding e Murray (1976) e a de Schöpfer (1966), também conhecido como polinômio de 5º grau (Ferreira, 2004).

As funções segmentadas, segundo Ferreira (2004), utilizam técnica de regressão segmentada, representando cada parte do fuste por uma função polinomial distinta, sendo a de Max e Burkhart (1976) e a de Clark *et al.* (1991) funções que se destacam nessa categoria.

O polinômio de 5º grau de Schöpfer (1966) tem sido um dos modelos mais utilizados no Sul do Brasil para descrever o fuste de *Pinus taeda* (Souza *et al.*, 2012; Yoshitani Junior *et al.*, 2012; Kohler; Koehler; Figueiredo Filho, 2013; Souza *et al.*, 2016; Téó *et al.*, 2018; Santos

et al., 2021) e *Araucaria angustifolia* (Figueiredo Filho *et al.*, 2015; Costa *et al.*, 2016; Martins *et al.*, 2017b). Além deste, Kohler, Koehler e Figueiredo Filho (2013) destacam a função de potências inteiras e fracionárias de Hradetzky (1976).

Mesmo que muitas funções sejam consagradas por seus resultados, Silva, Corte e Sanquetta (2011) afirmam que nenhuma delas terá sempre o melhor desempenho para todas as ocasiões ou espécies e que, além disso, nem sempre, uma função que estima bem o diâmetro vai estimar bem o volume numa mesma ocasião. Logo, não é adequado definir previamente uma função de afilamento e aplicá-la para todo plantio florestal, pois sua performance depende dos fatores que variam entre os indivíduos arbóreos, assim como a variabilidade da forma da própria árvore (Souza *et al.* 2016). Em razão de todos esses fatores, o recomendando é testar várias funções, avaliando-as por meio de análises estatísticas para descobrir qual melhor se ajusta para cada ocasião (Silva; Corte; Sanquetta, 2011).

Para avaliar a precisão das funções e compará-las, são usadas análises estatísticas, como o coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), o erro padrão da estimativa (Syx e Syx%) e a análise gráfica dos resíduos (Ferreira, 2004; Souza, 2007; Souza *et al.*, 2008; Silva; Corte; Sanquetta, 2011; Favalessa *et al.*, 2012; Yoshitani Junior *et al.*, 2012; Kohler; Koehler; Figueiredo Filho, 2013; Ribeiro; Gama; Melo, 2014; Costa *et al.*, 2016; Jiang *et al.*, 2020; Cerqueira *et al.*, 2021; Andrade; Terra; Carvalho, 2022). Também podem ser utilizadas estatística complementares como *bias* (Souza *et al.*, 2008; Nunes; Görgens, 2016); média das diferenças (MD) (Souza *et al.*, 2008); desvio padrão das diferenças (SD) (Fischer *et al.*, 2001; Souza *et al.*, 2008; Favalessa *et al.*, 2012); índice de Schlaegal (IA) (Silva; Corte; Sanquetta, 2011); soma dos quadrados dos resíduos relativos (SQRR) (Fischer *et al.*, 2001; Favalessa *et al.*, 2012; Andrade; Terra; Carvalho, 2022); erro padrão residual (EPR); raiz quadrada do erro médio (RQEM) (Nunes; Görgens, 2016; Andrade; Terra; Carvalho, 2022); desvio absoluto médio (DAM) e critério de informação de Akaike (AIC) (Andrade; Terra; Carvalho, 2022); eficiência (EF) (Nunes; Görgens, 2016).

Todas essas medidas estatísticas resultam do confronto entre o diâmetro e volume real da árvore com o diâmetro e volume obtidos pelas equações geradas pelo ajuste das funções de afilamento por meio da regressão linear. O diâmetro real em cada altura do fuste é obtido por meio de cubagem e o volume real é calculado, por exemplo, pelo método de *Smalian*, também chamado de método geométrico (Sternadt, 2001). Fischer *et al.* (2001) afirmam que é de extrema importância, quando for comparar ou avaliar modelos de afilamento, investigar como estes estimam tanto a base, como o meio e o ápice da árvore.

Para que os resultados dos ajustes sejam válidos, é preciso fazer a validação dos resultados. Esse processo tem como objetivo analisar como uma equação, que foi ajustada para um determinado conjunto de dados, se comporta na estimativa de um outro conjunto de dados, independentes daqueles usados no ajuste. Para isso a base de dados global pode ser dividida em dados de ajuste e dados de validação. Essa separação pode ser de 80 % para ajuste e 20 % para validação (Kohler; Koehler; Figueiredo Filho, 2013).

2.5 HISTÓRICO DO USO DE FUNÇÕES DE AFILAMENTO

Höjer (1903), citado por Behre (1923) foi o primeiro trabalho no mundo que descreveu o perfil do tronco de uma árvore. Segundo o autor, Höjer (1903) desenvolveu uma fórmula empírica para expressar o diâmetro da árvore em qualquer ponto do seu fuste. Essa fórmula (A) foi utilizada para o Abeto da Noruega (*Picea abies*).

$$\frac{d}{D} = C \log\left(\frac{c+1}{c}\right) \quad (A)$$

Em que:

d = diâmetro à distância "1" da ponta;

D = diâmetro à altura do peito (dap);

C e c = constantes.

De acordo com Figueiredo Filho, Borders e Hitch (1996a) foi a partir do trabalho de Silva (1976), que os modelos de *taper* (afilamento), foram introduzidos no Brasil. Andrade (2014), comenta que na década de 1990, no país, os modelos com maior importância foram o de Schöpfer (1966), Kozak *et al.* (1969), Demaerschalk (1971) e o de Ormerod (1973). Segundo o mesmo autor, a partir dos anos 2000, houve um aumento considerável desses trabalhos, se destacando os modelos de Hradetzky (1976), Max e Burkhardt (1976) e Clark *et al.* (1991). Após os anos 2000, houve uma maior utilização de modelos tipo expoente-forma, dando méritos aos modelos de Kozak (1988), Bi (2000), Perez *et al.* (1990) e Muhairwe (1999) (Andrade; Terra; Carvalho, 2022). Algumas das funções mais avaliadas em trabalhos recentes seguem no Quadro 1. De maneira geral, a maioria desses estudos tiveram como objetivo avaliar a adequação dessas funções e determinar o modelo mais eficiente, através de múltiplas comparações.

Quadro 1 – Algumas das funções mais avaliadas em trabalhos recentes no Brasil.

Função de Afilamento	Citações
Schöpfer (1966)	Yoshitani Junior <i>et al.</i> , 2012; Kohler; Koehler; Figueiredo Filho, 2013; Costa <i>et al.</i> , 2016; Souza <i>et al.</i> , 2016; Cerqueira <i>et al.</i> , 2021; Andrade; Terra; Carvalho, 2022.
Kozak <i>et al.</i> (1969)	Yoshitani Junior <i>et al.</i> , 2012; Costa <i>et al.</i> , 2016; Nunes; Görgens, 2016; Jiang <i>et al.</i> , 2020; Andrade; Terra; Carvalho, 2022.
Demaerschalk (1973)	Nunes; Görgens, 2016; Andrade; Terra; Carvalho, 2022.
Ormerod (1973)	Andrade; Terra; Carvalho, 2022.
Hradetzky (1976)	Yoshitani Junior <i>et al.</i> , 2012; Kohler; Koehler; Figueiredo Filho, 2013; Andrade; Terra; Carvalho, 2022.
Max e Burkhart (1976)	Favalessa <i>et al.</i> , 2012; Lanssanova <i>et al.</i> , 2013; Andrade, 2014; Souza <i>et al.</i> , 2016; Cerqueira <i>et al.</i> , 2021.
Perez <i>et al.</i> (1990)	Cerqueira <i>et al.</i> , 2021.
Clark <i>et al.</i> (1991)	Favalessa <i>et al.</i> , 2012; Lanssanova <i>et al.</i> , 2013; Andrade, 2014.
Sharma e Oderwald (2001)	Sanquetta <i>et al.</i> , 2020.
Lee <i>et al.</i> (2003)	Costa <i>et al.</i> , 2016; Nunes; Görgens, 2016; Jiang <i>et al.</i> , 2020.
Sharma e Zang (2004)	Costa <i>et al.</i> , 2016.

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

2.6 TESTE DE IDENTIDADE DE MODELOS

Os testes de identidade de modelos são uma forma de investigar se há influência significativa dos fatores que afetam a forma da árvore, nos ajustes, e conseqüentemente, na acurácia das funções de afilamento (Queiroz *et al.*, 2008). Acurácia é a proximidade de um resultado com o seu valor de referência real, ou seja, quanto mais próximo os valores estimados são dos valores reais maior acurácia possui o modelo de afilamento.

