

**UNIVERSIDADE FEDERAL DE SANTA MARIA  
CENTRO DE CIÊNCIAS RURAIS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM  
ENGENHARIA FLORESTAL**

**INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS E  
MORFOMÉTRICAS DA COPA NO INCREMENTO  
PERIÓDICO DE *Araucaria angustifolia* (Bertol.)  
Kuntze, LAGES, SC.**

**DISSERTAÇÃO DE MESTRADO**

**Emanuel Arnoni Costa**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2011**



**INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS E  
MORFOMÉTRICAS DA COPA NO INCREMENTO  
PERIÓDICO DE *Araucaria angustifolia* (Bertol.)  
Kuntze, LAGES, SC.**

**Emanuel Arnoni Costa**

Dissertação apresentada ao Curso de Mestrado do Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, Área de Concentração em Manejo Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia Florestal**

**Orientador: Prof. Dr. César Augusto Guimarães Finger**

**Santa Maria, RS, Brasil**

**2011**

C837i Costa, Emanuel Arnoni  
Influência de variáveis dendrométricas e morfométricas da copa no incremento periódico de Araucaria angustifolia (Bertol.) Kuntze, Lages, SC / por Emanuel Arnoni Costa. – 2011.  
140 f. ; il. ; 30 cm

Orientador: César Augusto Guimarães Finger  
Dissertação (mestrado) – Universidade Federal de Santa Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2011

1. Modelagem 2. Floresta de Araucária 3. Incremento periódico I. Finger, César Augusto Guimarães II. Título.

CDU 630.5

**Universidade Federal de Santa Maria  
Centro de Ciências Rurais  
Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal**

A Comissão Examinadora, abaixo assinada,  
aprova a Dissertação de Mestrado

**INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS  
E MORFOMÉTRICAS DA COPA NO INCREMENTO  
PERIÓDICO DE *Araucaria angustifolia* (Bertol.)  
Kuntze, LAGES, SC.**

elaborada por

**Emanuel Arnoni Costa**

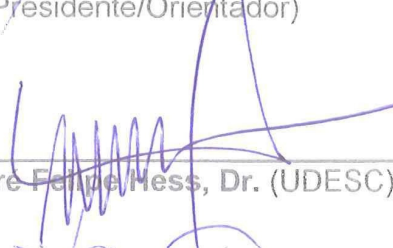
como requisito parcial para obtenção do grau de  
**Mestre em Engenharia Florestal**

**COMISSÃO EXAMINADORA:**



---

**César Augusto Guimarães Finger, Dr.**  
(Presidente/Orientador)



---

**André Felipe Mess, Dr. (UDESC)**



---

**José Antônio Aleixo da Silva, Ph.D (UFRPE)**

Santa Maria, 01 de agosto de 2011.



*Aos meus pais, avós e irmãos,*

DEDICO.





## AGRADECIMENTOS

Ao orientador, Prof. Dr. César Augusto Guimarães Finger, por sua orientação, seus ensinamentos, bem como a dedicação em todas as fases deste trabalho.

Aos professores co-orientadores, Dr. Frederico Dimas Fleig, Dr. Paulo Renato Schneider, Dr. Solon Jonas Longhi, pelas sábias sugestões apresentadas.

Aos meus pais e seus cônjuges, pelo amor, pelo carinho nos momentos mais difíceis, sempre torcendo e apoiando-me na concretização dos meus objetivos.

A todos os meus familiares, em especial, aos meus avôs, Ary do Amaral Costa *In memoriam* e Marizete Ribeiro Costa, que contribuíram diretamente na construção do meu caráter.

Ao Prof. Dr. André Felipe Hess, pelo seu respeito e constante incentivo e pela amizade.

Ao Engenheiro Florestal, M.Sc. Thiago Cunha, pelo apoio e pelas sugestões apresentadas.

Ao Prof. Ph.D José Antônio Aleixo da Silva, pela disponibilidade em contribuir com este trabalho.

A Dr. Orli Souza, pelo fornecimento da propriedade rural para o levantamento dos dados que, conseqüentemente, permitiu a realização desta pesquisa.

Aos meus amigos, em especial, a Fellipe Costa, Heber Savedra, Kenner Portella, Paulo Pucci e Telmo Quadros, pela verdadeira amizade cultivada ao longo destes anos. Obrigado a vocês pela ajuda durante a coleta dos dados.

Enfim, a todos os professores, colegas, amigos que, de alguma forma, colaboraram para que eu vencesse mais este desafio.



## RESUMO

Dissertação de Mestrado  
Programa de Pós-Graduação Engenharia Florestal  
Universidade Federal de Santa Maria, RS, Brasil

### **INFLUÊNCIA DE VARIÁVEIS DENDROMÉTRICAS E MORFOMÉTRICAS DA COPA NO INCREMENTO PERIÓDICO DE *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze, LAGES, SC.**

AUTOR: EMANUEL ARNONI COSTA

ORIENTADOR: CÉSAR AUGUSTO GUIMARÃES FINGER

Data e Local da Defesa: Santa Maria, 01 de Agosto de 2011.

A influência das variáveis dendrométricas e morfométricas no incremento periódico em área basal foi avaliado em árvores individuais de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze em Lages, Santa Catarina, tendo como objetivos selecionar um modelo para estimar a altura total, o diâmetro de copa, comparar métodos para o cálculo da área de projeção de copa, modelar relações morfométricas em função do diâmetro e desenvolver um modelo de incremento periódico em área basal. Aleatoriamente, escolheram-se 85 árvores denominadas objetivo, considerando com menor centro de classe de diâmetro 10 cm e máximo 80 cm, com amplitude de 10 cm, e, no mínimo, oito árvores por classe diamétrica. Mediram-se, nas árvores objetivo e nos seus competidores, as variáveis dendrométricas, morfométricas e estas foram classificadas segundo a sua posição sociológica em dominante, codominante e dominada. O processamento dos dados foi realizado pelo *software* estatístico SAS (*Statistical Analysis System*) versão 9.1. Para a altura total, testaram-se oito modelos e, para o diâmetro de copa cinco, selecionando-se o melhor por posição social. Optou-se escolher um modelo que melhor representasse todas as posições sociológicas e, em seguida, realizou-se a análise de covariância e o ajuste de regressão com variáveis Dummy que descreveu, por modelo único, todas as posições sociais. Avaliaram-se métodos para o cálculo de área de copa por classe social, considerando a medição de oito, quatro e dois raios de copa. Fez-se a modelagem das relações morfométricas para as seguintes variáveis: proporção de copa, formal de copa, grau de esbeltez, índice de abrangência e índice de saliência. Na modelagem do incremento periódico em área basal, relacionaram-se as variáveis dendrométrica e morfométrica mais correlacionadas com as variáveis Dummy que estratificaram as classes sociais. Foram encontradas 193 árvores dominantes, 40 codominantes e 61 dominadas com total de 294 árvores. A altura total foi estimada pelo modelo de Backman modificado com variáveis Dummy (D1) árvores codominantes e (D2) árvores dominadas pela equação:  $\hat{h}_i = -45,1315 + 26,8011 \ln(d)_i - 2,6557 \ln^2(d)_i + 11,4939 D1_i + 17,7431 D2_i - 3,1863 (\ln(d)D1)_i - 5,1816 (\ln(d)D2)_i$  com um  $R_{aj.}^2 = 0,6608$  e  $S_{yx}\% = 12,24\%$ . O diâmetro de copa foi estimado por modelo linear com variável dependente transformada pela raiz quadrada e variáveis Dummy para estratificar as árvores dominadas (D2) pela equação:  $\sqrt{\hat{dc}_i} = 1,6199 + 0,0342 (d)_i - 0,3004 D2_i + 0,0113 ((d)D2)_i$  com um  $R_{aj.}^2 = 0,8353$  e  $S_{yx}\% = 15,47\%$ . A área de projeção da copa com a medição de quatro raios pode ser empregada em copas simétricas por não haver perda de acurácia. Os modelos ajustados das relações morfométricas apresentaram variação, no entanto, foram significantes em função do diâmetro. O modelo de crescimento em área basal obteve como variáveis independentes: o formal de copa (FC), a proporção de copa para árvores dominantes (D8PC), o comprimento de copa para árvores dominantes (D8CC) e o grau de esbeltez (GE), com ajuste de  $R_{aj.}^2 = 0,8038$  e precisão de  $S_{yx}\% = 25,77\%$ , sendo expresso na equação:  $LN(\hat{IPg}\%) = 1,2859 - 0,2087 FC_i + 2,0878 GE_i - 0,2482 D8CC_i + 0,0586 D8PC_i$ . A dimensão da copa representada por formal de copa nas diferentes posições sociais, comprimento de copa e proporção de copa para árvores dominantes explicaram 76,21% da variação total do modelo de crescimento em área basal. As variáveis morfométricas, principalmente as que caracterizam o tamanho da copa, são eficientes para descrever o incremento periódico em área basal de araucária.

**Palavras-chave:** Modelagem. Floresta de Araucária. Incremento periódico.



# ABSTRACT

Master Dissertation  
Forest Engineering Post Graduation Program  
Federal University of Santa Maria, RS, Brazil

## INFLUENCE OF DENDOMETRY AND MORPHOMETRIC VARIABLES OF CROWN IN THE PERIODIC INCREASE OF *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze, LAGES, SC.

AUTHOR: EMANUEL ARNONI COSTA

ADVISOR: CÉSAR AUGUSTO GUIMARÃES FINGER

DATE AND LOCAL OF PRESENTATION: Santa Maria, August, 01, 2011.

The influence of morphometric and dendrometric variables in periodic increase in basal increment area was measured on individual trees of *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze in Lages, Santa Catarina having as objectives to select a model to estimate the total height, the diameter of the crown, to compare methods for the calculation of crown projection area, to model morphometric relations as a function of diameter and develop a model of periodic basal in area increment. Randomly was chosen 85 trees denominated goal, considering a lower center of class and a maximum diameter 10 cm 80 cm, with an amplitude of 10 cm, and at least eight trees per diameter class. Were measured in the object tree and its competitors, the dendrometric, and morphometric variables and these were classified according to their position in sociological dominant, codominant and dominated. The data processing was performed by SAS statistical software (Statistical Analysis System) version 9.1. For total height, was tested eight models, and for the five crown diameter, was selected the best for social status. It was decided to choose a model that best represent all sociological positions, and then there was the analysis of covariance and adjusting for regression with Dummy variables that described for single model, all social positions. Was evaluated methods for the calculation of crown area by social class, considering the measurement of eight, four and two radius crown. It was made the modeling of relationships for the following morphometric variables: the proportion of the crown, formal crown, degree of slenderness, index of range and index of salience. In the modeling of periodic increment in basal area were related the dendrometric and morphometric variables correlated more with that dummy variables stratified with social classes. Were found 193 dominant trees, 40 codominant and 61 dominated with a total of 294 trees. The total height was estimated by Backman model modified with dummy variables D1 and codominant trees D2 trees dominated by the equation:  $\hat{h}_i = -45,1315 + 26,8011 \ln(d)_i - 2,6557 \ln^2(d)_i + 11,4939 D1_i + 17,7431 D2_i - 3,1863 (\ln(d) D1)_i - 5,1816 (\ln(d) D2)_i$  with a  $R_{aj}^2 = 0,6608$  e  $S_{yx}\% = 12,24\%$ . The crown diameter was estimated by linear model with dependent variable transformed by square root and dummy variables to stratify the trees dominated D2 by the equation:  $\sqrt{\hat{dc}_i} = 1,6199 + 0,0342 (d)_i - 0,3004 D2_i + 0,0113 ((d) D2)_i$  with a  $R_{aj}^2 = 0,8353$  e  $S_{yx}\% = 15,47\%$ . The crown projection area with the measurement of four rays can be used in symmetric crown as there is no loss of accuracy. The adjusted models of the morphometric relationships presented variation, however, were significant in the diameter. The growth model in basal area obtained as independent variables: formal crown (FC), the proportion of dominant crown trees for (D8PC), the length of crown to dominant trees (D8CC) and the degree of slenderness (GE), with adjustment of:  $R_{aj}^2 = 0,8038$  e precisão de  $S_{yx}\% = 25,77\%$ , being expressed in the equation:  $\ln(\hat{IPg}\%) = 1,2859 - 0,2087 FC_i + 2,0878 GE_i - 0,2482 D8CC_i + 0,0586 D8PC_i$ . The size of the crown represented by formal crown in different social positions, length and crown ratio of dominant crown trees accounted for 76,21% of the total variation of the model of growth in basal area. The morphometric variables, especially those that characterize the size of the crown, are efficient to describe the periodic basal area increment of araucaria.

**Keywords:** Modeling. Araucaria Forest. periodic increment.



## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1- Modelo de árvore e suas características dimensionais. Fonte: Adaptado Assmann (1970). .....25
- Figura 2 - Esquema das combinações realizadas na análise de variância utilizando arranjo fatorial. ....35
- Figura 3 - Distribuição diamétrica por posição sociológica: dominante (PS1), codominante (PS2) e dominada (PS3), das árvores de araucária em Lages, SC.....48
- Figura 4 - Comportamento da relação hipsométrica por posição social: PS1 - dominante; PS2 - codominante; PS3 - dominada.....53
- Figura 5 - Desenvolvimento das curvas da relação hipsométrica para árvores de *Araucaria angustifolia* na posição sociológica dominante, codominante (D1) e dominada (D2) estimada com o modelo de Backman modificado com variáveis Dummy.....55
- Figura 6 - Comportamento do diâmetro de copa em função do diâmetro a altura do peito por posição social: dominante (PS1); codominante (PS2); dominada (PS3)...61
- Figura 7 - Desenvolvimento das linhas do diâmetro de copa para árvores de *Araucaria angustifolia* na posição sociológica dominante, codominante e dominada (D2) estimada pelo modelo linear simples com transformação na variável dependente em raiz quadrada com variáveis Dummy. ....63
- Figura 8 - Área de copa determinada pelos três métodos para as posições sociais: dominante (a); codominante (b) e dominada (c).....66
- Figura 9 - Teste de normalidade para a variável dependente: sem transformação na variável dependente Área de copa não seguindo uma distribuição normal (a); com transformação na variável dependente Área de copa<sup>0,267</sup> seguindo uma distribuição normal (b). .....67
- Figura 10 - Proporção de copa em função do diâmetro a altura do peito para árvores de *Araucaria angustifolia*, dominantes (a), codominantes (b), dominadas (c) e desconsiderando posição social (d). ....73
- Figura 11 - Desenvolvimento das linhas de regressão da proporção de copa para árvores de *Araucaria angustifolia* na posição sociológica dominante, codominante (D1) e dominada (D2) estimada pelo modelo parabólico com variáveis Dummy. ....76
- Figura 12 - Formal de copa em função do diâmetro a altura do peito para árvores de *Araucaria angustifolia*, dominantes (a), codominantes (b), dominadas (c) e desconsiderando posição social (d). ....79
- Figura 13 - Desenvolvimento das linhas de regressão do formal de copa para árvores de *Araucaria angustifolia* na posição sociológica dominante, codominante (D1) e dominada (D2) estimada pelo modelo linear simples com variáveis Dummy. 82

Figura 14 - Grau de esbeltez em função do diâmetro a altura do peito para árvores de <i>Araucaria angustifolia</i> , dominantes (a), codominantes (b), dominadas (c) e desconsiderando posição social (d).....	85
Figura 15 - Desenvolvimento das linhas de regressão do grau de esbeltez ou relação h/d para árvores de <i>Araucaria angustifolia</i> na posição sociológica dominante, codominante (D1) e dominada (D2) estimado pelo modelo logarítmico com variáveis Dummy. ....	88
Figura 16 - Índice de abrangência em função do diâmetro a altura do peito para árvores de <i>Araucaria angustifolia</i> , dominantes (a), codominantes (b), dominadas (c) e desconsiderando posição social (d).....	92
Figura 17 - Índice de saliência em função do diâmetro a altura do peito para árvores de <i>Araucaria angustifolia</i> , dominantes (a), codominantes (b), dominadas (c) e desconsiderando posição social (d).....	96
Figura 18 - Frequência relativa do incremento periódico em área basal de <i>Araucaria angustifolia</i> sem transformação ( $IP_{g\%}$ ) (a); com transformação $LN(IP_{g\%})$ (b). ....	97
Figura 19 - Comportamento do diâmetro à altura do peito (d) relacionado com o incremento periódico em área basal sem transformação logarítmica ( $IP_{g\%}$ ) e a altura total (h) das árvores de araucária (a); comportamento do incremento periódico em área basal sem transformação logarítmica ( $IP_{g\%}$ ) relacionado com o diâmetro de copa (dc) e a proporção de copa (Pc) das árvores de araucária (b); (PS1) árvores dominante, (PS2) codominante e (PS3) dominada.....	101
Figura 20 - Comportamento do incremento periódico em área basal com transformação logarítmica $LN(IP_{g\%})$ relacionado com o comprimento de copa (cc) e a altura total (h) das árvores de araucária (a); Comportamento do incremento periódico em área basal sem transformação logarítmica ( $IP_{g\%}$ ) relacionado com o comprimento de copa (cc) e a altura total (h) das árvores de araucária (b); (PS1) dominante; (PS2) codominante; (PS3) dominada. Gráficos sem os pontos considerados <i>outliers</i> . ....	103
Figura 21 - Detecção de pontos influentes. ....	105
Figura 22 - Distribuição do incremento periódico em área basal observado e ajustado em função do diâmetro à altura do peito em árvores individuais de araucária. ....	106
Figura 23 - Distribuição dos dados estimados e observados do modelo de crescimento periódico em área basal transformado $LN(IP_{g\%})$ em função de cada variável independente: FC - formal de copa (a); D8PC - proporção de copa para árvores dominantes segundo a variável Dummy (D8) (b); D8CC - comprimento de copa para árvores dominantes segundo a variável Dummy (D8) (c); GE - grau de esbeltez ou relação h/d (d). ....	108
Figura 24 - Resíduo padronizado em função da variável dependente estimada $LN(\hat{IP}_{g\%})$ (a); Resíduo em função da variável dependente estimada $LN(\hat{IP}_{g\%})$ (b).....	110



Figura 25 - Gráficos de resíduos dos modelos ajustados para a variável altura total em árvores dominante de <i>Araucaria angustifolia</i> . .....	125
Figura 26 - Gráficos de resíduos dos modelos ajustados para a variável altura total em árvores codominante de <i>Araucaria angustifolia</i> . .....	127
Figura 27 - Gráficos de resíduos dos modelos ajustados para a variável altura total em árvores dominada de <i>Araucaria angustifolia</i> . .....	129
Figura 28 - Gráficos de resíduos dos modelos ajustados para a variável altura total para todo conjunto de dados desconsiderando a posição social em árvores de <i>Araucaria angustifolia</i> . .....	131
Figura 29 - Gráficos de resíduos dos modelos ajustados para a variável diâmetro de copa em árvores dominante de <i>Araucaria angustifolia</i> . .....	133
Figura 30 - Gráficos de resíduos dos modelos ajustados para a variável diâmetro de copa em árvores codominante de <i>Araucaria angustifolia</i> . .....	135
Figura 31 - Gráficos de resíduos dos modelos ajustados para a variável diâmetro de copa em árvores dominada de <i>Araucaria angustifolia</i> . .....	137
Figura 32 - Gráficos de resíduos dos modelos ajustados para a variável diâmetro de copa para todo conjunto de dados desconsiderando a posição social em árvores de <i>Araucaria angustifolia</i> . .....	139



## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Modelos estatísticos lineares e não lineares avaliados para ajustar a relação hipsométrica. ....	38
Tabela 2 - Modelos estatísticos avaliados para ajustar o diâmetro de copa em função do diâmetro à altura do peito.....	39
Tabela 3 - Primeira derivada de algumas variáveis dependentes transformadas usadas para o cálculo do índice de Furnival. ....	41
Tabela 4 - Variáveis dendrométricas de <i>Araucaria angustifolia</i> estratificadas por posição sociológica. ....	49
Tabela 5 - Estatísticas das melhores equações ajustadas da relação hipsométrica por posição social e desconsiderando a posição social. ....	50
Tabela 6 - Análise de covariância da relação hipsométrica com o modelo de Backman modificado para as três posições sociais. ....	53
Tabela 7 - Análise de variância e resumo estatístico dos parâmetros estimados da relação hipsométrica com variável Dummy para <i>Araucaria angustifolia</i> . ....	54
Tabela 8 - Estatísticas das melhores equações ajustadas do diâmetro de copa em função do diâmetro à altura do peito por posição social e desconsiderando a posição social. ....	56
Tabela 9 - Análise de covariância do diâmetro de copa em função do diâmetro à altura do peito para as três posições sociais.....	60
Tabela 10 - Análise de variância e o resumo estatístico dos parâmetros estimados do diâmetro de copa em função do diâmetro à altura do peito com variável Dummy para <i>Araucaria angustifolia</i> . ....	62
Tabela 11 - Área de projeção da copa de <i>Araucaria angustifolia</i> , estratificados por posição sociológica, em Lages, SC.....	64
Tabela 12 - Análise de variância dos métodos de determinação da área de projeção de copa de árvores de <i>Araucaria angustifolia</i> . ....	68
Tabela 13 - Valores calculados do teste t para as médias da superfície de projeção de copa ACC8, ACC4 e ACC2 em cada posição sociológica de <i>Araucaria angustifolia</i> . ....	68
Tabela 14 - TabelaValores médios, máximos e mínimos da proporção de copa em araucária. ....	71
Tabela 15 - Equações e estatísticas para a proporção de copa em função do diâmetro a altura do peito.....	72

Tabela 16 - Análise de covariância da proporção de copa em função do diâmetro a altura do peito. ....	74
Tabela 17 - Análise de variância e resumo estatístico dos parâmetros estimados da proporção de copa em função do diâmetro a altura do peito com variável Dummy para <i>Araucaria angustifolia</i> . ....	75
Tabela 18 - Valores médios, máximos e mínimos de formal de copa em araucária. ....	77
Tabela 19 - Modelos estatísticos e parâmetros estatísticos para formal de copa em função do diâmetro a altura do peito. ....	78
Tabela 20 - Análise de covariância do formal de copa em função do diâmetro a altura do peito. ....	80
Tabela 21 - Análise de variância e resumo estatístico dos parâmetros estimados do formal de copa em função do diâmetro a altura do peito com variável Dummy para <i>Araucaria angustifolia</i> . ....	81
Tabela 22 - Valores médios, máximos e mínimos do grau de esbeltez em araucária. ....	83
Tabela 23 - Equações e estatísticas para grau de esbeltez em função do diâmetro a altura do peito. ....	84
Tabela 24 - Análise de covariância do grau de esbeltez em função do diâmetro a altura do peito. ....	86
Tabela 25 - Análise de variância e resumo estatístico dos parâmetros estimados do modelo grau de esbeltez ou relação h/d em função do diâmetro a altura do peito com variável dummy para <i>Araucaria angustifolia</i> . ....	87
Tabela 26 - Valores médios, máximos e mínimos do índice de abrangência para araucária. ....	89
Tabela 27 - Equações e estatísticas para o índice de abrangência em função do diâmetro a altura do peito. ....	90
Tabela 28 - Valores médios, máximos e mínimos do índice de saliência em araucária. ....	93
Tabela 29 - Equações e estatísticas para o índice de saliência em função do diâmetro a altura do peito. ....	94
Tabela 30 - Coeficientes e parâmetros estatísticos do modelo de incremento periódico em área basal. ....	99
Tabela 31 - Resumo estatístico da seleção <i>stepwise</i> . ....	100
Tabela 32 - Resumo estatístico dos parâmetros estimados do modelo de incremento periódico em área basal. ....	104

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

ACC2	– Área de copa circular calculado pelo prolongamento do maior raio de copa
ACC4	– Área de copa circular calculado com a média dos quatro raios de copa
ACC8	– Área de copa circular calculado com a média dos oito raios de copa
CAP	– Circunferência à altura do peito
cc	– Comprimento de copa
cm	– Centímetros
CV%	– Coeficiente de variação em percentagem
d	– Diâmetro à altura do peito
D1	– Variável Dummy em árvores codominantes
D2	– Variável Dummy em árvores dominadas
D8CC	– Comprimento de copa para árvores dominantes (D8 – variável Dummy)
D8PC	– Proporção de copa para árvores dominantes (D8 – variável Dummy)
dc	– Diâmetro de copa
dc8	– Diâmetro de copa obtido pela média de oito raios de copa
F	– Valor de F
Fc	– Formal de copa
FIV	– Fator de inflação da variância
FV	– Fonte de variação
g	– Área basal
Ge	– Grau de esbeltez ou relação h/d
GL	– Graus de liberdade
h	– Altura total
h/d	– Relação hipsométrica
hf	– Altura do fuste
IA	– Índice de abrangência
IF	– Índice de Furnival
IP <sub>g</sub> %.	– Incremento periódico em área basal relativo
IS	– Índice de saliência
L	– Leste

m	– Metro
m <sup>2</sup>	– Metro quadrado
mm	– Milímetro
N	– Norte
NE	– Nordeste
NO	– Noroeste
O	– Oeste
°C	– Graus centígrados
Pc	– Proporção de copa
Prob.	– Probabilidade
Prob.>F	– Probabilidade de significância para F
OS	– Posição sociológica
PS1	– Posição social dominante
PS2	– Posição social codominante
PS3	– Posição social dominada
QM	– Quadrado médio
R <sup>2</sup> <sub>aj.</sub>	– Coeficiente de determinação ajustado
rc	– Raio da copa médio
S	– Sul
SAS	– <i>Statistical Analysis System</i>
SE	– Sudeste
SO	– Sudoeste
SQ	– Soma de quadrados
S <sub>yx</sub>	– Erro padrão da estimativa
TSAP	– <i>Time Series Analysis Program</i>
VP	– Valor ponderado dos escores estatísticos

## LISTA DE ANEXOS

ANEXO A - Estatísticas das equações lineares ajustadas da relação hipsométrica de <i>Araucaria angustifolia</i> para árvores dominantes em Lages, SC.....	124
ANEXO B - Estatísticas das equações não lineares ajustadas da relação hipsométrica de <i>Araucaria angustifolia</i> para árvores dominantes em Lages, SC....	124
ANEXO C - Estatísticas das equações lineares ajustadas da relação hipsométrica de <i>Araucaria angustifolia</i> para árvores codominantes em Lages, SC.....	126
ANEXO D - Estatísticas das equações não lineares ajustadas da relação hipsométrica de <i>Araucaria angustifolia</i> para árvores codominantes em Lages, SC. .....	126
ANEXO E - Estatísticas das equações lineares ajustadas da relação hipsométrica de <i>Araucaria angustifolia</i> para árvores dominadas em Lages, SC.....	128
ANEXO F - Estatísticas das equações não lineares ajustadas da relação hipsométrica de <i>Araucaria angustifolia</i> para árvores dominadas em Lages, SC.....	128
ANEXO G - Estatísticas das equações lineares ajustadas da relação hipsométrica de <i>Araucaria angustifolia</i> desconsiderando posição sociológica em Lages, SC. ....	130
ANEXO H - Estatísticas das equações não lineares ajustadas da relação hipsométrica de <i>Araucaria angustifolia</i> desconsiderando posição sociológica em Lages, SC.....	130
ANEXO I - Estatísticas das equações ajustadas do diâmetro de copa em função do diâmetro a altura do peito de <i>Araucaria angustifolia</i> para árvores dominante em Lages, SC.....	132
ANEXO J - Estatísticas das equações ajustadas do diâmetro de copa em função do diâmetro a altura do peito de <i>Araucaria angustifolia</i> para árvores codominante em Lages, SC.....	134
ANEXO K - Estatísticas das equações ajustadas do diâmetro de copa em função do diâmetro a altura do peito de <i>Araucaria angustifolia</i> para árvores dominadas em Lages, SC.....	136
ANEXO L - Estatísticas das equações ajustadas do diâmetro de copa em função do diâmetro a altura do peito de <i>Araucaria angustifolia</i> desconsiderando posição sociológica em Lages, SC. ....	138
ANEXO M - Correlação de Pearson e a probabilidade entre o incremento periódico em área basal relativo LN(IPg%) entre os anos de 2005 e 2010 para as variáveis dendrométricas e morfométricas de <i>Araucaria angustifolia</i> em Lages, SC. ....	140





# SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>19</b>
<b>1.1 Objetivos</b> .....	<b>20</b>
1.1.1 Objetivo geral .....	20
1.1.2 Objetivos específicos.....	20
<b>2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA</b> .....	<b>21</b>
<b>2.1 Características da Araucaria angustifolia</b> .....	<b>21</b>
2.1.1 Distribuição geográfica.....	22
<b>2.2 Fatores que influenciam no crescimento</b> .....	<b>22</b>
2.2.1 Morfometria das árvores.....	24
<b>2.3 Modelagem do crescimento de árvores</b> .....	<b>27</b>
<b>3 MATERIAL E MÉTODOS</b> .....	<b>29</b>
<b>3.1 Caracterização e descrição da área de estudo</b> .....	<b>29</b>
<b>3.2 Levantamento de dados</b> .....	<b>30</b>
3.2.1 Variáveis dendrométricas .....	31
3.2.2 Variáveis morfométricas .....	32
3.2.2.1 Comprimento da copa .....	32
3.2.2.2 Raio da copa médio.....	33
3.2.2.3 Diâmetro da copa .....	33
3.2.2.4 Área da projeção da copa .....	33
3.2.2.5 Proporção de copa .....	35
3.2.2.6 Forma de copa .....	35
3.2.2.7 Grau de esbeltez ou relação h/d .....	36
3.2.2.8 Índice de abrangência .....	36
3.2.2.9 Índice de saliência .....	36
3.2.3 Reconstrução do crescimento periódico em área basal .....	37
<b>3.3 Modelos testados para relação hipsométrica e diâmetro de copa</b> .....	<b>38</b>
<b>3.4 Modelagem das relações morfométricas</b> .....	<b>39</b>
<b>3.5 Critério de seleção das equações</b> .....	<b>40</b>
3.5.1 Coeficiente de determinação ajustado .....	40

3.5.2 Índice de Furnival.....	40
3.5.3 Teste Qui-quadrado .....	42
3.5.4 Distribuição de resíduos .....	42
3.5.4.1 Condicionantes da regressão .....	42
<b>3.6 Análise de covariância .....</b>	<b>43</b>
<b>3.7 Análise de regressão com variável Dummy .....</b>	<b>43</b>
<b>3.8 Análise de correlação de Pearson.....</b>	<b>44</b>
<b>3.9 Modelagem e avaliação do modelo incremento periódico em área basal ...</b>	<b>44</b>
<b>4 RESULTADOS E DISCUSSÃO .....</b>	<b>47</b>
<b>4.1 Características morfométricas .....</b>	<b>47</b>
4.1.1 Variáveis dendrométricas .....	48
4.1.1.1 Relação hipsométrica .....	50
4.1.2.1 Diâmetro de copa.....	56
4.1.2.2 Métodos para calcular área de projeção da copa .....	64
4.1.3 Relações morfométricas .....	70
4.1.3.1 Proporção de copa.....	70
4.1.3.2 Formal de copa.....	77
4.1.3.3 Grau de esbeltez - h/d .....	83
4.1.3.4 Índice de abrangência.....	89
4.1.3.5 Índice de saliência .....	93
<b>4.2 Modelagem do crescimento periódico em área basal .....</b>	<b>97</b>
<b>5 CONCLUSÕES .....</b>	<b>111</b>
<b>6 REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS .....</b>	<b>112</b>
<b>ANEXOS.....</b>	<b>123</b>

# 1 INTRODUÇÃO

A *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze, popularmente conhecida como Pinheiro-do-Paraná, foi uma das espécies nativas da flora brasileira mais explorada comercialmente, entre o final do século XIX e a metade da década de 70 do século XX, para o abastecimento de madeira no mercado interno e externo, levando-a à categoria de vulnerável na lista de espécies ameaçadas de extinção (Port. 37-N, 1992; BRASIL, 2008).

Uma das principais razões para a sua exploração, de maneira desordenada e irracional, associa-se à necessidade de terras para a expansão agrícola e pecuária, bem como devido às características físicas, químicas e anatômicas da madeira favoráveis para diversos fins: lâminas, celulose e papel, móveis e construção em geral.

Acrescente-se que a falta de uma política florestal com medidas eficientes, que adote os conceitos de desenvolvimento sustentável para as áreas de ocorrência natural da espécie é um dos maiores desafios para conciliar a produtividade e a conservação do meio ambiente.

O manejo florestal sustentável tem por objetivo garantir o abastecimento de matéria-prima de forma contínua e em igual quantidade por meio de um planejamento eficaz, aproveitando melhor os recursos florestais disponíveis. Assim sendo, conhecer fatores que influenciam no crescimento, refletidos pela variação da forma e do tamanho das árvores, são subsídios indispensáveis para a exploração racional das florestas nativas, pois possibilitam elaborar planos de manejo florestal que auxiliam à condução das atividades a serem desenvolvidas.

O manejo de árvores individuais visa a fornecer condições ideais às árvores objetivo, procurando maximizar o seu incremento. Essas condições podem ser avaliadas pela morfometria das árvores com reflexo nas condições de espaço vital, de competição, bem como fazendo-o na dinâmica da floresta.

Sendo assim, a importância em obter informações sobre o desenvolvimento da araucária está em definir estratégias adequadas no que tange a técnicas silviculturais e de manejo florestal, além de conduzir horizontes de planejamento direcionados às características da espécie.

## 1.1 Objetivos

### 1.1.1 Objetivo geral

Avaliar a influência das variáveis dendrométricas e morfométricas no incremento periódico em área basal de árvores individuais de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze.

### 1.1.2 Objetivos específicos

- a) testar e selecionar um modelo matemático para estimar a altura total e o diâmetro de copa;
- b) comparar métodos para estimar a área de projeção de copa;
- c) quantificar e modelar as relações morfométricas de árvores individuais;
- d) desenvolver um modelo matemático para descrever o incremento periódico em área basal em função de variáveis morfométricas e de dimensão da árvore.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1 Características da *Araucaria angustifolia*

A espécie *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze conhecida, mundialmente, pelos nomes de: Parana pine (Inglês), BrasilKiefer (Alemão), Araucaria du Brésil (Francês), Pino misionero (Espanhol) e Pinheiro-do-Paraná (Português), conforme Lamprecht (1990), pertence ao gênero *Araucaria* da família Araucariaceae, contando com 16 espécies, exclusivas do hemisfério Sul, dentre as quais duas originárias da América do Sul e o restante da Oceania (REITZ e KLEIN, 1966).

Trata-se de uma árvore perenifólia, heliófita pioneira, típica de regiões de altitude, com fuste retilíneo, cilíndrico, às vezes, bifurcado, contendo quatro a oito verticilos na inserção dos galhos, que se destacam com a idade. Planta dioica, raramente monoica por traumas ou doenças, apresenta estruturas reprodutoras organizadas em estróbilos masculinos e femininos (CARVALHO, 2003).

A araucária atinge de 20 a 50 metros de altura e um a dois metros de diâmetro. Sua copa apresenta ramos primários cilíndricos, curvos para cima, sendo os inferiores maiores que os superiores; ambos com ramos secundários (grimpas), alternos e agrupados no ápice (REITZ e KLEIN, 1966). A espécie possui tronco com casca espessa, acinzentada, áspera e profundamente fendilhada, descama em placas retangulares e em lâminas na parte superior do tronco (MARCHIORI, 2005).

A forma da copa é um indicativo do seu estágio ontogênico, havendo alterações à medida que a planta passa pelos estágios de juvenilidade, maturidade e senescência. Assim, árvores jovens apresentam copa com formato cônico e árvores adultas e senescentes, copa em forma de taça ou umbela (PUCHALSKI, 2004).

### 2.1.1 Distribuição geográfica

No Brasil, a araucária possui maior distribuição nos Estados do Sul, Rio Grande do Sul, Santa Catarina e Paraná e, de forma esparsa, em Minas Gerais, Rio de Janeiro e São Paulo (CARVALHO, 1994). Trata-se de espécie de ocorrência limitada entre as latitudes de 15° e 30° sul e longitudes de 43° e 57° oeste, com ocorrência ainda na Província de Misiones, na Argentina (HUECK, 1972).

Em Santa Catarina, a Serra do Mar é, praticamente, o último reduto de vegetação nativa, pois o oeste do território catarinense já foi totalmente desmatado, e, na região do planalto, imediações de Lages, sobraram poucos capões de araucárias e de árvores típicas como canela, cedro, peroba, sassafrás e imbuia (KRAUSE, 1984).

A araucária é uma espécie típica de fragmentos da Floresta Ombrófila Mista, também conhecida como “mata-de-araucária” ou “pinheiral”, incluído no complexo vegetacional da Mata Atlântica (OLIVEIRA-FILHO e FONTES, 2000).

No início deste século, cerca de 35% da cobertura vegetal dos Estados do sul do Brasil estavam representados pela Floresta Ombrófila Mista. O intenso processo de exploração fez com que as reservas naturais dessa espécie estivessem limitadas a valores entre 2 a 4% da área original (GUERRA et al., 2002).

Segundo Negrelle e Silva (1992), pouco se conhecia sobre as interações do ambiente com outros indivíduos nos fragmentos de Floresta Ombrófila Mista e, principalmente, os padrões estruturais, florísticos e fitogeográficos dos componentes arbóreos, o que reforça a necessidade de estudos nesses locais (FORMENTO et al., 2004).

## 2.2 Fatores que influenciam no crescimento

O crescimento das árvores depende dos fatores genéticos da espécie interagindo com o ambiente, compreendendo, desta forma, fatores climáticos: temperatura, precipitação, vento e insolação; solo: características físicas, químicas e

biológicas; topográficos: inclinação, altitude e exposição; competição: influência de outras árvores, vegetação rasteira e animais (FINGER, 2006).

A soma e a interação desses fatores definem a variável sítio para uma determinada espécie, atuando de forma conjunta sobre o crescimento das árvores. Segundo Spurr (1952), a qualidade do sítio não depende de um fator nem de todos os fatores do meio, mas dos fatores efetivos e das interações entre eles.

A temperatura e a precipitação encontram-se diretamente correlacionadas com o incremento das árvores de araucária. Em conformidade com Zanon e Finger (2010), estudando a periodicidade do crescimento de árvores masculinas e femininas de araucária e correlacionando-a com variáveis meteorológicas na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS, verificou que o aumento da temperatura e da precipitação influenciou positivamente no incremento, não havendo diferenças estatísticas de crescimento entre árvores femininas e masculinas. Os mesmos autores identificaram, no local de estudo, que o início do crescimento anual em diâmetro das árvores ocorria em setembro, tendo o seu pico no mês de janeiro, sendo que, no final daquele mês, as árvores já acumularam, em média, 57,42% do incremento anual.

Os povoamentos de araucária com maior crescimento, normalmente, encontram-se em latossolos, determinados pela boa estrutura do solo, enquanto litossolos e solos hidromórficos são limitantes para o crescimento da espécie devido às restrições impostas para o desenvolvimento da raiz, produzindo, desse modo, menores taxas de crescimento (HOOGH, 1981).

A influência dos fatores físicos e morfológicos do solo e da qualidade de serrapilheira foi estudada por Gerhardt et al. (2001) na classificação de sítios em povoamentos de araucária, concluindo que os fatores com maior poder de separação de sítios eram a profundidade e a densidade do solo, assim como os teores de areia, silte e argila.

Em consonância com Hoogh (1981), os fatores químicos mais importantes que podem limitar o crescimento da araucária são nitrogênio (N), seguido pela oferta de fósforo (P) e, com menor frequência, potássio (K), cálcio (Ca), cobre (Cu) e boro (B).

Os teores de nitrogênio (N) e alumínio (Al) no solo correlacionam-se positivamente com o crescimento da araucária, de acordo com Hoppe e Caldeira

(2003a), bem como concentrações de cobre (Cu) e boro (B) com o incremento periódico anual (HOPPE e CALDEIRA, 2003b).

A competição, entendida como o uso de um recurso por um indivíduo que reduz a disponibilidade do mesmo recurso para os outros indivíduos, se estabelece entre seres da mesma espécie (competição intraespecífica) ou de espécies diferentes (competição interespecífica) (RICKLEFS, 1996).

As características qualitativas da copa são um indicador de vitalidade das árvores, logo a proporção de copa atual de uma árvore deve dar indicativos do grau de competição por ela sofrido no passado, podendo, por isso, ser usado em modelos de competição (DURLO, 1996).

Na ciência florestal, as pesquisas e o desenvolvimento de índices de competição têm sido aplicados, sobretudo, na prognose do crescimento em plantios florestais ou grupos de espécies em florestas naturais (SCHNEIDER e SCHNEIDER, 2008).

O status competitivo de uma árvore pode ser descrito por medidas de competição independentes ou dependentes da distância. Índices independentes da distância distinguem-se dos dependentes por utilizarem medidas não espaciais, baseadas na distribuição dos tamanhos das árvores em uma determinada área. Nos índices dependentes da distância (espaciais), os competidores são identificados com base em seu tamanho e a distância em relação à árvore-objetivo (WIMBERLY e BARE, 1996).

Entre os índices independentes da distância, destacam-se: Glover e Hool (1979), BAL (*Basal Area Larger*) e suas modificações, como as citadas por Prodan (1997). Como índices dependentes da distância, salientam-se: Bella (1971), Arney (1973), Hegyi (1974), de Ek e Monserud (1974), Índice de competição vertical de Mitsuda et al. (2002), entre outros.

### 2.2.1 Morfometria das árvores

Os estudos de morfometria e das variáveis daí derivadas permitem descrever as relações interdimensionais, reconstituir o espaço ocupado por cada árvore, julgar



o grau de concorrência de um povoamento e, ainda, inferir sobre a estabilidade, a vitalidade e a produtividade de cada indivíduo (DURLO e DENARDI, 1998).

As formas e as dimensões das árvores e a sua modificação, com o tempo, adquirem nova importância, dada a possibilidade de comporem modelos de concorrência e de crescimento (PRETZSCH, 1995).