Alguns dos fatores que afetam a forma das árvores são: idade, sítio, espaçamento e densidade de plantio (Finger *et al.*, 1995; Araújo, 2015; Figueiredo Filho *et al.*, 2015; Martins *et al.*, 2017a, Martins *et al.*, 2017b). Estudos com teste de identidade não são muito comuns, principalmente para araucária, mas dentre eles, destaca-se o de Graybill (1976). Esse teste consiste na redução da soma de quadrados, possibilitando verificar, pelo teste F, a significância da diferença entre a soma total de quadrados das regressões ajustadas para cada classe de estrato (modelos completos) e a soma total de quadrados da regressão ajustada para o conjunto total de dados, sem estratificação (modelo reduzido) (Queiroz *et al.*, 2008).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A base de dados utilizada foi obtida por meio de medições realizadas em plantios comerciais de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze na empresa Florestal Gateados Ltda. A empresa está localizada no município de Campo Belo do Sul, no Estado de Santa Catarina, entre 27° 53' de latitude sul e 50° 44' de longitude oeste. Segundo a classificação de Köppen, o clima que predomina é Cfb, temperado constantemente úmido, sem estação seca e com verão fresco. A temperatura média anual varia de 13,8°C a 15,8°C e a pluviosidade média anual fica entre 1.360 mm a 1.600 mm (Epagri, 2023).

3.2 COLETA DOS DADOS

A base de dados foi composta por 78 árvores, amostradas em dois estratos: o primeiro nomeado de Chata com plantio de 23 anos e espaçamento entre árvores de 2 x 2 m, onde foram cubadas 32 árvores; e o segundo nomeado de Potreiro com plantio de 22 anos e espaçamento

de 3 x 4 m, onde foram cubadas 46 árvores. As árvores foram medidas por meio da cubagem rigorosa, usando alturas absolutas e não considerando a altura do toco. Foram medidos diâmetros sem casca de cada árvore a 0,1 m, 0,3 m, 0,5 m, 0,7 m, 1,3 m, 2,3 m e, depois a cada 2 m sucessivamente até o comprimento total. Foi realizada a análise exploratória dos dados mensurados, na qual foi calculada a média (\bar{x}), o desvio padrão (DP) e o coeficiente de variação (CV) do dap com casca em centímetros (cm), da altura do fuste (h) em metros (m) e dos diâmetros sem casca observados ao longo do fuste (di's) em centímetros (cm), para os dois estratos e para o conjunto total de dados.

3.3 AJUSTE, AVALIAÇÃO E SELEÇÃO DOS MODELOS

As funções de afilamento escolhidas para ajuste à base de dados foram o polinômio de 5º grau de Schöpfer (1966) e o modelo de Kozak *et al.* (1969), ambas não-segmentadas (Tabela 1). Essas funções foram escolhidas devido sua facilidade de aplicação (Martins *et al.*, 2017a) e, no caso da função de Schöpfer, por ser uma das funções mais utilizadas no Sul do Brasil e com ótimos resultados para a modelagem do fuste de *Araucaria angustifolia* (Figueiredo Filho *et al.*, 2015; Costa *et al.*, 2016; Martins *et al.*, 2017b) e *Pinus taeda* (Souza *et al.*, 2012; Yoshitani Junior *et al.*, 2012; Kohler; Koehler; Figueiredo Filho, 2013; Souza *et al.*, 2016; Téó *et al.*, 2018; Santos *et al.*, 2021), outra conífera de grande importância econômica no mercado florestal da região. Em relação à função de Kozak, já testada para espécies de *Pinus* (Souza *et al.*, 2008; Silva; Dalla Corte; Sanquetta, 2011; Yoshitani Junior *et al.*, 2012), foi escolhida devido por sua ausência em trabalhos modelando o fuste de araucária. O objetivo era investigar qual seria o desempenho de uma função mais simples para a espécie de estudo.

Para o ajuste e validação das funções, a base de dados foi dividida em dados de ajuste e dados de validação, na proporção de aproximadamente 80 % e 20 %, respectivamente, para os dois estratos e para área total. O ajuste das funções foi realizado com base nos dados de ajuste – tanto para os dois estratos de forma isolada, Chata e Potreiro (modelos completos), como para o conjunto total de dados, combinando Chata e Potreiro (modelo reduzido). Para o ajuste das funções foi considerado o dap (diâmetro a 1,3 m do solo) com casca e altura do fuste (h), relacionados aos diâmetros sem casca (di's) e alturas absolutas (hi), ambos coletados ao longo do fuste.

Tabela 1 – Funções testadas para estimar o afilamento do fuste de árvores de *Araucaria angustifolia* em plantios comerciais.

Funções para obtenção dos polinômios	
Kozak	$\left(\frac{d_i}{dap}\right)^2 = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{hi}{h}\right)^1 + \beta_2 \left(\frac{hi}{h}\right)^2 + e_i$
Schöpfer	$\frac{d_i}{dap} = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{hi}{h}\right) + \beta_2 \left(\frac{hi}{h}\right)^2 + \beta_3 \left(\frac{hi}{h}\right)^3 + \beta_4 \left(\frac{hi}{h}\right)^4 + \beta_5 \left(\frac{hi}{h}\right)^5 + e_i$
Funções de afilamento para estimar o diâmetro correspondente a qualquer altura da árvore	
Kozak	$di = dap \left[\sqrt{\beta_0 + \beta_1 \left(\frac{hi}{h}\right)^1 + \beta_2 \left(\frac{hi}{h}\right)^2} \right]$
Schöpfer	$di = dap \left[\beta_0 + \beta_1 \left(\frac{hi}{h}\right) + \beta_2 \left(\frac{hi}{h}\right)^2 + \beta_3 \left(\frac{hi}{h}\right)^3 + \beta_4 \left(\frac{hi}{h}\right)^4 + \beta_5 \left(\frac{hi}{h}\right)^5 \right]$

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Legenda: di = diâmetro estimado (cm); hi = altura qualquer no fuste (m); $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ e β_5 = parâmetros a serem estimados; dap = diâmetro à altura do peito, 1,3 m (cm); h = altura total do fuste (m); e_i = erro da estimativa.

Para avaliar a adequabilidade dos ajustes das funções de afilamento testadas foram utilizados os critérios: Análise Gráfica dos Resíduos para investigar os pressupostos da regressão linear (normalidade e homocedasticidade); Coeficiente de Determinação Ajustado (R^2aj); Erro Padrão Absoluto (Syx); e Erro Padrão Relativo ($Syx\%$) (Tabela 2).

Tabela 2 – Estatísticas utilizadas para avaliar a acurácia do ajuste das funções de Kozak e Schöpfer.

Estatística	Fórmula
R^2_{aj}	$R^2_{aj}=1-\left(\frac{n-1}{n-p}\right)*\left(\frac{SQRes}{SQT}\right)$
Syx	$Syx=\sqrt{\frac{SQRes}{(n-p)}}$
Syx (%)	$Syx\%=\frac{Syx}{\bar{x}}*100$

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Legenda: n = número de observações; p = número de coeficientes do modelo; $SQRes$ = Soma dos Quadrados dos Resíduos; SQT = Soma dos Quadrados Totais; \bar{x} = média dos diâmetros observados; R^2_{aj} = Coeficiente de Determinação Ajustado para comparação entre modelos com diferentes números de polinômios; Syx = Erro Padrão Absoluto da Estimativa; Syx (%) = Erro Padrão Relativo da Estimativa.

3.4 IDENTIDADE DE MODELOS

O teste de identidade de modelos foi aplicado com o objetivo de investigar a possibilidade da utilização de um modelo reduzido (genérico) para cada função de afilamento (Kozak e Schöpfer) para o conjunto total dos dados, ou se é necessário o uso de modelos completos (específicos) para cada um dos estratos. Utilizou-se o teste de identidade de modelos proposto por Graybill (1976) (Queiroz *et al.*, 2008) (Tabela 3).

Tabela 3 – Teste de identidade de modelos por meio da Análise de Variância e teste F de Graybill.