As primeiras investigações da estrutura e da forma da copa devem-se a Burger, com o modelo de copa para a espécie *Picea abies* (L.) Karst. (BURGER 1939 apud ASSMANN, 1970).

No meio florestal, características dimensionais: diâmetro à altura do peito, área basal, altura total, altura do fuste, área de projeção de copa e o volume da copa são conceitos bem conhecidos. Menos conhecidos, contudo, o são: o manto de copa, o índice de abrangência, o formal de copa, o grau de esbeltez, o índice de saliência e o índice de espaço vital, citados por Assmann (1970), que são derivados do modelo proposto por Burger, conforme a Figura 1.

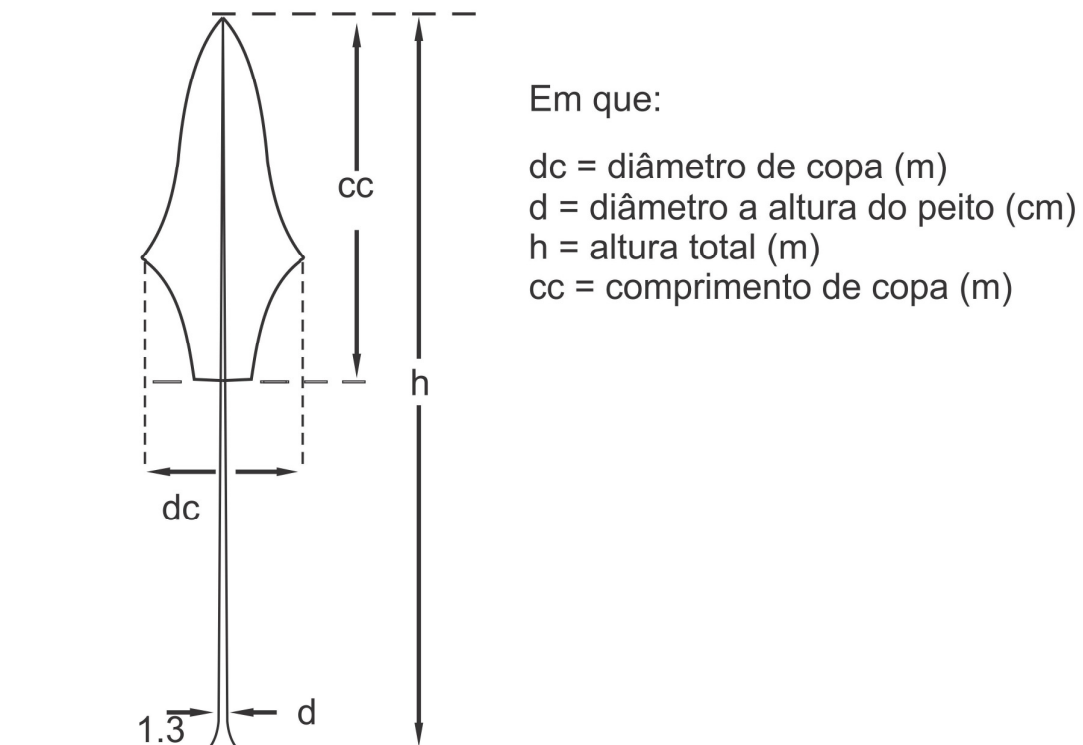


Figura 1 – Modelo de árvore e suas características dimensionais. Fonte: Adaptado Assmann (1970).

No estágio atual de desenvolvimento do manejo de espécies florestais nativas, o conhecimento da morfometria, das relações morfométricas e da dinâmica das formas das árvores tornam-se imprescindíveis para aprimorar as intervenções silviculturais, de modo especial, quando se deseja tornar efetiva a utilização de espécies da flora nativa em reflorestamentos com interesses econômicos (ROMAN et al., 2009).

As relações morfométricas de uma espécie florestal fornecem os subsídios básicos para estimativas da biomassa de copa. Variáveis como a altura total da árvore, a altura de copa e o diâmetro de copa podem ser facilmente correlacionados com o diâmetro à altura do peito (ORELLANA et al., 2008).

A utilização de regimes de manejo baseados na árvore individual não é comum no Brasil, especialmente em plantios comerciais. No entanto, esta é uma prática bastante adotada em países europeus, onde se originaram os estudos da relação entre as copas das árvores e a eficiência em incremento diamétrico ou em área basal.

A definição da quantidade de árvores a permanecer ao final da rotação pressupõe conhecer o espaço ideal necessário para que cada uma desenvolva-se até o período de corte. Com esse objetivo, as relações morfométricas entre diâmetro de copa, porcentagem de copa, comprimento de copa exposto à luz e altura de árvores dominantes em povoamento de *Pinus taeda* L. foram estudados por Padoin e Finger (2010).

A fim de definir diretrizes para desbastes em plantios homogêneos, Tonini e Arco-Verde (2005) avaliaram o espaço vital para o desenvolvimento de quatro espécies da Amazônia *Bertholletia excelsa* Bonpl. (castanheira-do-pará), *Carapa guianensis* Aubl. (andiroba), *Handroanthus avellanadae* (Lorentz ex Griseb.) Mattos (ipê-roxo) e *Hymenaea courbaril* L. (jatobá), com base na morfologia de copa.

Variáveis morfométricas foram também usadas para as espécies *Cabralea canjerana* (Vell.) Mart., *Cedrela fissilis* Vell. e *Cordia trichotoma* (Vell.) Arrab. ex Steud., no Estado do Rio Grande do Sul, como auxílio na modelagem do incremento periódico anual em área basal (MATTOS, 2007).

A relação entre o diâmetro de copa e o diâmetro a altura do peito, chamada de índice de saliência, expressa quantas vezes o diâmetro de copa é maior que o diâmetro a altura do peito. Quando elevada ao quadrado, esta relação corresponde ao índice de espaço vital (DURLO e DENARDI, 1998).

Para descrever o espaço vital necessário para que *Pinus elliottii* Engelm. alcance um diâmetro a altura do peito objetivo, Nutto et al. (2001) valeram-se dos parâmetros da copa, quantificando o seu diâmetro a partir de oito raios com ângulos variáveis. Segundo os autores, esse método de estimativa do diâmetro foi de acurácia superior ao que toma quatro raios com ângulos fixos.

Na reconstituição tridimensional das copas de *Cedrela fissilis* Vell., Durlo et al. (2004) empregaram desenhos arquitetônicos para descrever índices morfométricos de forma simples e eficaz.

### **2.3 Modelagem do crescimento de árvores**

Uma das informações mais importantes para o manejador florestal diz respeito à existência de relações quantitativas de modelos que sejam consistentes e numericamente compatíveis com a predição do povoamento. Dessa maneira, a predição do valor potencial da produção, sob várias condições, fornece ao administrador elementos para a otimização da produção florestal (SCOLFORO, 1993).

O uso da modelagem no meio florestal configura-se um tema envolvente e busca prognosticar o crescimento para as variáveis dendrométricas em função de uma série de variáveis possíveis de serem quantificadas no povoamento através da análise de regressão (ZEIDE, 1993).

Os modelos para florestas mistas e inequiâneas podem ser divididos em três grupos: modelos para povoamento total, em que o crescimento e a produção são focados no povoamento, ou seja, o povoamento é tomado como unidade básica para modelagem. Tem-se, ainda, modelos de classes de tamanho que usam classes de diâmetro, altura, etc. como unidade básica e, por fim, modelos de árvores individuais: a árvore é a unidade básica. Esses modelos simulam cada indivíduo com relação ao crescimento, à mortalidade, ao estabelecimento e à soma das estimativas de todas as árvores que resulta na produção do povoamento (SANQUETTA, 1996).

Na construção de um modelo, busca-se descrever um sistema dinâmico, no qual características como diâmetro a altura do peito, altura e volume mudam com o

tempo. O crescimento em diâmetro de árvores individuais pode ser expresso como incremento em diâmetro ou incremento em área basal, conforme Vanclay (1994), sendo a precisão da estimativa do diâmetro futuro a mesma, quando usadas as equações de crescimento em diâmetro ou área basal (WEST, 1980).

As vantagens da modelagem de árvore individual referem-se ao detalhamento da estrutura do povoamento, à melhor compreensão das relações entre o meio e o crescimento, à análise de aspectos fisiológicos e de coexistência, podendo ser, potencialmente, aplicável para florestas naturais. Como desvantagens, citam-se a complexidade e a quantidade de trabalho para a sua construção (DELLA-FLORA, 2001).

A modelagem vem sendo cada vez mais aplicada em estudos ambientais, uma vez que ajuda a compreender o impacto das mudanças no uso da terra, bem como prever alterações futuras nos ecossistemas, sobretudo no que tange à produtividade e à proteção das florestas. Nesses casos, os modelos matemáticos tornam-se imprescindíveis para prognoses dos futuros recursos florestais, a escolha de alternativas silviculturais, o apoio à tomada de decisões e à política florestal (ZANON, 2007).

Conhecer o padrão de crescimento das florestas, ou até mesmo de uma espécie, traduz-se em benefícios ambientais, sociais e econômicos, pois expressa o crescimento de variáveis dendrométricas em função do tempo, reflete na capacidade de administrar florestas em função da necessidade do homem e, mais ainda, na sua habilidade de não degradar o meio ambiente (HESS, 2006).

## 3 MATERIAL E MÉTODOS

### 3.1 Caracterização e descrição da área de estudo

O estudo, que ora se apresenta, foi realizado em uma floresta nativa, particular, de 84 hectares localizados próximo à Fazenda Pedras Brancas, no município de Lages, SC, geograficamente situada entre as coordenadas 27° 48' 58" de latitude sul e 50° 19' 34" longitude oeste de Greenwich, no planalto do Estado de Santa Catarina.

A região foi classificada como clima Cfb, segundo Köppen, ou seja, clima temperado constantemente úmido, com verão, sem estação seca. A temperatura média anual varia de 13,8 °C a 15,8 °C, umidade relativa do ar entre 80 a 83% e com precipitação pluviométrica total anual oscilando entre 1360 a 1600 mm (EPAGRI, 2002).

Os solos predominantes foram classificados, pela Epagri (2002), como associações Cambissolo Álico Tb A húmico, textura muito argilosa, relevo suave ondulado e mais solos Litólicos Álicos A húmico, textura argilosa, fase pedregosa, relevo ondulado (substrato efusivo da formação Serra Geral) e Glei Húmico Álico Tb, textura argilosa, fase campo subtropical de várzea, relevo plano.

A atividade econômica na região caracteriza-se pela pecuária intensiva, pela agricultura de subsistência e pela coleta dos pinhões das araucárias durante a época de amadurecimento, ocorrida, normalmente, no período de março a julho.

Durante a coleta dos dados, na área, observou-se pouca regeneração natural e o povoamento encontrava-se superestocado, devendo haver um controle da densidade dos indivíduos na população. Sobre este aspecto, Reitz e Klein (1966) mencionavam que, em Santa Catarina, sobretudo, na região de Lages, as florestas com araucária encontravam-se numa fase bem evoluída, quase todos os pinheiros em fase de plantas adultas e, nessas condições, não havia regeneração natural, devido à alta umidade e à pouca luz.

Para o mesmo local do presente estudo, Hess et al. (2010) fizeram uma proposta de manejo de araucária utilizando o quociente de Liocourt para floresta balanceada, definindo retirar 54 árvores por hectare no conjunto das classes de frequência para um diâmetro objetivo de 35 cm, com redução de  $7,4 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$  de área basal. Alternativamente, retirando 39 árvores por hectare para o diâmetro máximo de 40 cm com redução de  $5,27 \text{ m}^2 \text{ ha}^{-1}$ . Os autores concluíram que o crescimento da espécie estava lento, indicando uma intervenção silvicultural com aproveitamento de árvores e, em consequência, favorecendo melhores condições para as árvores remanescentes.

### 3.2 Levantamento de dados

No levantamento dos dados, 85 árvores denominadas objetivo foram medidas por um processo de amostragem inteiramente aleatório, considerando, no mínimo, oito árvores por classe de diâmetro, com menor centro de classe de 10 cm, definido no estudo realizado na mesma área por Hess et al. (2010) e, a partir daí, em intervalos entre classes diamétricas de 10 cm. Foram identificadas as árvores circunvizinhas competidoras em relação a cada árvore objetivo, segundo o critério silvicultural descrito por Soligo (2009).

Deve-se esclarecer que, das 85 árvores objetivo, 77 ocupavam a posição social dominante; duas, codominante e seis, dominada, enquanto que, das 209 árvores selecionadas competidoras, 116 ocupavam a posição social dominante; 38, codominante e 55, dominada, completando 294 árvores na floresta. Em todas as árvores foram medidas variáveis dendrométricas e morfométricas.

As seguintes informações também foram registradas por árvore:

- ❖ Coordenadas geográficas: medido com o GPS Garmin Map 76 CSX o ponto de cada árvore, somente para a árvore objetivo;

❖ Posição sociológica: classificou-se de acordo com a posição da árvore ocupada no estrato vertical da floresta e o respectivo grau de exposição da copa por luz:

PS1 - árvores dominantes: ocupavam o estrato superior com alta exposição da copa por luz;

PS2 - árvores codominantes: situavam-se no estrato intermediário com média exposição da copa por luz;

PS3 - árvores dominadas: ocupavam o estrato inferior com baixa exposição da copa por luz.

❖ Pedregosidade: verificou-se a presença de afloramento de rochas no local, classificando-se em: (1) com afloramento, (2) afloramento médio e (3) afloramento baixo e/ou nenhum;

❖ Posição no terreno: classificou-se em quatro tipos: (1) encosta inferior, (2) encosta média, (3) encosta superior e (4) platô;

❖ Vitalidade: visualmente, constatou-se a quantidade de folhas verdes e a sua distribuição na copa, bem como a sanidade, classificando em: (1) vitalidade alta; (2) vitalidade média e (3) vitalidade baixa;

❖ Disposição dos galhos: avaliaram-se: (1) galhos bem distribuídos em todos os quatro quadrantes de forma homogênea; (2) copa distribuída em três quadrantes; (3) copa distribuída em dois ou um quadrante.