FV	GL	SQ	QM	F
Completo	$h \cdot p$	SQR_{Comp}		
Reduzido	p	SQR_{Red}		
Diferença	$(h-1) \cdot p$	$SQR_{Comp} - SQR_{Red}$	SQ_{dif} / GL_{dif}	QM_{dif} / QM_{res}
Resíduo	$n - (h \cdot p)$	$SQT - SQR_{Comp}$	SQ_{Res} / GL_{res}	
Total	n	SQT		

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Legenda: FV= fontes de variação; GL = graus de liberdade; SQ = soma de quadrados; QM= quadrados médios; F = valor de F calculado; Completo = valores para o modelo completo ou específico; Reduzido = valores para o modelo reduzido ou genérico; Diferença = valores da diferença entre o modelo completo e reduzido; Resíduos = valores para os resíduos da ANOVA; Total = valores totais; $h = n^\circ$ de estratos; $p = n^\circ$ de parâmetros do modelo (sem considerar o β_0); $n =$ número de observações; SQR_{Comp} = Soma de Quadrados Total da regressão do modelo completo; SQR_{Red} = Soma de Quadrados Total da regressão do modelo reduzido; SQT = Soma de Quadrados Total dos valores reais do banco de dados usado como base para o modelo completo); SQ_{dif} = Soma de Quadrados da Diferença; SQ_{Res} = Soma de Quadrados dos Resíduos; GL_{dif} = graus de liberdade da diferença; GL_{res} = graus de liberdade do resíduo; QM_{dif} = Quadrados Médios da Diferença; QM_{res} = Quadrados Médios dos Resíduos.

O teste teve como objetivo analisar se houve diferença significativa entre o total das somas de quadrados das regressões – por meio de cada função (Kozak e Schöpfer) – para cada estrato (modelos completos) e a soma de quadrados total da regressão para o conjunto total de dados (modelo reduzido). As hipóteses testadas para o teste de identidade de modelos foram:

- H_0 = o modelo reduzido ajustado para o conjunto total dos dados não apresenta diferença em relação aos modelos completos ajustados para cada um dos estratos;
 - H_1 = há diferença entre os modelos completos e o modelo reduzido.

3.5 VALIDAÇÃO DOS MODELOS

Para avaliar a estabilidade das funções de afilamento em novas predições, os modelos completos para as duas funções de afilamento (Kozak e Schöpfer) foram aplicados à base de dados independente de validação (20 %). Em seguida, foram avaliados o Erro Padrão Absoluto da Estimativa (Syx) e Erro Padrão Relativo da Estimativa (Syx%). Para complementar a avaliação foram construídos gráficos do perfil do fuste descritos pelos modelos completos das funções para os dois estratos.

A estatística descritiva dos valores coletados, o ajuste e a validação dos modelos, assim como as análises estatísticas e a construção dos gráficos foram realizados por meio do *software Microsoft Excel* (2013). O teste de identidade de modelos de Graybill foi realizado usando o *software R* versão 4.2.1 (R Core Team, 2022).

4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 AJUSTE E SELEÇÃO DOS MODELOS

Por meio da análise exploratória de dados (Tabela 4), observa-se que no estrato Chata (Tabela 4) as árvores possuem maior dap médio (25,47 cm) e menor variabilidade (CV = 21,66 %) em relação aos outros conjuntos de dados. O contrário é observado para o estrato Potreiro que possui o menor dap médio (24,31 cm) e a maior variabilidade (CV = 23,27 %).

Em relação à média da altura total do fuste (h), não há diferenças notáveis entre os três conjuntos de dados, ambos com uma média aproximada de 15 m. No entanto, há diferença na variabilidade, a qual, a menor é encontrada no estrato Chata (CV = 9,58 %) e a maior no estrato Potreiro (CV = 12,34 %).

A respeito dos diâmetros observados (Tabela 5), os maiores Coeficientes de Variação (CV) médios são encontrados no topo do fuste das árvores, onde os diâmetros observados são menores (ponta fina). A maior variabilidade encontrada na ponta fina do fuste pode ser explicada pelo afinamento abrupto no ápice do fuste, natural da araucária (Martins *et al.*, 2017b).

A maior variabilidade dos diâmetros observados foi encontrada no estrato Potreiro, seguido pelo conjunto total de dados. Já o estrato Chata apresentou a menor variabilidade dos diâmetros observados ao longo do fuste (Tabela 5).

A menor variabilidade (CV) encontrada no estrato Chata para todas as variáveis medidas indica uma forma menos irregular e mais cilíndrica do fuste dessas árvores em relação à forma do fuste das árvores do estrato Potreiro. Apesar da distinta idade entre os estratos, sabendo que esse é um fator que influencia a forma do fuste das árvores de maneira positiva, a diferença entre os dois é de apenas um ano, assim, esse pode não ter sido o principal elemento de influência.

Acredita-se que outros fatores podem ter determinado de maneira mais expressiva essa diferença como a presença do maior número de árvores dominantes e menor espaçamento no

estrato Chata. As árvores amostradas no estrato Chata eram providas de um corte raso, no qual, incluiu-se a amostragem de árvores dominantes, diferente do ocorrido no estrato Potreiro, onde as árvores amostradas eram provenientes de desbaste. No desbaste, as árvores dominantes não foram colhidas.

Figueiredo Filho *et al.* (2015), citando Burger *et al.* (1980) e Machado (1982), afirmam que a forma das araucárias dominantes se torna cada vez mais homogênea a medida que a idade aumenta. O fator espaçamento, por ser menor no estrato Chata, pode ter influenciado na maior homogeneidade da forma do fuste das árvores, já que devido ao menor espaçamento houve maior competição entre os indivíduos, tornando o crescimento menos irregular (Martins *et al.*, 2017a) e a forma menos cônica (Nogueira *et al.*, 2008).

Tabela 4 – Estatística descritiva do diâmetro à altura do peito (dap) medido em centímetros e da altura do fuste (h) medido em metros, para os conjuntos de dados.

Chata			
Variáveis	Média	Desvio Padrão	CV (%)
dap	25,47	5,52	21,66
h	14,91	1,43	9,58
Potreiro			
dap	24,31	5,66	23,27
h	15,72	1,94	12,34
Total			
dap	24,78	5,53	22,70
h	15,39	1,79	11,65

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).
Legenda: CV = coeficiente de variação.

Tabela 5 – Coeficiente de Variação (CV) médio dos diâmetros sem casca medidos ao longo do fuste para os conjuntos de dados.

Chata	
Proporções do fuste	CV médio (%)
di's ao longo do fuste	25,54
di's > 12 cm	23,27
di's < 12 cm	33,13
Potreiro	
di's ao longo do fuste	28,58
di's > 12 cm	25,77
di's < 12 cm	35,59
Total	
di's ao longo do fuste	28,56
di's > 12 cm	24,96
di's < 12 cm	37,56

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Legenda: CV médio = média do coeficiente de variação; di's ao longo do fuste = coeficiente de variação médio dos di's ao longo do fuste; di's > 12 cm = coeficiente de variação médio para diâmetros maiores que 12 cm; di's < 12 cm = coeficiente de variação médio para diâmetros menores que 12 cm.

Os parâmetros estimados para as duas funções testadas (Kozak e Schöpfer) para os dois estratos e para o conjunto total dos dados estão dispostos na Tabela 6, com os seus respectivos Coeficientes de Determinação Ajustados (R^2_{aj}) e Erros Padrões Relativos da Estimativa (Syx%). Todas as funções apresentaram significância estatística ($\alpha = 0,05$) com polinômios igualmente significativos. As duas funções testadas (Kozak e Schöpfer) apresentam Coeficiente de Determinação Ajustado (R^2_{aj}) superior a 0,94 e Erro Padrão Relativo da Estimativa (Syx%) inferior a 10 % em todos os ajustes. A função que melhor se ajustou à base de dados em todas as ocasiões foi o Polinômio de Quinto Grau de Schöpfer (1966), apresentando R^2_{aj} de 0,97 e Syx% de 6,49 % para a estrato Chata, R^2_{aj} de 0,96 e Syx% de 7,86 % para o estrato Potreiro (modelos completos) e R^2_{aj} de 0,96 e Syx% de 7,40 % para o conjunto total de dados (modelo reduzido).