### 3.2.1 Variáveis dendrométricas

Em todas as árvores foram determinadas:

a) Identificação árvore: a cada árvore atribuiu-se uma sequência ordinal com uma placa metálica fixada na base da árvore;

- b) Diâmetro à altura do peito (d): primeiramente, foi medido o CAP com fita métrica, em centímetros, a 1,30 m acima da superfície do solo que, após, foi transformado em diâmetro à altura do peito;
- c) Altura total (h): medida com hipsômetro Vertex IV, com precisão em décimos de metros;
- d) Altura do fuste (hf): medida com hipsômetro Vertex IV, com precisão em décimos de metros, considerando a distância do solo até o ponto de inserção da copa.

Para avaliar a suficiência amostral entre as posições sociais: dominante (PS1), codominante (PS2) e dominada (PS3), selecionou-se a variável diâmetro à altura do peito como base para a determinação do número mínimo de amostras (árvores) necessárias para abranger a variabilidade dimensional da população, conforme Péllico Netto e Brena (1997), com a seguinte equação:

$$n = \frac{t^2 s_x^2}{E^2} \quad (1)$$

Em que: n= número de unidades amostrais a ser medido; t= valor de t de student tabelado;  $s_x^2$  = variância;  $E = (LE * \bar{x})$ , LE= limite do erro de amostragem admitido,  $\bar{x}$  = média aritmética dos valores observados.

### 3.2.2 Variáveis morfométricas

As variáveis mensuradas para descrever a morfometria da árvore encontram-se explicitadas, na sequência:

#### 3.2.2.1 Comprimento da copa

O comprimento da copa foi obtido pela diferença entre a altura total e a altura de inserção do primeiro galho vivo:



$$cc = h - h_i \quad (2)$$

Em que:  $h$  = altura total, em metros;  $h_i$  = altura inserção primeiro galho vivo, em metros.

### 3.2.2.2 Raio da copa médio

Os raios de copa foram medidos com o auxílio da bússola a partir da posição norte e nos demais pontos cardiais (NE, L, SE, S, SO, O e NO). Com as oito medições, fez-se uma média, sendo definido o raio de copa médio desta árvore:

$$\overline{rc} = \sum_{i=1}^{n=8} \frac{rc}{8} \quad (3)$$

Em que:  $rc$  = raios da copa, em metros.

### 3.2.2.3 Diâmetro da copa

O diâmetro da copa, por sua vez, foi calculado pela duplicação do valor do raio médio da copa sobre o solo:

$$dc = 2.\overline{rc} \quad (4)$$

Em que:  $rc$  = raio da copa médio, em metros.

### 3.2.2.4 Área da projeção da copa

Para o cálculo da área de projeção de copa, testaram-se três métodos, conforme apresenta-se em continuidade:

ACC8 - área de copa circular com a média dos oito raios de copa ( $rc_8$ ) obtidos nos pontos cardeais (N, NE, L, SE, S, SO, O e NO):

$$ACC8 = \pi \cdot rc_8^2 \quad (5)$$

ACC4 - área de copa circular calculado com a média dos quatro raios de copa ( $rc_4$ ) medidos nos pontos cardeais (N, L, S e O):

$$ACC4 = \pi \cdot rc_4^2 \quad (6)$$

ACC2 - área de copa circular através do diâmetro de copa ( $dc$ ) obtido pelo ponto cardinal de maior raio de copa e de seu prolongamento a 180°:

$$ACC2 = \pi \cdot \left( \frac{dc}{2} \right)^2 \quad (7)$$

Para verificar a existência ou não de diferenças estatísticas entre os métodos, usou-se uma análise de variância com arranjo fatorial, combinando os métodos adotados na determinação da área de copa (ACC8, ACC4 e ACC2) com cada posição social das árvores (PS1, PS2 e PS3). O experimento foi desbalanceado, com um número diferente de unidades amostrais (árvore) para os nove tratamentos, conforme a Figura 2.

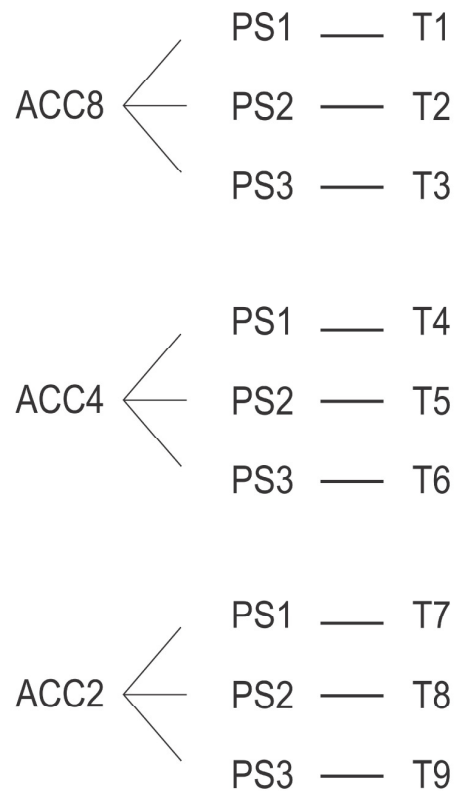


Figura 2 – Esquema das combinações realizadas na análise de variância utilizando arranjo fatorial.

### 3.2.2.5 Proporção de copa

A proporção da copa resultou do cálculo pela razão entre o comprimento da copa e a altura da árvore, que se fez em percentagem:

$$P_c = \frac{cc}{h} * 100 \quad (8)$$

Em que: cc= comprimento da copa, em metros; h= altura total da árvore, em metros.

### 3.2.2.6 Formal de copa

O formal da copa foi obtido pelo cálculo da razão entre o diâmetro da copa e o comprimento da copa:

$$F_c = \frac{dc}{cc} \quad (9)$$

Em que: dc= diâmetro da copa, em metros; cc= comprimento da copa, em metros.

### 3.2.2.7 Grau de esbeltez ou relação h/d

O grau de esbeltez foi calculado pela razão entre a altura total da árvore e o diâmetro à altura do peito:

$$Ge = \frac{h}{d} \quad (10)$$

Em que: h= altura total da árvore, em metros; d= diâmetro a altura do peito, em metros.

### 3.2.2.8 Índice de abrangência

O índice de abrangência, por seu turno, é calculado pela razão entre diâmetro de copa e a altura total da árvore:

$$IA = \frac{dc}{h} \quad (11)$$

Em que: dc= diâmetro da copa, em metros; h= altura total da árvore, em metros.

### 3.2.2.9 Índice de saliência

O índice de saliência é a razão entre o diâmetro de copa e o diâmetro a altura do peito, conforme se evidencia:

$$IS = \frac{dc}{d} \quad (12)$$

Em que: dc= diâmetro da copa, em metros; d= diâmetro a altura do peito, em metros.

### 3.2.3 Reconstrução do crescimento periódico em área basal

O crescimento periódico em área basal delimitado pelos anéis de crescimento amostrados radialmente do fuste de 109 árvores (PS1=84 árvores dominantes; PS2=10 árvores codominantes e PS3=15 árvores dominadas), utilizando trado de Pressler, foi determinado, anualmente, entre os anos 2005 e 2010.

Na altura do diâmetro à altura do peito, foram coletados dois rolos de incremento em cada árvore, os quais foram acondicionados em canudos de plástico, perfurados e identificados com o número da árvore. Em laboratório, fixou-se a amostra de rolo de incremento com cola branca em suportes de madeira. Após a secagem, cortou-se, com estilete, a superfície do rolo de incremento, seguindo-se o acabamento da superfície das amostras, com uma lixa de grã 330, para tornar mais fácil a visualização dos anéis de crescimento.

A medição do incremento radial foi realizada em uma mesa micrométrica com deslocamento horizontal acoplada a um microscópio estereoscópico. Os dados de incremento foram registrados pelo programa *Time Series Analysis Program* - TSAP (RINN, 1996).

O incremento periódico em área basal ( $IP_{gi}$ ), para cada árvore, foi expresso de forma relativa para os últimos cinco anos pela expressão que se segue:

$$IP_{gi\%} = \left[ \frac{g_{i2010} - g_{i2005}}{g_{i2005}} \right] * 100$$

logo,

$$IP_{gi\%} = \left[ \frac{d_{i2010}^2 - d_{i2005}^2}{d_{i2005}^2} \right] * 100 \quad (13)$$

Em que:  $IP_{gi\%}$  = Incremento periódico em área basal da i-ésima árvore, em percentagem;  $d_{i2010}$  = diâmetro da i-ésima árvore no ano de 2010, em centímetros;  $d_{i2005}$  = diâmetro da i-ésima árvore no ano de 2005, em centímetros.

### 3.3 Modelos testados para relação hipsométrica e diâmetro de copa

Para o estudo das variáveis altura total (h) e diâmetro de copa (dc) foram testados os modelos de regressão apresentados nas Tabelas 1 e 2.

Tabela 1 – Modelos lineares e não lineares avaliados para ajustar a relação hipsométrica.

Equação	Modelo	Autor
1	$\frac{1}{\sqrt{h_i}} = \beta_0 + \beta_1 \left( \frac{1}{d_i} \right) + \varepsilon_i$	-
2	$\sqrt{h_i} = \beta_0 + \beta_1 \ln(d_i) + \varepsilon_i$	-
3	$\ln(h_i) = \beta_0 + \beta_1 \ln(d_i) + \varepsilon_i$	Stofells
4	$\ln(h_i) = \beta_0 + \beta_1 \left( \frac{1}{d_i} \right) + \varepsilon_i$	Curtis
5	$h_i = \beta_0 + \beta_1 d_i + \beta_2 d_i^2 + \varepsilon_i$	Trorey
6	$h_i = \beta_0 + \beta_1 \ln(d_i) + \beta_2 \ln^2(d_i) + \varepsilon_i$	Backman Modificado
7	$h_i = \beta_0 (1 - \exp^{-\beta_1 (d_i)})^{\beta_2} + \varepsilon_i$	Chapman Richards
8	$h_i = \exp^{\beta_0 + \beta_1 \ln(d_i) + \beta_2 \ln^2(d_i)} + \varepsilon_i$	Backman

Em que:  $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ : são parâmetros dos modelos;  $\varepsilon_i$  = erro residual da i-ésima árvore;  $\ln$ = logaritmo natural;  $h_i$  = altura total da i-ésima árvore;  $d_i$  = diâmetro à altura do peito da i-ésima árvore. Fonte: Richards (1959); Mitscherlich e Sonntag (1982); Husch et al. (1982). \* Modelos não lineares ajustados pelo procedimento *NLIN*, através do método Gauss-Newton, no sistema estatístico SAS V 9.1. (SAS Institute Inc., 2004).

Tabela 2 – Modelos estatísticos avaliados para ajustar o diâmetro de copa em função do diâmetro à altura do peito.

Equação	Modelo	Fonte
1	$dc_i = \beta_0 + \beta_1 d_i + \varepsilon_i$	Longhi (1980)
2	$dc_i = \beta_0 + \beta_1 d_i^2 + \varepsilon_i$	Nutto et al. (2001)
3	$\ln(dc_i) = \beta_0 + \beta_1 d_i + \varepsilon_i$	Orellana e Koehler (2008)
4	$\ln(dc_i) = \beta_0 + \beta_1 \ln(d_i) + \varepsilon_i$	Durlo (2001)
5	$\sqrt{dc_i} = \beta_0 + \beta_1 d_i + \varepsilon_i$	-

Em que:  $\beta_0, \beta_1, \beta_2$ : são parâmetros dos modelos;  $\varepsilon_i$  = erro residual da i-ésima árvore;  $\ln$ = logaritmo natural;  $dc_i$  =diâmetro da copa da i-ésima árvore;  $d_i$  =diâmetro à altura do peito da i-ésima árvore.

### 3.4 Modelagem das relações morfométricas

As variáveis morfométricas: proporção de copa (Pc), formal de copa (Fc), grau de esbeltez (Ge), índice de abrangência (IA) e índice de saliência (IS) foram modeladas pelo procedimento *Stepwise* do sistema estatístico SAS V. 9.1 (SAS Institute Inc., 2004), em que a variável independente utilizada foi o diâmetro à altura do peito na forma simples, quadrática, cúbica, inversa e logarítmica ( $d, d^2, d^3, 1/d, 1/d^2, 1/d^3, \ln(d), \ln^2(d)$ ). O diâmetro à altura do peito foi empregado por ser uma variável de fácil obtenção e, frequentemente, medida em inventários florestais (SCHNEIDER e FINGER, 2000; MACHADO e FIGUEIREDO FILHO, 2003).

No caso das variáveis morfométricas que apresentaram as mesmas variáveis independentes durante a modelagem para as posições sociais dominante, codominante e dominada, realizou-se uma análise de covariância com o modelo comum com o objetivo de verificar diferenças em níveis e inclinações entre as equações de regressão. Em seguida, testou a possibilidade de expressar por modelo único a variável morfométrica através da categorização das posições sociais pelas variáveis Dummy, conforme descritos no item 3.6 e 3.7.

### 3.5 Critério de seleção das equações

A seleção da melhor equação de regressão ajustada para a relação hipsométrica e o diâmetro de copa baseou-se nos seguintes critérios estatísticos: coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj.}$ ), índice de furnival (IF), valor de Qui-quadrado ( $\chi^2$ ) e a distribuição gráfica dos resíduos. Após, foi avaliada a performance da equação escolhida pelas condicionantes de regressão.

#### 3.5.1 Coeficiente de determinação ajustado

O coeficiente de determinação expressa a quantidade de variação total explicada pela regressão. Este coeficiente é crescente na medida em que se inclui uma nova variável ao modelo de regressão, razão pela qual foi utilizado o coeficiente de determinação ajustado, que se obteve pela expressão:

$$R^2_{aj.} = R^2 - \left[ \frac{k-1}{N-K} \right] \cdot (1 - R^2) \quad (14)$$

Em que:  $R^2$ = coeficiente de determinação;  $K$ = número de parâmetros do modelo;  $N$ = número de observações.

Quanto mais próximo de 1 (um), o valor do coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj.}$ ), melhor será o ajuste da linha de regressão.

#### 3.5.2 Índice de Furnival

O índice de Furnival (IF) permite a comparação de equações, com variáveis dependentes logaritmizadas, ponderadas, transformadas ou não, em lugar da usual medida de precisão, expressa pelo erro padrão das estimativas (FURNIVAL, 1961).