Figueiredo Filho *et al.* (2015), em estudo para investigar o efeito da idade no ajuste de funções de afilamento em plantio comercial de *Araucaria angustifolia*, encontraram valores semelhantes para o ajuste da função de Schöpfer em árvores entre 21 e 25 anos, com R^2 de 0,97 e Syx% de 6,84 %. Martins *et al.* (2017a), comparando o desempenho de técnicas de

Inteligência Artificial (AI), como as RNA's (Redes Neurais Artificiais) e M5P (Árvore Modelo), com funções de afilamento, para indivíduos da mesma espécie, também em plantios comerciais, encontraram para a função de Schöpfer um R^2_{aj} de $\approx 0,98$ e $Syx\%$ de 9,86 %. Costa *et al.* (2016), em seu estudo para descrever o afilamento do fuste de araucárias, ajustando a função de Schöpfer, obtiveram um R^2_{aj} de $\approx 0,97$ e $Syx\%$ de 7,50 %. Martins *et al.* (2017b) encontraram valores de R^2_{aj} de $\approx 0,98$ e $Syx\%$ de 6,80 % para a mesma função e para a mesma espécie com 24 anos de idade.

A função de Schöpfer é amplamente empregada para descrever o afilamento de espécies arbóreas, devido sua precisão e facilidade de aplicação (Miguel *et al.*, 2011; Souza *et al.*, 2012; Figueiredo Filho *et al.*, 2015; Costa *et al.*, 2016; Martins *et al.*, 2017a), sendo uma das funções com melhores resultados para avaliar o afilamento de algumas espécies de *Pinus* no Brasil (Fischer *et al.*, 2001; Souza *et al.*, 2008; Yoshitani Junior *et al.*, 2012; Kohler; Koehler; Figueiredo Filho, 2013; David *et al.*, 2014, Souza *et al.*, 2016). No entanto, poucos estudos foram feitos para avaliar a adequabilidade dessa função em *Araucaria angustifolia*, a qual, apesar do bom desempenho, possui menor precisão que a função de potencias fracionárias de Hradetzky (Martins *et al.*, 2017a) e que algumas funções não-lineares como Kozak (1988) e Sharma e Zang (2004) (Costa *et al.*, 2016). Apesar da função possuir melhor ajuste para *Pinus taeda* (Fischer *et al.*, 2001; Souza *et al.*, 2008; Yoshitani Junior *et al.*, 2012; Kohler; Koehler; Figueiredo Filho, 2013; Souza *et al.*, 2016) o uso da função de Schöpfer para a presente espécie não deve ser descartado devido ao seu bom desempenho, simplicidade e facilidade de aplicação (Martins *et al.*, 2017b).

A função de Kozak *et al.* (1969) apresentou R^2_{aj} de 0,96 e $Syx\%$ de 7,25 % para o estrato Chata, R^2_{aj} de 0,94 e $Syx\%$ de 9,16 % para o estrato Potreiro (modelos completos) e R^2_{aj} de 0,95 e $Syx\%$ de 8,45 % para o conjunto total de dados (modelo reduzido). Em estudo para comparação da eficiência de diferentes funções de afilamento para descrever o fuste de *Pinus taeda*, na Serra Catarinense, Souza *et al.* (2008) encontraram ao ajustar a função de Kozak, um R^2_{aj} de 0,91 e $Syx\%$ de 12,76 %. Yoshitani Junior *et al.* (2012), ao ajustarem a função de Kozak para *Pinus taeda* encontraram R^2_{aj} de 0,88 e $Syx\%$ de 11,59 %, obtendo menor Coeficiente de Determinação Ajustado (R^2_{aj}) e maior Erro Padrão da Estimativa (Syx e $Syx\%$) em relação às funções de Hradetzky ($R^2_{aj} = 0,98$ e $Syx\% = 7,92$ %) e Schöpfer ($R^2_{aj} = 0,97$ e $Syx\% = 8,10$ %). Além disso, apresentou maior tendenciosidade, ora subestimando, ora superestimando os diâmetros estimados, não sendo recomendada para estimativa do diâmetro ao longo do fuste de *Pinus taeda* (Yoshitani Junior *et al.*, 2012).

Silva, Corte e Sanquetta (2011), ao avaliarem o desempenho de funções de afilamento, em diferentes classes de diâmetro de *Pinus caribaea*, na região do Triângulo Mineiro, concluíram que equação de Kozak apresentou tendenciosidade ao longo de todo o fuste na estimativa dos diâmetros. Por essa razão os autores não recomendam sua utilização para a espécie no local de estudo. No entanto, diferente do resultado encontrado por Silva, Dalla Corte e Sanquetta (2011), e Yoshitani Junior *et al.* (2012), a função possui ajuste adequado e desempenho satisfatório para *Araucaria angustifolia* nas condições do presente estudo. Desempenho esse muito similar ao desempenho da função de Schöpfer.

Todos os ajustes apresentaram resíduos com homocedasticidade em diâmetros estimados superiores a 10 cm e tendendo a normalidade tanto para a função de Kozak (Figura 1), quanto para a de Schöpfer (Figura 2). Ao analisar a distribuição gráfica dos resíduos dos diâmetros estimados para a função de Kozak (Figura 1) e para a função de Schöpfer (Figura 2), observa-se uma maior dispersão dos resíduos em diâmetros inferiores a 10 cm, resultado semelhante ao encontrado por Martins *et al.* (2017b). Segundo os autores, isso ocorre devido ao afilamento abrupto da porção final do fuste natural da *Araucaria angustifolia*. Além disso, diferente da função de Schöpfer, percebe-se uma leve tendenciosidade da função de Kozak, superestimando diâmetros inferiores à 10 cm. Para a Florestal Gateados LTDA, toras com diâmetros inferiores à 12 cm de ponta fina não possuem grande importância econômica, pois são negociadas no mercado como material para processos, como celulose e biomassa. Portanto, essa tendência de errar os menores diâmetros (ponta fina), não interfere o planejamento da empresa.

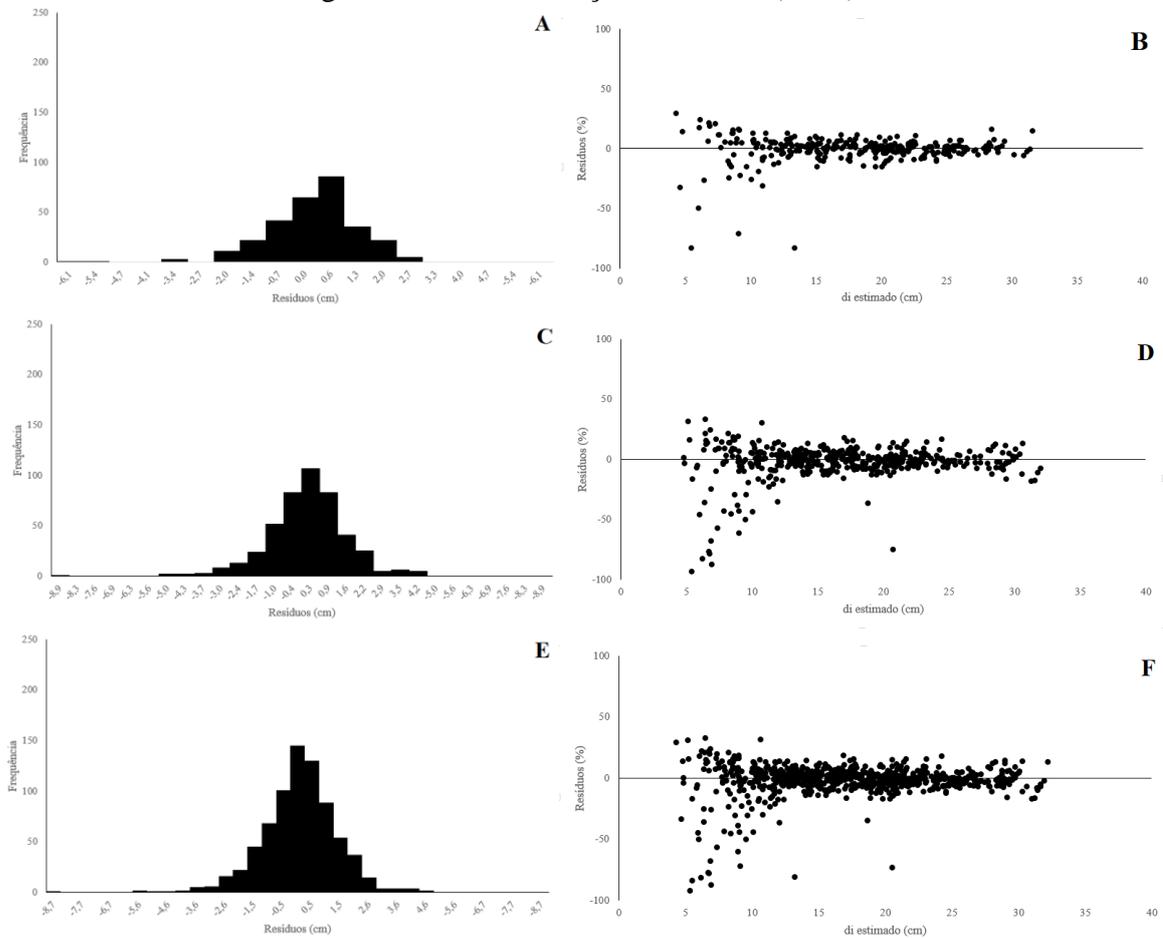
Tabela 6 – Estatísticas de ajuste para as funções de Kozak e Schöpfer nos dois estratos de amostragem e área total.

Estrato	Parâmetros estimados						Valor-p	R ² _{aj}	Syx(%)
	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5			
Kozak									
Chata	0,7811* (0,0064)	- 0,9249* (0,0439)	0,1999* (0,0492)	-	-	-	< 0,001*	0,96	7,25
Potreiro	0,8265* (0,0077)	- 1,0905* (0,0537)	0,3245* (0,0614)	-	-	-	< 0,001*	0,94	9,16
Total	0,8089* (0,0054)	- 1,0260* (0,0372)	0,2759* (0,0422)	-	-	-	< 0,001*	0,95	8,45
Schöpfer									
Chata	0,9196* (0,0076)	- 1,8731* (0,2347)	8,8241* (1,7133)	- 22,0774* (4,7887)	23,7467* (5,6361)	- 9,3938* (2,3515)	< 0,001*	0,97	6,49
Potreiro	0,9593* (0,0075)	- 2,5759* (0,2311)	13,3186* (1,6960)	- 34,2820* (4,7663)	38,2517* (5,6461)	- 15,6331* (2,3735)	< 0,001*	0,96	7,86
Total	0,9436* (0,0055)	- 2,2846* (0,1703)	11,3767* (1,2460)	- 28,8442* (3,4919)	31,6369* (4,1230)	- 12,7371* (1,7269)	< 0,001*	0,96	7,40

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Legenda: β_0 , β_1 , β_2 , β_3 , β_4 e β_5 = parâmetros estimados com seu erro padrão entre parênteses; Valor-p= valor p do modelo; R²_{aj}= Coeficiente de Determinação Ajustado do modelo; Syx(%) = Erro Padrão Relativo da Estimativa; *Parâmetros significativos estatisticamente ao nível de significância de 0,05.

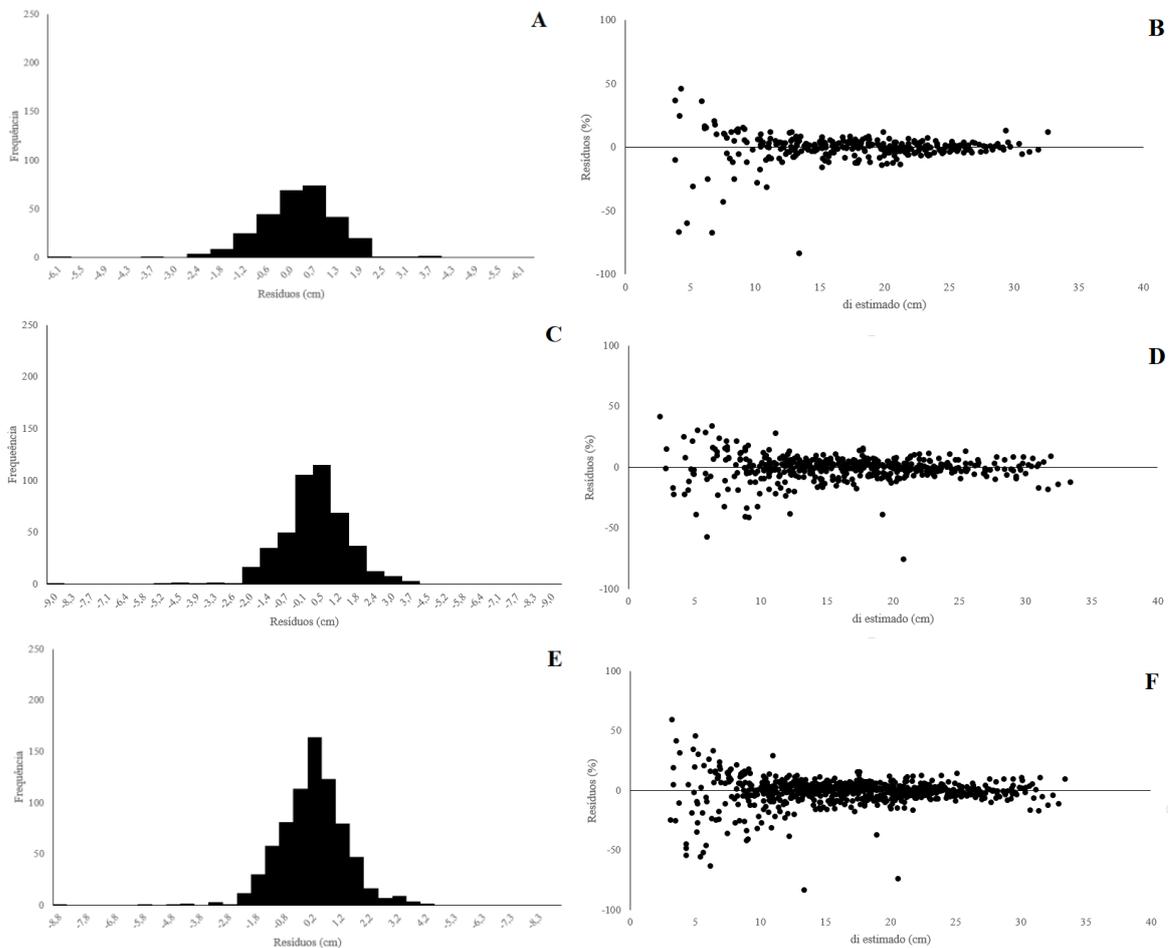
Figura 1 – Análise gráfica dos resíduos para avaliação do atendimento dos pressupostos da regressão linear da função de Kozak (1966).



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Legenda: Os gráficos da esquerda são relacionados à avaliação da normalidade dos resíduos (frequência da distribuição dos resíduos) e os gráficos da direita relacionados à avaliação da homocedasticidade (distribuição dos resíduos em porcentagem em função dos diâmetros estimados). Resíduos pertencentes ao modelo ajustado ao estrato Chata (A e B), resíduos pertencentes ao modelo ajustado ao estrato Potreiro (C e D) e resíduos pertencentes ao modelo ajustado à área total (E e F).

Figura 2 – Análise gráfica dos resíduos para avaliação do atendimento dos pressupostos da regressão linear do modelo de Schöpfer (1969).



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Legenda: Os gráficos da esquerda são relacionados à avaliação da normalidade dos resíduos (frequência da distribuição dos resíduos) e os gráficos da direita relacionados à avaliação da homocedasticidade (distribuição dos resíduos em porcentagem em função dos diâmetros estimados). Resíduos pertencentes ao modelo ajustado ao estrato Chata (A e B), resíduos pertencentes ao modelo ajustado ao estrato Potreiro (C e D) e resíduos pertencentes ao modelo ajustado à área total (E e F).

4.2 TESTE DE IDENTIDADE DE MODELOS

No teste de identidade de modelos de Graybill (Tabela 7) a diferença das somas de quadrados totais dos modelos completos e do modelo reduzido, para as duas funções avaliadas, apresentou diferença estatística significativa (nível de significância de $\alpha = 0,05$) em todas as análises. Com isso, conclui-se que é necessário, tanto para Kozak, como para Schöpfer, modelos completos, específicos para cada estrato.

Um dos fatores que pode ter influenciado esse resultado é a idade, já que esse é um fator que influencia na forma do fuste (Araújo, 2015; Figueiredo Filho *et al.*, 2015; Martins *et al.*, 2017a, Martins *et al.*, 2017b). Figueiredo Filho *et al.* (2015), citando os trabalhos de Burguer *et al.* (1980), Machado (1982) e Friedl (1989), afirmam que a idade tem efeito altamente significativo no comportamento da forma do fuste de *Araucaria angustifolia*, aumentando a qualidade do ajuste com o aumento da idade, principalmente em araucárias dominantes em plantações comerciais, pois sua forma se torna mais homogênea à medida que a idade aumenta. Entretanto, apesar da diferença de idade entre os estratos, essa diferença é de apenas um ano. Portanto, a idade pode não ter sido o fator determinante ou pelo menos o fator com principal influência.