Furnival (1961) indica que, em modelos sem transformação da variável dependente, o índice de furnival (IF) é igual ao erro padrão da estimativa, pois a sua derivada é igual a 1 (um). Porém, de acordo com Silva e Bailey (1991), o autor não considerou o número de parâmetros nos modelos o que pode ter levado a uma escolha errada da melhor equação. Desta forma, desconsiderá-lo implicaria em uma comparação tendenciosa em favor do modelo com menor número de parâmetros. Assim, os autores propuseram uma correção para o Índice de Furnival na seleção de modelos que é obtido pela expressão:

$$IF = \text{antilog} \left( \frac{\sum_{i=1}^n (\log(B'))}{n} \right)^{-1} S_{yx} \exp \left( \frac{n-p}{2n} \right) \quad (15)$$

Em que:  $S_{yx}$ = erro padrão da estimativa;  $B'$ = primeira derivada da função em relação à variável dependente transformada;  $n$ = número de observações;  $p$ = número de parâmetros do modelo.

Dessa maneira, selecionou-se o modelo que apresentou o menor valor de (IF). Na Tabela 3, seguem-se algumas transformações mais usuais para o cálculo do índice de Furnival, conforme mencionados por Alder (1980).

Tabela 3 – Primeira derivada de algumas variáveis dependentes transformadas usadas para o cálculo do índice de Furnival.

$Y_{\text{trans.}}$	$(B')^{-1}$
$\ln(B)$	$B$
$\log(B)$	$2,3026.B$
$B^k$	$\frac{1}{(k.B^{k-1})}$
$\sqrt{B}$	$2B^{1/2}$
$\frac{1}{B}$	$-B^2$

Em que:  $Y_{\text{trans.}}$ = Variável dependente transformada;  $\ln$ = logaritmo natural;  $\log$ =logaritmo decimal;  $B$ = variável dependente;  $k$ = potência da variável dependente. Fonte: Alder (1980).

### 3.5.3 Teste Qui-quadrado

Observou-se o valor de Qui-quadrado ( $\chi^2$ ) para verificar a validação dos modelos de regressão ajustados. O melhor modelo foi aquele que apresentou menor valor de Qui-quadrado.

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(y_i - \hat{y}_i)^2}{\hat{y}_i} \quad (16)$$

Em que:  $\chi^2$  = valor de Qui-quadrado;  $y_i$  = variável observada da i-ésima árvore;  $\hat{y}_i$  = variável estimada da i-ésima árvore.

### 3.5.4 Distribuição de resíduos

A análise gráfica da distribuição dos resíduos entre a variável dependente estimada foi de grande importância na seleção do modelo, visto que possibilita a verificação do ajuste da equação ao longo de toda a amplitude dos dados observados.

Dessa forma, selecionou-se o modelo que apresentou menor variação de resíduos, com menor tendência de superestimar ou subestimar os valores.

#### 3.5.4.1 Condicionantes da regressão

Na performance do modelo de regressão, uma série de suposições acerca dos erros foi avaliada pelo sistema estatístico SAS V 9.1 (SAS Institute Inc., 2004), conforme recomendaram Scolforo (2005) e Schneider et al. (2009), ou seja:

- Homogeneidade dos resíduos: pelo teste de White;
- Normalidade: pelo teste Shapiro - Wilk;
- Independência: pelo teste de Durbin - Watson.

### 3.6 Análise de covariância

A análise de covariância foi usada para verificar a existência ou não de diferenças de inclinação ou em níveis nas linhas ajustadas entre as posições sociais dominante, codominante e dominada. Os pontos extremos foram analisados e avaliados e, quando necessário eliminados. A análise foi processada no pacote estatístico SAS V 9.1 (SAS Institute Inc., 2004), utilizando-se o procedimento GLM e a soma de quadrados do tipo III que forneceram a informação mais adequada para o caso de dados não balanceados (FREUND e LITTEL, 1981; COIMBRA et al., 2006).

### 3.7 Análise de regressão com variável Dummy

Com a determinação da melhor equação para estimar a variável de interesse para as três posições sociais: dominante, codominante e dominada, foram criadas variáveis Dummy para atribuir um valor qualitativo a variáveis contínuas na equação de regressão.

Definiu-se que Dummy 1 (D1) representaria as árvores de classe social codominada e Dummy 2 (D2), as dominadas. Não foi usada variável Dummy para as árvores dominantes, pois o próprio modelo, sem a inclusão de variáveis Dummy, representava este grupo sociológico. Assim sendo, foi possível expressar os modelos individuais que foram definidos por Schneider et al. (2009) como:

$$\begin{aligned}
 R_1 &= \hat{Y}_1 + \beta_{11}X_1 + \beta_{12}X_2 + \dots + \beta_{1m}X_m + \varepsilon_i \\
 R_2 &= \hat{Y}_2 + \beta_{21}X_1 + \beta_{22}X_2 + \dots + \beta_{2m}X_m + \varepsilon_i \\
 R_3 &= \hat{Y}_3 + \beta_{31}X_1 + \beta_{32}X_2 + \dots + \beta_{3m}X_m + \varepsilon_i
 \end{aligned}
 \tag{17}$$

O resultado propiciou investigar a possibilidade de expressar todos os modelos individuais em um modelo linear múltiplo, denominado de Regressão Máxima, representada pela expressão:

$$R: \hat{Y} = \beta_{11}X_{11} + \beta_{12}X_{12} + \dots + \beta_{1m}X_{1m} + \beta_{21}X_{21} + \beta_{22}X_{22} + \dots + \beta_{2m}X_{2m} + \dots + \beta_{31}X_{31} + \beta_{32}X_{32} + \dots + \beta_{3m}X_{3m} + \varepsilon_i \quad (18)$$

em que,

$$\begin{aligned} X_{11} &= D_1X_1, X_{12} = D_1X_2, \dots, X_{1m} = D_1X_m; \\ X_{21} &= D_2X_1, X_{22} = D_2X_2, \dots, X_{2m} = D_2X_m; \\ X_{31} &= D_3X_1, X_{32} = D_3X_2, \dots, X_{3m} = D_3X_m; \end{aligned} \quad (19)$$

Em que: Y= variável dependente;  $X_{ij}$ = variáveis independentes;  $\beta_{ij}$ : são parâmetros dos modelos;  $\varepsilon_i$  = erro residual; D1, D2, D3= variáveis Dummy definida pela posição social;  $R_{1,2,3}$ = modelos individuais para cada grupo sociológico, respectivamente; R= regressão máxima.

### 3.8 Análise de correlação de Pearson

O incremento periódico em área basal foi relacionado com as variáveis dendrométricas e morfométricas das árvores, viabilizando identificar e selecionar as variáveis que influenciaram em maior ou menor grau sobre o crescimento, adotando-se o uso do coeficiente de correlação de Pearson.

### 3.9 Modelagem e avaliação do modelo incremento periódico em área basal

A modelagem do incremento periódico em área basal foi realizada pelo procedimento *stepwise* do pacote estatístico SAS V 9.1 (SAS Institute Inc., 2004), com as variáveis mais correlacionadas entre: dendrométricas e morfométricas, juntamente com a interação de variáveis discretas Dummy designadas pelas classes diamétricas e as posições sociais das árvores.

Para contornar o efeito da heterocedasticidade e não normalidade, a variável dependente foi transformada e, para tal, utilizou-se a família de transformações Box e Cox (BOX e COX, 1964).

Na determinação de observações influentes, denominadas “valores estranhos” ou *outliers*, foi usada a análise residual mencionada no item 3.5.4 e a

distância de Cook's ( $D_i$ ) descrita por Souza (1998). As observações que se encontravam afastadas da massa de pontos foram identificadas e examinadas na base de dados. Neter et al. (1996) sugeriram investigar qualquer ponto com valor de  $D_i$  maior que 1 (um). Nos casos em que o modelo foi reajustado, sem esses pontos, e houve melhora no ajuste do modelo, os pontos foram considerados influentes e eliminados da base de dados.

A identificação da colinearidade na estimativa dos coeficientes de regressão foi feita com base no fator de inflação da variância - FIV, considerado um valor de FIV superior a 10, conforme definido por Draper e Smith (1966).

As condicionantes da regressão foram avaliadas simultaneamente em todas as etapas descritas anteriormente, seguindo os testes descritos no item 3.5.4.1.



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÃO

### 4.1 Características morfométricas

No estudo das características morfométricas das árvores individuais de *Araucaria angustifolia*, a estratificação das 294 árvores amostradas resultou em 193 (65,65%) indivíduos dominantes; 40 (13,61%) codominantes e 61 (20,75%) dominadas.

A amostra teve boa representatividade nas classes de posição sociológica ao longo da distribuição diamétrica (Figura 3) com um erro de amostragem relativo de 3,81% para árvores dominantes, de 9,02% para árvores codominantes e de 7,99% para as árvores dominadas.

Árvores dominantes e codominantes foram mais frequentes na classe de diâmetro entre 40 a 50 cm; com 47 e 16 indivíduos, respectivamente. Para diâmetro menor que 30 cm, as árvores dominadas representaram 46,68% das encontradas na floresta.

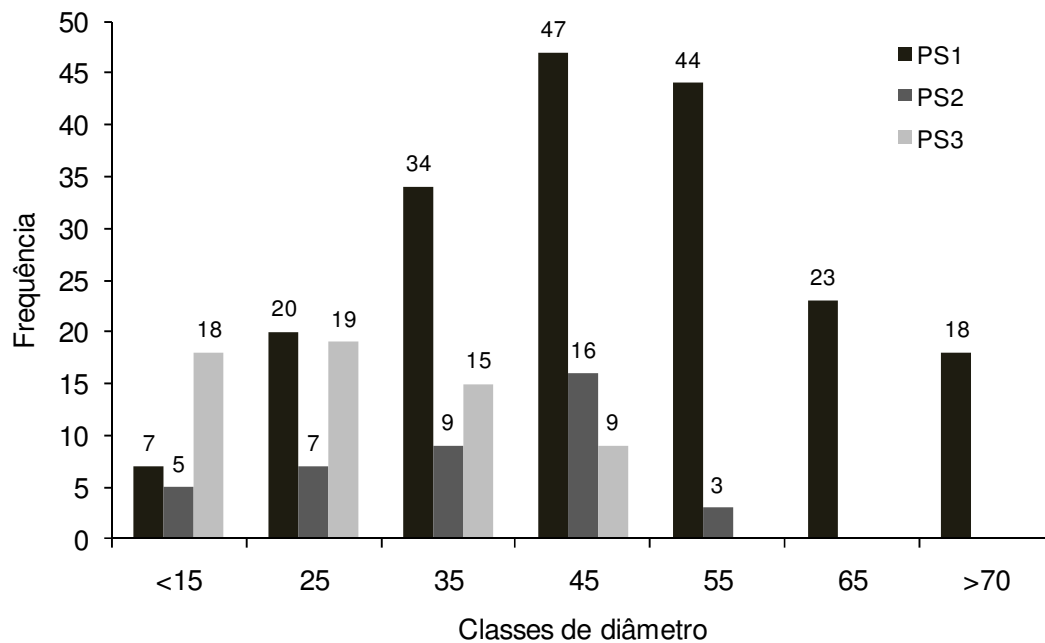


Figura 3 - Distribuição diamétrica por posição sociológica: dominante (PS1), codominante (PS2) e dominada (PS3), das árvores de araucária em Lages, SC.

A distribuição de frequência por classe de diâmetro das árvores dominantes, apresentadas na Figura 3, demonstrou tendência a aproximar-se de uma distribuição normal (distribuição de Gauss), porém, esta distribuição é resultante da inclusão das árvores competidoras no cálculo das variáveis morfométricas, visto que a distribuição de frequência das árvores objetivo sobre as classes de diâmetro foi retangular.

#### 4.1.1 Variáveis dendrométricas

A amplitude dos diâmetros variou de 10,2 a 85,8 cm com média e desvio padrão das árvores dominantes de  $47,8 \pm 15,30$  cm, das codominantes de  $36,1 \pm 12,21$  cm e das dominadas de  $28,2 \pm 10,54$  cm, conforme a Tabela 4.



Tabela 4 – Variáveis dendrométricas de *Araucaria angustifolia* estratificadas por posição sociológica.

Variável	PS	N	Média	s	Min.	Máx.
Diâmetro	PS1	193	47,8	15,30	14,7	85,8
	PS2	40	36,1	12,21	9,9	58,9
	PS3	61	28,2	10,54	10,2	49,5
Altura Total	PS1	193	18,1	3,33	9,1	24,9
	PS2	40	16,1	3,63	7,2	21,2
	PS3	61	14,5	2,83	8,0	19,6
Altura do Fuste	PS1	193	12,7	4,14	3,0	19,1
	PS2	40	11,8	4,12	3,8	17,8
	PS3	61	10,7	3,24	3,3	15,9

Em que: PS=posição sociológica: 1=dominante, 2=codominante, 3=dominada, n=número de indivíduos; Média=média aritmética; s=desvio padrão; Min.=valor mínimo; Máx.=valor máximo.

Os valores médios registrados para a altura foram 18,1; 16,1 e 14,5 m para árvores das classes dominantes, codominantes e dominadas, respectivamente. A altura do fuste seguiu a mesma tendência, porém com menor amplitude de variação. Essa altura resultou da desrama natural, cujo limite foi definido pela intensidade lumínica decrescente a partir da superfície do dossel.

As árvores codominantes possuíam, em média, a altura do fuste 0,9 m menor que as árvores dominantes, mas ambas posições sociológicas têm uma grande amplitude entre valores mínimos e máximos, devido ao agrupamento ou à classificação das posições sociológicas que considerou a exposição da copa à luz, assim como a altura da árvore, levando a concluir que, em uma mesma posição sociológica da árvore, existiam diferentes idades e dimensões.

A dinâmica da desrama natural pode ser controlada com a manutenção do dossel fechado, acarretando menor crescimento em diâmetro, o que significa um período de rotação mais longo, sendo viável de acordo com as metas de produção estabelecida (NUTTO e SPATHELF, 2003).