Outro fator que pode ter tido maior influência foi o espaçamento, o qual determina a densidade do povoamento (Finger *et al.*, 1995). De acordo com Cerqueira, Môra e Tonini (2017), citando Larson (1963), árvores que crescem em povoamentos menos densos possuem fuste mais cônico, fato que é associado ao acréscimo do comprimento de copa. Ferreira *et al.* (2014) constataram que plantios mais adensados geraram árvores com comprimento de copa menor devido a maior competição, conseqüentemente produzindo árvores mais cilíndricas quando comparados à forma de árvores de plantios menos adensados.

Segundo Martins *et al.* (2017a), a menor competição – fator esse causado por espaçamentos maiores – acaba por tornar o crescimento mais irregular, afetando a forma do fuste de *Araucaria angustifolia*. Nogueira *et al.* (2008) ao analisarem o efeito do espaçamento na forma do fuste de árvores de *Pinus taeda* verificaram que os menores espaçamentos resultaram em forma menos cônica que os maiores espaçamentos.

Cerqueira, Môra e Tonini (2017) avaliaram o efeito do espaçamento e arranjo de plantio na forma do fuste de *Eucalyptus* por meio do teste de identidade de Graybill e constataram que a forma do fuste se alterou de forma significativa ($\alpha = 0,05$) entre os diferentes espaçamentos estudados. Vendruscolo *et al.* (2016) avaliando o efeito do espaçamento de plantio na forma do fuste de árvores de *Tectona grandis* concluíram que espaçamentos menores apresentaram árvores mais cilíndricas em relação aos espaçamentos maiores. Entretanto, ainda são necessários novos estudos para elucidar os fatores que influenciam na forma do fuste de árvores de *Araucaria angustifolia* em plantios comerciais no Sul do Brasil.

Tabela 7 – Teste de identidade de modelos por meio de Análise de Variância e teste F de Graybill para os modelos de Kozak e Schöpfer, ajustados para os estratos e para área total.

Kozak						
FV	GL	SQ	QM	F_{calculado}	F_{tabelado}	Valor-p
Completo	4	261,4946	-	-	-	-
Reduzido	2	261,3629	-	-	-	-
Diferença	2	0,1316	0,0658	9,1180	3,0076	1,22x10 ^{-04*}
Resíduo	755	5,4492	0,0072	-	-	-
Total	759	266,9438	-	-	-	-
Schöpfer						
FV	GL	SQ	QM	F_{calculado}	F_{tabelado}	p-value
Completo	10	400,6976	-	-	-	-
Reduzido	5	400,6256	-	-	-	-
Diferença	5	0,0719	0,0143	5,2823	2,2260	8,89x10 ^{-05*}
Resíduo	749	2,0411	0,0027	-	-	-
Total	759	402,7388	-	-	-	-

Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Legenda: F_{calculado} = valor F calculado (QM_{dif}/QM_{Res}); F_{tabelado} = valor F tabelado (0,05, v1= GL_{dif}, v2= GL_{Res}), Valor-p= valor de p para a ANOVA; *Parâmetros significativos estatisticamente ao nível de significância de 0,05.

4.3 VALIDAÇÃO DOS MODELOS

A validação foi realizada pela aplicação dos modelos completos na base de dados independente de validação para os dois estratos, Chata e Potreiro (Tabela 8). Nos dois estratos a função de Schöpfer (1966) apresentou menor Erro Padrão da Estimativa (Syx e Syx%), sendo 1,28 cm (Syx) e 7,47 % (Syx%) no estrato Chata e, 1,73 cm (Syx) e 9,58 % (Syx%) no estrato Potreiro. Entretanto, essa diferença é pouco notável e os resultados para as duas funções podem ser considerados similares.

Tabela 8 – Estatísticas de validação para o modelo de Kozak e Schöpfer para os dois estratos utilizando os modelos completos.

Estrato	Função	Modelo	Syx (cm)	Syx (%)
Chata	Kozak	Completo	1,28	7,52
	Schöpfer	Completo	1,28	7,47
Potreiro	Kozak	Completo	1,86	10,34
	Schöpfer	Completo	1,73	9,58

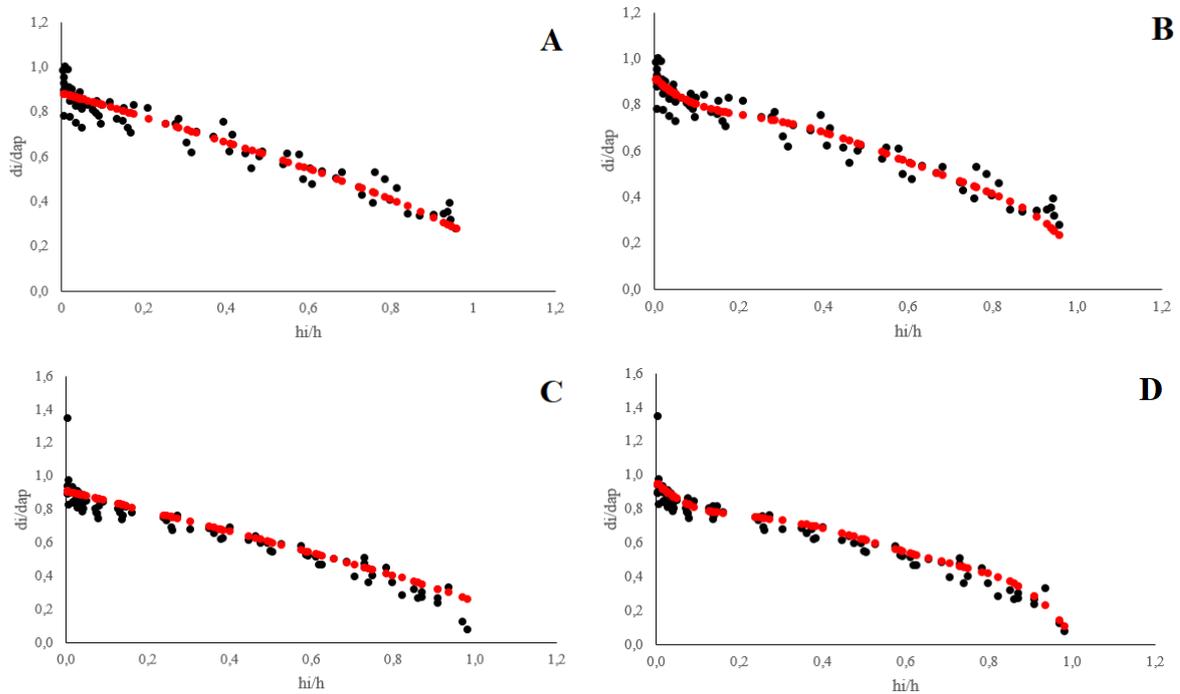
Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Legenda: Estrato = local; Função = funções de afilamento; Modelo = modelos completos e o modelo reduzido; Syx (cm) = erro padrão absoluto da estimativa; Syx (%) = erro padrão relativo da estimativa.

Adicionalmente, foram construídos gráficos do perfil do fuste para o estrato Chata e para o estrato Potreiro (Figura 3) com os modelos completos para verificar o desempenho dos diferentes modelos em descrever o perfil do fuste das árvores. Os gráficos foram desenvolvidos pela relação entre o diâmetro relativo (d_i/d_{ap}) em função da altura relativa (h_i/h).

Há diferenças notáveis entre as funções, sobretudo na descrição da base, na qual a de Schöpfer se adaptou melhor aos dados. Nota-se também, uma maior adaptabilidade das funções no estrato Chata, principalmente para a função de Kozak, a qual, no estrato Potreiro, superestima os diâmetros no topo do fuste (ponta fina).

Figura 3 – Análise gráfica do perfil do fuste descrito pela função de Kozak e Schöpfer para os dois estratos com o modelo completo.



Fonte: Elaborado pelo autor (2023).

Legenda: Gráficos superiores = estrato Chata (A e B); gráficos inferiores = estrato Potreiro (C e D); gráficos do lado esquerdo = função de Kozak (A e C); gráficos do lado direito = função de Schöpfer (B e D) pontos pretos = d_i (valores dos diâmetros observados) e d_{ap} (diâmetro à altura do peito, 1,3m), h_i (alturas ao longo do fuste) e h (altura total do fuste); pontos vermelhos = d_i (valores dos diâmetros estimados pelos modelos) e d_{ap} (diâmetro à altura do peito, 1,3m), h_i (alturas ao longo do fuste) e h (altura total do fuste).

O estrato Chata foi o estrato no qual as funções geraram as melhores estimativas tanto no ajuste quanto na validação, com maior R^2_{aj} e menor Erro Padrão da Estimativa (S_{yx} e $S_{yx}\%$). Isso pode ser explicado pelos resultados encontrados na análise exploratória dos dados observados, nos quais, o estrato Chata apresentou menor variabilidade (CV) do d_{ap} com casca, da altura total do fuste (h) e dos diâmetros observados ao longo do fuste.

5 CONCLUSÃO

Ambas as funções, a de Schöpfer (1966) e a de Kozak *et al.* (1969), apresentaram adequabilidade e boa acurácia para a estimativa do afilamento do fuste de *Araucaria angustifolia*. A função de Kozak apesar de apresentar tendenciosidade na ponta fina é adequada para estimar os diâmetros superiores a 10 cm.

Apesar da função de Schöpfer ter tido os melhores ajustes em todas as ocasiões, a máxima diferença entre o Erro Padrão Relativo da Estimativa (Syx%) entre as duas funções foi de apenas 1,3%. Portanto, levando em consideração o princípio da parcimônia (*Lex Parcimoniae*), recomenda-se a utilização da função Kozak – devido sua maior simplicidade – para modelar o fuste de *Araucaria angustifolia*, em plantios comerciais, na Serra Catarinense em idades próximas as das árvores utilizadas no presente estudo.

O teste de identidade de Graybill (1976), para os modelos testados, revelou que são necessários modelos completos (específicos) para cada um dos estratos. A necessidade de modelos completos e específicos, nesse caso, pode derivar principalmente da diferença de densidade de plantio entre os estratos.

REFERÊNCIAS

- ANDRADE, Valdir Carlos Lima de. 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. 271-283, 30 dez. 2014. Embrapa Florestas. <http://dx.doi.org/10.4336/2014.pfb.34.80.614>.
- ANDRADE, Valdir Carlos Lima de; TERRA, David Lucas Camargo Vieira; CARVALHO, Samuel de Pádua Chaves e. Análise de regressão do perfil do fuste de *Corymbia citriodora* formado em área de Cerrado. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 32, n. 3, p. 1500-1527, 22 set. 2022. Universidade Federal de Santa Maria. <http://dx.doi.org/10.5902/1980509866721>.
- ARAÚJO, Breno Henrique Pedroso de. **Modelagem da altura, volume e afilamento do fuste de *Calycophyllum spruceanum* Benth. empregando regressão e redes neurais artificiais**. 2015. 53 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Florestal, Ciências de Florestas Tropicais, Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia - INPA, Manaus, 2015.
- BEHRE, Edward C. Preliminary Notes on Studies of Tree Form. **Journal Of Forestry**, Oxford, v. 21, n. 5, p. 507-511, 01 maio 1923.
- BOGNOLA, Itamar Antonio *et al.* Modelagem uni e bivariada da variabilidade espacial de rendimento de *Pinus taeda* L. **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 2, p. 373-385, jun. 2008.
- CAMPOS, João Carlos Chagas; LEITE, Hélio Garcia. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 2. ed. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2006, 196 p.
- CARVALHO, Paulo Ernani Ramalho. **Espécies Arbóreas Brasileiras**. Colombo, PR: Embrapa Florestas, vol.1, 2003. 1039 p.
- CERQUEIRA, Clebson Lima; MÔRA, Rômulo; TONINI, Helio. Forma do fuste de eucalipto em diferentes arranjos de plantio e espaçamentos. **Advances In Forestry Science**, Cuiabá, v. 4, n. 3, p. 137-141, 30 set. 2017.
- CERQUEIRA, Clebson Lima *et al.* Modeling of eucalyptus tree stem taper in mixed production systems. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 49, n. 130, p. 1-14, 1 jun. 2021. Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais (IPEF). <http://dx.doi.org/10.18671/scifor.v49n130.22>.
- COSTA, Emanuel Arnoni *et al.* Função de afilamento e sortimentos de madeira para *Araucaria angustifolia*. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 26, n. 2, p. 523-533, 20 jun. 2016. <http://dx.doi.org/10.5902/1980509822753>.
- DAVID, Hassan Camil *et al.* Critérios de estratificação para o ajuste de funções de afilamento em fustes de *Pinus*. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 34, n. 79, p. 197, 15 set. 2014. Embrapa Florestas. <http://dx.doi.org/10.4336/2014.pfb.34.79.659>.
- DOBNER JÚNIOR, Mário; HIGA, Antonio Rioyei; ROCHA, Márcio Pereira da. Rendimento em Serraria de Toras de *Pinus taeda*: sortimentos de grandes dimensões. **Floresta e**

Ambiente, Seropédica, v. 19, n. 3, p. 385-392, set. 2012. FapUNIFESP (SciELO).
<http://dx.doi.org/10.4322/floram.2012.053>.

EPAGRI. **Zoneamento agroecológico e socioeconômico do Estado de Santa Catarina**. Disponível em:
https://circam.epagri.sc.gov.br/circam_arquivos/estrato/documentos/ZonAgroecoMapas.pdf.
 Acesso em: 06 nov. 2023.

FAVALESSA, Cyro Matheus Cometti *et al.* Funções de afilamento não segmentadas e segmentadas para *Tectona grandis* na região centro-sul matogrossense. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 32, n. 72, p. 373-387, 28 dez. 2012. Embrapa Florestas.
<http://dx.doi.org/10.4336/2012.pfb.32.72.373>.

FERREIRA, Gabriel William Dias *et al.* Influência do desbaste na forma do fuste de povoamentos naturais de *Eremanthus incanus* (Less.) Less. **Semina: Ciências Agrárias**, Londrina, v. 35, n. 4, p. 1707-1720, ago. 2014.

FERREIRA, Maria Zélia. **Estudo de funções de afilamento para representar o perfil e o volume do fuste de *Pinus taeda* L.** 2004. 200 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Florestal, Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2004.

FIGUEIREDO FILHO, Afonso; BORDERS, Bruce E.; HITCH, Kenneth L. Taper equations for *Pinus taeda* plantations in Southern Brazil. **Forest Ecology And Management**, Flagstaff, v. 83, n. 1-2, p. 39-46, jun. 1996a. Elsevier BV. [http://dx.doi.org/10.1016/0378-1127\(96\)03706-1](http://dx.doi.org/10.1016/0378-1127(96)03706-1).

FIGUEIREDO FILHO, Afonso; BORDERS, Bruce E.; HITCH, Kenneth L. Number of diameters required to represent stem profiles using interpolated cubic splines. **Canadian Journal Of Forest Research**, Ottawa, v. 26, n. 7, p. 1113-1121, 1 jul. 1996b. Canadian Science Publishing. <http://dx.doi.org/10.1139/x26-124>.

FIGUEIREDO FILHO, Afonso *et al.* Efeito da Idade no Afilamento e Sortimento em Povoamentos de *Araucaria angustifolia*. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 22, n. 1, p. 50-59, mar. 2015. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.080114>.

FINGER, Cezar Augusto Guimarães *et al.* 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, Fernando *et al.* 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, 30 mar. 2001. Universidade Federal de Santa Maria. <http://dx.doi.org/10.5902/19805098503>.

HOPPE, Juarez Martins; FREDDO, Álvaro Rodrigo. Efeito da intensidade de desrama na produção de *Pinus elliottii* Engelm. no município de Piratini, RS. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 13, n. 2, p. 47-56, 30 jun. 2003. Universidade Federal de Santa Maria. <http://dx.doi.org/10.5902/198050981741>.

IMAGUIRE, Nobor. Condições ambientais para a *Araucaria angustifolia* Bert. O. Ktze. **Dusenía**, Curitiba, v. 11, n. 3, p. 121-127, 1979.

INOUE, Mário Takao *et al.* Crescimento juvenil de *Pinus taeda* em função do espaço vital de crescimento. **Floresta**, Curitiba, v. 41, n. 1, p. 57-62, jan. - mar. 2011.

JIANG, Jun *et al.* A Comparative Evaluation of Three Stem Profile Equations for Three Precious Tree Species in Southern China. **Forests**, Basel, v. 11, n. 6, p. 669, 11 jun. 2020. MDPI AG. <http://dx.doi.org/10.3390/f11060669>.

KOHLER, Sintia Valerio; KOEHLER, Henrique Soares; FIGUEIREDO FILHO, Afonso. Modelos de Afilamento para *Pinus taeda* por Classes de Idade. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 20, n. 4, p. 470-479, dez. 2013. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.4322/loram.2013.039>.