## 4.1.1.1 Relação hipsométrica

Os dados mensurados da altura e do diâmetro estratificados por posição sociológica permitiram obter equações com ajustes superiores a 43%, conforme os dois melhores modelos lineares e não lineares pré-selecionados por posição social, como pode ser visto na Tabela 5.

Nos Anexos A a H, podem ser analisadas as estatísticas dos modelos da Tabela 1 ajustados por posição sociológica ocupada pelas árvores amostradas.

Tabela 5 – Estatísticas das melhores equações ajustadas da relação hipsométrica por posição social e desconsiderando a posição social.

Eq.	Tipo	PS	Coeficientes			Estatísticas		
			$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$R^2_{aj.}$	IF	$\chi^2$
5	Linear	PS1	4,0433	0,4499	-0,0030	0,6236	3,3475	46,6373
6			-9,8336	7,3292	-	0,6209	3,3684	47,2314
7	Não		22,3199	0,0412	1,1442	0,6293	3,3223	46,1877
8	Linear		-1,7591	2,0590	-0,2187	0,6288	3,3246	46,2639
5	Linear	PS2	-	0,8257	-0,0095	0,9824	3,5163	11,4382
6			-49,5739	33,6622	-4,2026	0,6022	3,6330	12,9022
7	Não		19,2945	0,0570	-	0,5883	3,7425	13,2989
8	Linear		-5,2985	4,3773	-0,5858	0,6424	3,4446	11,7947
5	Linear	PS3	-	0,9063	-0,0123	0,9785	3,5125	19,5752
6			-41,7436	30,7030	-4,0709	0,4501	3,3762	17,8529
7	Não		16,9646	0,0790	-	0,4408	3,4325	18,6262
8	Linear		-	1,3595	-0,1638	0,4324	3,4582	18,9336
5	Linear	T	6,0287	0,3748	-0,0023	0,6250	3,6046	87,9736
6			-6,9407	6,5660	-	0,6350	3,5622	85,2043
7	Não		23,3041	0,0267	0,6963	0,6325	3,5680	85,5943
8	Linear		-	1,1655	-0,1062	0,6347	3,5634	85,2916

Em que: Eq.= número da equação; PS=posição sociológica: 1=dominante, 2=codominante, 3=dominada, T=todos os dados, desconsiderando as posições sociológicas;  $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2$  = são coeficientes;  $R^2_{aj.}$ = coeficiente de determinação ajustado; IF= índice de Furnival;  $\chi^2$  = estatística Qui-quadrado.

As equações lineares e não lineares selecionadas para a posição social dominante apresentaram estatísticas muito semelhantes (Tabela 5), mas com pequena superioridade para a equação 7, representada pelo modelo de Chapman-

Richards, com ajuste de ( $R^2_{aj}=0,6293$ ), menor valor do índice de furnival ( $IF=3,3223$ ) e, na etapa de validação da equação, encontrou-se o menor valor de Qui-quadrado ( $\chi^2=46,1877$ ). Na análise dos resíduos a equação 7, visualizado em Anexo na Figura 25, mostrou homogeneidade de variância pelo teste de White ( $Prob.=0,1243$ ), normalidade pelo teste de Shapiro e Wilk ( $Prob.=0,5986$ ); entretanto, os resíduos foram dependentes pelo teste de Durbin e Watson, ou seja, evidenciaram correlação em série ( $Prob.=0,0001$ ) indicando que o método dos mínimos quadrados poderia não dar as melhores estimativas, bem como não se poderia utilizar as distribuições t e F para testar hipóteses ou determinar intervalos de confiança. Assim, o modelo selecionado para estimar a altura total das árvores dominantes tornou-se aplicável, porém, tendencioso. Observou-se que as árvores deste estrato social tendem a alcançar o seu valor assintótico em torno dos 22,3 metros de altura, conforme o valor obtido no coeficiente  $\hat{\beta}_0$  da equação 7.

Para as árvores da classe codominantes, a equação 5 representada pelo modelo de Trorey foi o que apresentou as melhores estatísticas (Tabela 5). O elevado valor de ajuste ( $R^2_{aj}=0,9824$ ) foi consequência da eliminação do intercepto  $\hat{\beta}_0$  da equação de regressão, que não alcançou o limite estabelecido de significância ( $Prob.>0,05$ ). Verificou-se que a equação obteve valor do índice de furnival de ( $IF=3,5163$ ) e, na etapa de validação da equação, encontrou-se o menor valor de Qui-quadrado ( $\chi^2=11,4382$ ). Na análise dos resíduos a equação 5, visualizado em Anexo na Figura 26, mostrou homogeneidade de variância pelo teste de White ( $Prob.=0,2474$ ), normalidade pelo teste de Shapiro e Wilk ( $Prob.=0,5130$ ) e independência pelo teste de Durbin e Watson ( $Prob.=0,2771$ ). Sendo assim, a melhor equação para estimar a altura total de árvores codominantes.

Para as árvores dominadas e com todos os dados agrupados em um único conjunto, desconsiderando a posição social, a equação 6 representada pelo modelo de Backman modificado foi a que apresentou as melhores estatísticas (Tabela 5), com ajustes de ( $R^2_{aj}=0,4501$ ) e ( $R^2_{aj}=0,6350$ ), respectivamente. Constatou-se que, em árvores dominadas, a equação 6 obteve significância ( $Prob.<0,05$ ) para todos os seus coeficientes, ao contrário, quando considerado todo conjunto de dados, o coeficiente  $\beta_2$  foi não significante a ( $Prob.>0,05$ ). Neste caso, foi reajustada a equação somente com os coeficientes significantes.

Na equação 6, em árvores dominadas, o índice de furnival foi de (IF=3,3762) e, na etapa de validação da equação, obteve-se o menor valor de Qui-quadrado ( $\chi^2=17,8529$ ). Na análise dos resíduos, a equação 6 em árvores dominadas, visualizado em Anexo na Figura 27, denotou homogeneidade de variância pelo teste de White (Prob.=0,2860), normalidade pelo teste de Shapiro e Wilk (Prob.=0,4098) e independência pelo teste de Durbin e Watson (Prob.=0,0221), se for considerado um nível de significância mais rigoroso (Prob.<0,01). A equação 5, apesar de cumprir todos os pressupostos das condicionantes da regressão, mostrou ser menos eficiente devido ao maior valor do índice de furnival (IF=3,5125) e, sobretudo, por apresentar maior valor de Qui-quadrado ( $\chi^2=19,5752$ ).

Para os dados agrupados em um único conjunto, desconsiderando a posição social, a equação 6 apresentou ajuste de ( $R^2_{aj}=0,6350$ ) e valor do índice de furnival de (IF=3,5622). Na validação do modelo, obteve-se menor valor de Qui-quadrado ( $\chi^2=85,2043$ ). Na análise residual da equação 6, visualizado em Anexo na Figura 28, registraram-se valores distantes da média em até 6 m, entretanto, verificou-se que os resíduos são homocedásticos pelo teste de White (Prob.=0,0527) e têm distribuição normal pelo teste de Shapiro e Wilk (Prob.=0,5985), mas são correlacionados em série, segundo o teste de Durbin Watson (Prob.=0,0001).

A análise de covariância com a inclusão de variáveis Dummy ao modelo de Backman modificado mostrou valores de probabilidade significantes para as variáveis D1 (Prob.=0,0027) e D2 (Prob.<0,0001), indicando que existem diferenças entre níveis das posições sociológicas codominante e dominada em relação às dominantes (Tabela 6). O mesmo resultado de significância também foi observado na interação das variáveis Dummy com a variável independente do modelo Ln(d)\*D1 com (Prob.=0,0029) e Ln(d)\*D2 com (Prob.=0,0001), evidenciando que os três grupos de posição sociológica apresentaram regressões distintas quanto ao intercepto e à inclinação das curvas, não permitindo o emprego de uma única relação hipsométrica para descrever os grupos que se encontram na Figura 4.

Tabela 6 – Análise de covariância da relação hipsométrica com o modelo de Backman modificado para as três posições sociais.

FV	GL	SQ	QM	F	Prob.>F
Modelo	6	2519,00	419,83	96,13	<0,0001
Erro	287	1253,45	4,37		
Total	293	3772,45			
ln(d)	1	115,18	115,18	26,37	<0,0001
ln <sup>2</sup> (d)	1	67,15	67,15	15,38	0,0001
D1	1	39,85	39,85	9,12	0,0027
D2	1	112,70	112,70	25,81	<0,0001
ln(d)*D1	1	39,54	39,54	9,05	0,0029
ln(d)*D2	1	114,07	114,07	26,12	0,0001

Em que: FV=fonte de variação; GL= graus de liberdade; SQ= soma de quadrados; QM= quadrado médio; F= valor de F; Prob.>F= probabilidade de significância para o valor de F; Ln= logaritmo natural; d= diâmetro à altura do peito; D1= variável Dummy para árvores codominantes; D2= variável Dummy para árvores dominadas.

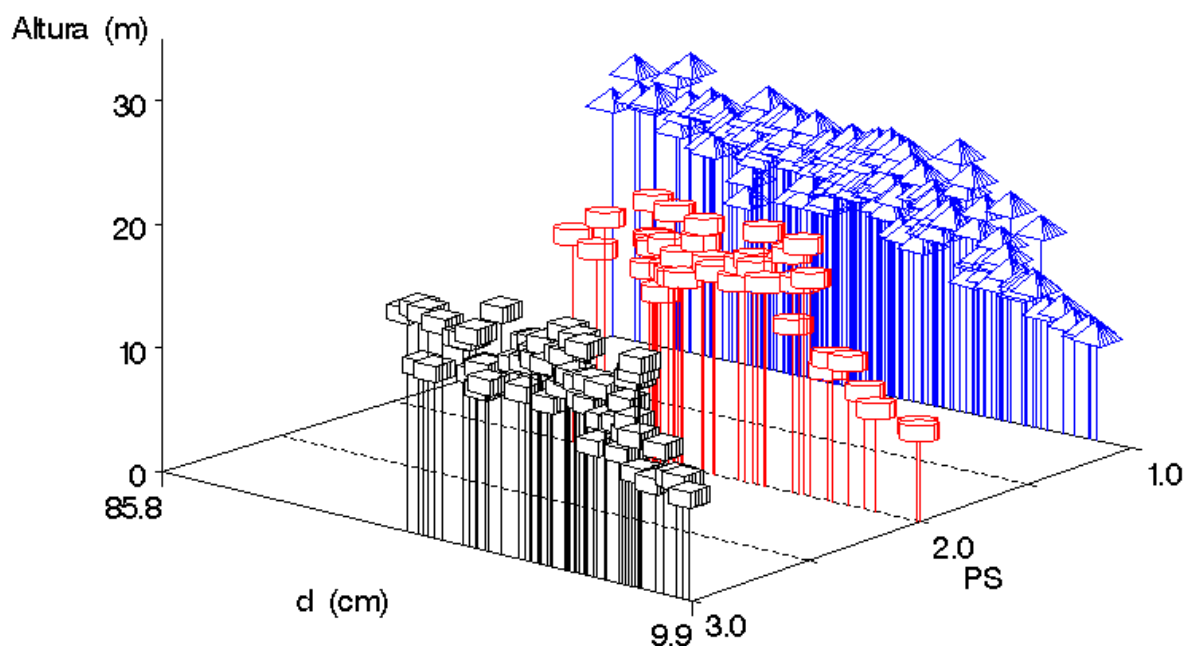


Figura 4 – Comportamento da relação hipsométrica por posição social: PS1 - dominante; PS2 - codominante; PS3 - dominada.

Na Tabela 7, tem-se a análise de variância e o seu respectivo resumo estatístico do modelo máximo da relação hipsométrica com variáveis Dummy para as três posições sociais.

Tabela 7 – Análise de variância e resumo estatístico dos parâmetros estimados da relação hipsométrica com variável Dummy para *Araucaria angustifolia*.

FV	GL	SQ	QM	F	Prob.>F
Modelo	6	2519,00	419,83	96,13	<0,0001
Erro	287	1253,45	4,37		
Total	293	3772,45			

Variável	Parâmetros Estimados	Erro Padrão	Valor de t	Prob.> t	FIV
Intercepto	-45,13151	9,1440	-4,94	<0,0001	0,00
ln(d)	26,80110	4,9835	5,38	<0,0001	316,56
ln <sup>2</sup> (d)	-2,65568	0,6773	-3,92	<0,0001	288,21
D1	11,49386	3,8050	3,02	0,0027	114,56
D2	17,74307	3,4928	5,08	<0,0001	135,04
ln(d)*D1	-3,18627	1,0590	-3,01	0,0029	111,19
ln(d)*D2	-5,18159	1,0139	-5,11	<0,0001	123,61

Em que: FV= fonte de variação; GL= graus de liberdade; SQ= soma de quadrados; QM= quadrado médio; F= valor de F; Prob.>F= probabilidade de significância para o valor de F; d= diâmetro à altura do peito; D1= variável Dummy para árvores codominantes; D2= variável Dummy para árvores dominadas; FIV= fator de inflação de variância.

O modelo máximo com variáveis Dummy apresentou ajuste de ( $R^2_{aj.}=66,08\%$ ) e erro padrão da estimativa em porcentagem de ( $S_{yx}\%=12,24\%$ ). No entanto, as variáveis independentes indicaram valor de FIV (Fator de inflação de variâncias) maior que 10, verificando-se a presença de multicolinearidade.

Segundo Montgomery e Peck (1981), quando o valor de FIV for entre 100 e 1000 indica que a colinearidade é moderada a forte. No presente estudo, não se realizaram os procedimentos para evitar-se os efeitos adversos da colinearidade, todavia, recomenda-se que os efeitos da multicolinearidade podem ser contornados, empregando-se métodos alternativos ao de mínimos quadrados na estimação dos coeficientes de regressão, dentre estes métodos, destacam-se a regressão em componentes principais e em crista ou em cumeeira (SCOLFORO, 2005; SCHNEIDER et al., 2009).