KOHLER, Sintia Valerio *et al.* Evolução do sortimento em povoamentos de *Pinus taeda* nos estados do Paraná e Santa Catarina. **Floresta**, Curitiba, v. 45, n. 3, p. 545-554, 24 jan. 2015. Universidade Federal do Paraná. <http://dx.doi.org/10.5380/rf.v45i3.35746>.

LANSSANOVA, Luciano Rodrigo *et al.* 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, abril/junho, 2013.

MACHADO, Sebastião do Amaral *et al.* 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, v. 1, n. 48, p. 41-64, jan. - jun. 2004.

MACHADO, Sebastião Amaral; FIGUEIREDO FILHO, Afonso. **Dendrometria**. 2. ed. Guarapuava, PR: UNICENTRO, 2009, 316p.

MARTINS, Ana Paula Marques *et al.* Estimativa do afilamento do fuste de Araucária utilizando técnicas de Inteligência Artificial. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 24, n. 1, p. 1-10, 2017a. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/2179-8087.023416>.

MARTINS, Ana Paula Marques *et al.* Efeito da idade na forma do fuste de *Araucaria angustifolia* na região Centro-Sul do Paraná. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v. 37, n. 90, p. 109-117, 30 jun. 2017b. Embrapa Florestas. <http://dx.doi.org/10.4336/2017.pfb.37.90.1329>.

MEDINA-MACEDO, Luciano *et al.* Using genetic diversity and mating system parameters estimated from genetic markers to determine strategies for the conservation of *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Kuntze (Araucariaceae). **Conservation Genetics**, v. 17, n. 2, p. 413-423, jan. 2016.

MENDONÇA, Nathalia de Paiva *et al.* Previsão de diâmetros ao longo do fuste de eucalipto via redes neurais artificiais. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 11, n. 22, p. 2419-2429, 8

dez. 2015. Centro Científico Conhecer.

http://dx.doi.org/10.18677/enciclopedia_biosfera_2015_212.

MIGUEL, Eder Pereira *et al.* Modelos polinomiais para representar o perfil e o volume do fuste de *Eucalyptus urophylla* na região norte do estado de Goiás. **Floresta**, Curitiba, v. 41, n. 2, p. 355-368, abr. - jun. 2011.

NICOLETTI, Marcos Felipe *et al.* Quantificação do fator de forma por meio de diferentes métodos de cubagem em *Pinus taeda* L. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 49, n. 131, p. 1-12, 1 set. 2021. Instituto de Pesquisa e Estudos Florestais (IPEF).

<http://dx.doi.org/10.18671/scifor.v49n131.06>.

NOGUEIRA, Gilciano Saraiva *et al.* Influência do espaçamento inicial sobre a forma do fuste de árvores de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 32, n. 5, p. 855-860, 22 ago. 2008.

NUNES, Matheus Henrique; GÖRGENS, Eric Bastos. Artificial Intelligence procedures for tree taper estimation within a complex vegetation mosaic in Brazil. **Plos One**, Berkeley, v. 11, n. 5, p. 1-16, 17 maio 2016. doi:10.1371/journal.pone.0154738.

PERTILLE, Carla Talita; NICOLETTI, Marcos Felipe; DOBNER JÚNIOR, Mario.

Estimating the commercial volume of a *Pinus taeda* L. plantation using active and passive sensors. **Cerne**, Lavras, v. 29, e-103108, 2023. FapUNIFESP (SciELO).

<http://dx.doi.org/10.1590/01047760202329013108>.

QUEIROZ, Daniel *et al.* Identidade de modelos em funções de afilamento para *Mimosa scabrella* Benth em povoamentos nativos da região metropolitana de Curitiba/PR. **Floresta**, Curitiba, v. 38, n. 2, p. 339-349, abr. - jun. 2008.

R Core Team (2022). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria. URL <https://www.R-project.org/>.

RIBEIRO, Renato Bezerra da Silva; GAMA, João Ricardo Vasconcellos; MELO, Lia de Oliveira. Seccionamento para cubagem e escolha de equações de volume para a Floresta Nacional do Tapajós. **Cerne**, Lavras, v. 20, n. 4, p. 605-612, dez. 2014. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.1590/01047760201420041400>.

SANQUETTA, Carlos Roberto *et al.* **Inventários florestais: planejamento e execução**. 3. ed. Curitiba: Multi-Grafic Gráfica e Editora, 2014. 406 p.

SANQUETTA, Carlos Roberto *et al.* Estimação de volumes de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) O. Kuntze por fatores de forma em classes diamétricas e modelos de regressão. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 13, n. 23, p. 588-597, 22 jun. 2016. Centro Científico Conhecer. http://dx.doi.org/10.18677/enciclopedia_biosfera_2016_052.

SANQUETTA, Mateus Niroh Inoue *et al.* What factors should be accounted for when developing a generalized taper function for black wattle trees? **Canadian Journal Of Forest Research**, Ottawa, v. 50, n. 11, p. 1113-1123, nov. 2020. Canadian Science Publishing.

<http://dx.doi.org/10.1139/cjfr-2020-0163>.

- SANTOS, Guilherme Maia dos *et al.* Modelagem mista generalizada para estimar afilamento do fuste de árvores de *Pinus taeda* em diferentes espaçamentos de plantio. **Advances In Forestry Science**, Cuiabá, v. 8, n. 1, p. 1261-1269, 30 jun. 2021.
- SCHRÖDER, Thomas; PEREIRA, LÍlian Daniel; HOFIÇO, Noé dos Santos Ananias. Comparação de métodos de estimativa de volume total para *Eucalyptus grandis* W. Hill ex Maiden. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 20, n. 4, p. 480-486, dez. 2013. FapUNIFESP (SciELO). <http://dx.doi.org/10.4322/floram.2013.041>.
- SCOLFORO, José Roberto Soares. **Biometria Florestal**: modelagem do crescimento e da produção de florestas plantadas e nativas. Lavras: UFLA/ FAEPE, 1998, 451 p.
- SCOLFORO, José Roberto Soares; MELLO, José Márcio de. **Inventário florestal**. Lavras, MG: UFLA/FAEPE, 2006, 561 p.
- SILVA, Fernando da; CORTE, Ana Paula dalla; SANQUETTA, Carlos Roberto. 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, set. 2011.
- SOARES, Carlos Pedro Boechat; PAULA NETO, Francisco de; SOUZA Agostinho Lopes de. **Dendrometria e Inventário Florestal**. 2. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2011. 272 p.
- SOARES, Thelma Shirlen *et al.* Otimização de multiprodutos em povoamentos florestais. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 27, n. 6, p. 811-820, 4 nov. 2003.
- SOUZA, Carlos Alberto Martinelli de. **Avaliação de modelos de taper não segmentados e segmentados na estimação da altura e volume comercial de fustes de *Eucalyptus sp.*** 2007. 107 f. Dissertação (Mestrado) - Curso de Engenharia Florestal, Centro de Ciências Agrárias, Universidade Federal do Espírito Santo, Alegre, 2007.
- SOUZA, Carlos Alberto Martinelli de *et al.* Modelos de afilamento para o sortimento do fuste de *Pinus taeda* L. **Ciência Rural**, Santa Maria, v. 38, n. 9, p. 2506-2511, dez. 2008.
- SOUZA, Carlos Alberto Martinelli de *et al.* 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, jan. - mar. 2012.
- SOUZA, Carlos Alberto Martinelli. Modelos de afilamento para *Pinus taeda* l. baseados em pontos de mudança de forma. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.26, n. 4, p. 1239-1246, out. - dez., 2016.
- STERNADT, G. H. **Cubagem de toras de mogno**: comparação do processo do IBAMA e o adotado por madeireiras. Brasília, DF: IBAMA, 2001. 100 p.
- TÉO, Saulo Jorge *et al.* Stem taper equation with extensive applicability to several age classes of *Pinus taeda* L. **Floresta**, Curitiba, v. 48, n. 4, p. 471-482, out. - dez. 2018.

VENDRUSCOLO, Diogo Guido Streck *et al.* Forma do fuste de árvores de *Tectona grandis* em diferentes espaçamentos. **Advances In Forestry Science**, Cuiabá, v. 3, n. 3, p. 51-54, 30 set. 2016.

YOSHITANI JUNIOR, Mauro *et al.* Funções de afilamento para plantios desbastados de *Pinus taeda*. **Floresta**, Curitiba, v. 42, n. 1, p. 169-176, 28 mar. 2012. Universidade Federal do Paraná. <http://dx.doi.org/10.5380/uf.v42i1.26315>.