Deve ser salientado que, apesar do método dos mínimos quadrados em geral produzir estimativas dos parâmetros individuais do modelo demasiadamente instável na presença de multicolinearidade, isto necessariamente não implica que o modelo seja mau preditor, desde que as estimativas estejam restritas à região do espaço das variáveis independentes em que a multicolinearidade verifica-se, o modelo ajustado frequentemente produz previsões satisfatórias (SCOLFORO, 2005). Desta forma, o modelo máximo com variáveis Dummy propiciou melhor ajuste quando

comparado com os modelos ajustados sem variáveis Dummy para todo o conjunto de dados (Tabela 5), além de permitir expressar as três posições sociais por modelo único.

A equação da relação hipsométrica para as três posições sociais está representada na Figura 5 e passa a ser expressa por:

$$\hat{h}_i = -45,13151 + 26,80110 \ln(d)_i - 2,65568 \ln^2(d)_i + 11,49386 D1_i + 17,74307 D2_i - 3,18627 (\ln(d) D1)_i - 5,18159 (\ln(d) D2)_i \quad (20)$$

Em que:  $\hat{h}_i$  = altura total da i-ésima árvore;  $d_i$  = diâmetro à altura do peito da i-ésima árvore; D1= variável Dummy para árvores codominantes; D2= variável Dummy para árvores dominadas.

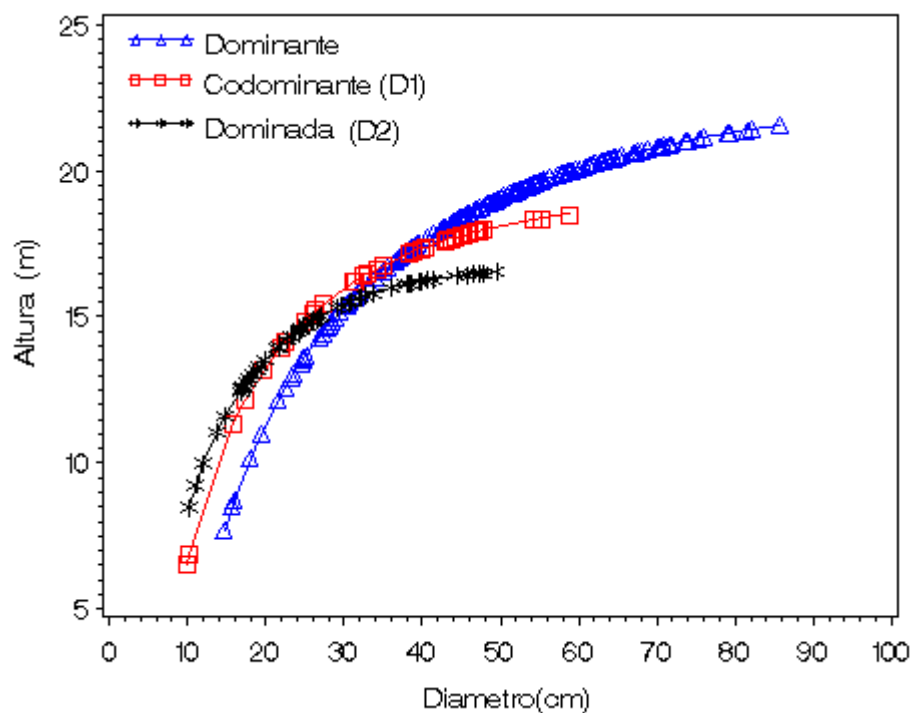


Figura 5 – Desenvolvimento das curvas da relação hipsométrica para árvores de *Araucaria angustifolia* na posição sociológica dominante, codominante (D1) e dominada (D2) estimada com o modelo de Backman modificado com variáveis Dummy.

As curvas da relação hipsométrica representadas na Figura 5 indicaram que, nas idades iniciais, as árvores codominantes e dominadas investiram mais no crescimento em altura por falta de luz à copa e, conseqüentemente, apresentaram

menor incremento em diâmetro. Mas, com o aumento da idade, o crescimento em altura foi se estabilizando, refletindo a diminuição do vigor das árvores, sendo que esse comportamento ocorreu mais rapidamente em indivíduos codominantes e dominados e, por esta razão que, para um mesmo diâmetro, foram obtidas diferentes alturas.

#### 4.1.2 Morfometria da copa

##### 4.1.2.1 Diâmetro de copa

Na Tabela 8, foram apresentadas as duas melhores equações ajustadas por posição social, os seus coeficientes e as estatísticas para o diâmetro de copa em função do diâmetro à altura do peito calculado pela média dos 8 (oito) raios medidos nas copas. Os resultados dos demais modelos, apresentados na Tabela 2, foram reunidos nos Anexos I ao L.

Tabela 8 – Estatísticas das melhores equações ajustadas do diâmetro de copa em função do diâmetro à altura do peito por posição social e desconsiderando a posição social.

Eq.	PS	Coeficientes		Estatísticas		
		$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$R^2_{aj.}$	IF	$\chi^2$
3	PS1	1,3291	0,0211	0,8207	2,5543	45,9319
5		1,6695	0,0334	0,8310	2,4285	40,1251
2	PS2	4,1030	0,0027	0,7128	2,3247	9,3812
5		1,5176	0,0354	0,7516	2,1824	8,6072
1	PS3	-	0,2496	0,9619	2,4441	18,9502
5		1,3195	0,0455	0,6988	2,5776	20,5491
1	T	0,7624	0,2138	0,8385	2,4972	69,0668
5		1,5910	0,0350	0,8291	2,5294	73,1087

Em que: N= número da equação; PS=posição sociológica: 1=dominante, 2=codominante, 3=dominada, T=todos os dados, desconsiderando as posições sociológicas;  $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1$  = são coeficientes;  $R^2_{aj.}$ = coeficiente de determinação ajustado; IF%= índice de Furnival em %; Syx%= erro padrão da estimativa em %;  $\chi^2$  = estatística Qui-quadrado; F= valor de F calculado.



As equações selecionadas por posição social e para todo o conjunto de dados, desconsiderando as posições, apresentaram ajustes superior a 69%. No grupo das árvores dominantes, o modelo linear simples com transformação da variável dependente em raiz quadrada foi que apresentou as melhores estatísticas, com ajuste de ( $R^2_{aj.}=0,8310$ ), menor valor do índice de furnival ( $IF=2,4285$ ) e, na etapa de validação da equação, encontrou-se o menor valor de Qui-quadrado ( $\chi^2=40,1251$ ). Na análise dos resíduos, a equação 5, visualizada em Anexo na Figura 29, mostrou homogeneidade de variância pelo teste de White ( $Prob.=0,1558$ ), normalidade pelo teste de Shapiro e Wilk ( $Prob.=0,9758$ ) e independência dos resíduos pelo teste de Durbin e Watson ( $Prob.= 0,2171$ ), ou seja, indicou que os resíduos não estão correlacionados em série.

Para as árvores da classe codominantes, a equação 5 representada pelo modelo linear simples com transformação da variável dependente em raiz quadrada foi a que expressou as melhores estatísticas (Tabela 8). Verificou-se que a equação obteve ajuste de ( $R^2_{aj.}=0,7516$ ) e menor valor do índice de furnival ( $IF=2,1824$ ) e, na etapa de validação da equação, encontrou-se o menor valor de Qui-quadrado ( $\chi^2=8,6072$ ). Na análise dos resíduos, a equação 5, visualizada em Anexo na Figura 30, apresentou dois pontos extremos em relação a média, que foram analisados e avaliados na base de dados (medições destas duas árvores) e não foram associados a nenhum erro, portanto, foram mantidos durante os ajustes das equações, visto que são pontos causuais, mas que representaram a verdadeira condição existente das árvores mensuradas na floresta. Assim sendo, na análise dos pressupostos da regressão da equação 5, visualizada em Anexo na Figura 30, registrou-se homogeneidade de variância pelo teste de White ( $Prob.=0,6111$ ), independência pelo teste de Durbin e Watson ( $Prob.=0,5037$ ) e normalidade pelo teste de Shapiro e Wilk ( $Prob.=0,0168$ ) quando considerado um nível de significância ( $Prob.<0,01$ ). Porém, cabe mencionar que, a normalidade dos resíduos tornou-se importante avaliar quando se tem desvios muito acentuados de assimetria.

Na classe das árvores dominadas encontradas na Tabela 8, o modelo linear simples sem transformação na variável dependente foi melhor, apresentando elevado valor de coeficiente de determinação ajustado de ( $R^2_{aj.}=0,9619$ ), consequência da eliminação do intercepto  $\hat{\beta}_0$  da equação de regressão, que não alcançou o limite estabelecido de significância ( $Prob.<0,05$ ). Nas demais estatísticas,

a equação 1 foi superior quando comparada com a equação 5, mas isso não indica o não uso da equação 5 na estimativa do diâmetro de copa das árvores neste estrato social, além de que a equação expressou estatísticas satisfatórias e cumpriu os pressupostos de homogeneidade de variância e independência dos resíduos. Desta forma, optou-se pela equação 1 como a mais eficiente para estimar o diâmetro de copa das árvores de posição social dominada por revelar menor valor do índice de furnival ( $IF=2,4441$ ) e, na etapa de validação da equação, encontrou-se o menor valor de Qui-quadrado ( $\chi^2=18,9502$ ). Na análise dos resíduos, a equação 1, visualizada em Anexo na Figura 31, mostrou homogeneidade de variância pelo teste de White (Prob.=0,1770), normalidade pelo teste de Shapiro e Wilk (Prob.=0,0751) e independência dos resíduos pelo teste de Durbin e Watson (Prob.= 0,1570).

Na modelagem do diâmetro de copa, os dados de posição social agrupados mostraram estatísticas de ajustes equivalentes para as equações 1 e 5 de (Eq. 1 -  $R^2_{aj.}=0,8385$ ; Eq. 5 -  $R^2_{aj.}=0,8291$ ), como podem ser observados na Tabela 8. Entretanto, o menor valor do índice de furnival foi obtido pela equação 1 de ( $IF=2,4972$ ) e, na etapa de validação da equação, chegou-se ao menor valor de Qui-quadrado ( $\chi^2=69,0668$ ). Contudo, a limitação do uso da equação 1 pode ser observado quando verificou-se a análise residual, visualizada em Anexo na Figura 32, evidenciando heterocedasticidade de variância pelo teste de White (Prob.=0,0023), enquanto a equação 5 foi homocedástica pelo mesmo teste (Prob.=0,6580), apresentando também normalidade pelo teste de Shapiro e Wilk (Prob.=0,0715) e independência de resíduos pelo teste Durbin e Watson (Prob.=0,3369), sendo a ideal para estimar o diâmetro de copa para todo o conjunto de dados.

A análise das condicionantes para a equação ajustada tornou-se de extrema importância, porque todos os testes da análise de variância basearam-se na distribuição F e, conseqüentemente, na distribuição t, que considera hipótese básica de distribuição normal, homogeneidade e independência dos resíduos.

Com isso, na seleção de modelos matemáticos deve-se verificar, além dos critérios estatísticos tradicionais ( $R^2$ ;  $R^2_{aj}$ ;  $S_{yx}\%$ ; F; IF e etc.), o cumprimento dos pressupostos de regressão.

Os estudos publicados que descreveram a relação do diâmetro de copa e diâmetro à altura do peito referiram tendência linear ou levemente curvilínea entre

essas variáveis, sem diferenciar classes sociológicas (LONGHI, 1980; OLIVEIRA, 1982; SEITZ, 1991; NASCIMENTO et al., 2010). No entanto, vale destacar que a tendência linear simples torna-se quadrática com o aumento do porte das árvores (diâmetro à altura do peito superior a 80 cm, aproximadamente), havendo, pois, a necessidade da adição de um termo quadrático como variável independente no modelo, como pode ser observado em Nutto (2001) e Lisboa (2009), indicando que, a partir dessa dimensão, as árvores continuam crescendo em diâmetro à altura do peito, mas tendem a estabilizar o seu crescimento em diâmetro de copa.

Nutto (2001) demonstrou que a transformação da variável dependente (diâmetro de copa) em raiz quadrada e mais a adição de um termo quadrático como variável independente no modelo de regressão  $\sqrt{dc_i} = \beta_0 + \beta_1 d_i + \beta_2 d_i^2 + \varepsilon_i$  melhorou o ajuste e a precisão, além de atender os critérios de variância constante e a distribuição normal dos resíduos, no entanto, não mencionou o critério de independência de resíduos.

No presente estudo, para todo o conjunto de dados, desconsiderando a posição social, a adição do termo quadrático como variável independente no modelo de regressão não foi significativa (Prob.>0,05), revelando que, nas árvores amostradas, ainda não ocorreu a estabilização da dimensão diâmetro de copa, devendo o modelo linear simples com a transformação da variável dependente em raiz ser utilizado para descrever a relação.

A análise de covariância com a inclusão de variáveis Dummy ao modelo linear simples transformado a variável dependente em raiz quadrada apontou valor de probabilidade significativa apenas para a variável Dummy D2 (Prob.= 0,0017), indicando diferença entre os níveis da posição sociológica dominada em relação as dominantes (Tabela 9). O mesmo resultado de significância também foi observado na interação da variável Dummy com a variável independente do modelo (d)\*D2 com (Prob.=0,0003), explicitando que apenas o grupo das árvores dominada apresentou regressões distintas quanto ao intercepto e à inclinação das curvas. Assim, a dimensão da copa varia com o diâmetro e com a posição social das árvores dominadas, não sendo possível o emprego de uma única equação para descrever os grupos que se encontram na Figura 6.

Tabela 9 – Análise de covariância do diâmetro de copa em função do diâmetro à altura do peito para as três posições sociais.

FV	GL	SQ	QM	F	Prob.>F
Modelo	5	94,9781	18,9956	299,79	<0,0001
Erro	288	18,2484	0,0634		
Total	293	113,2265			
D	1	20,2990	20,2990	320,36	<0,0001
D1	1	0,0757	0,0757	1,20	0,2752
D2	1	0,6391	0,6391	10,09	0,0017
d*D1	1	0,0197	0,0197	0,31	0,5778
d*D2	1	0,8482	0,8482	13,39	0,0003

Em que: FV=fonte de variação; GL= graus de liberdade; SQ= soma de quadrados; QM= quadrado médio; F= valor de F; Prob.>F= probabilidade de significância para o valor de F; Ln= logaritmo natural; d= diâmetro à altura do peito; D1= variável Dummy para árvores codominantes; D2= variável Dummy para árvores dominadas.

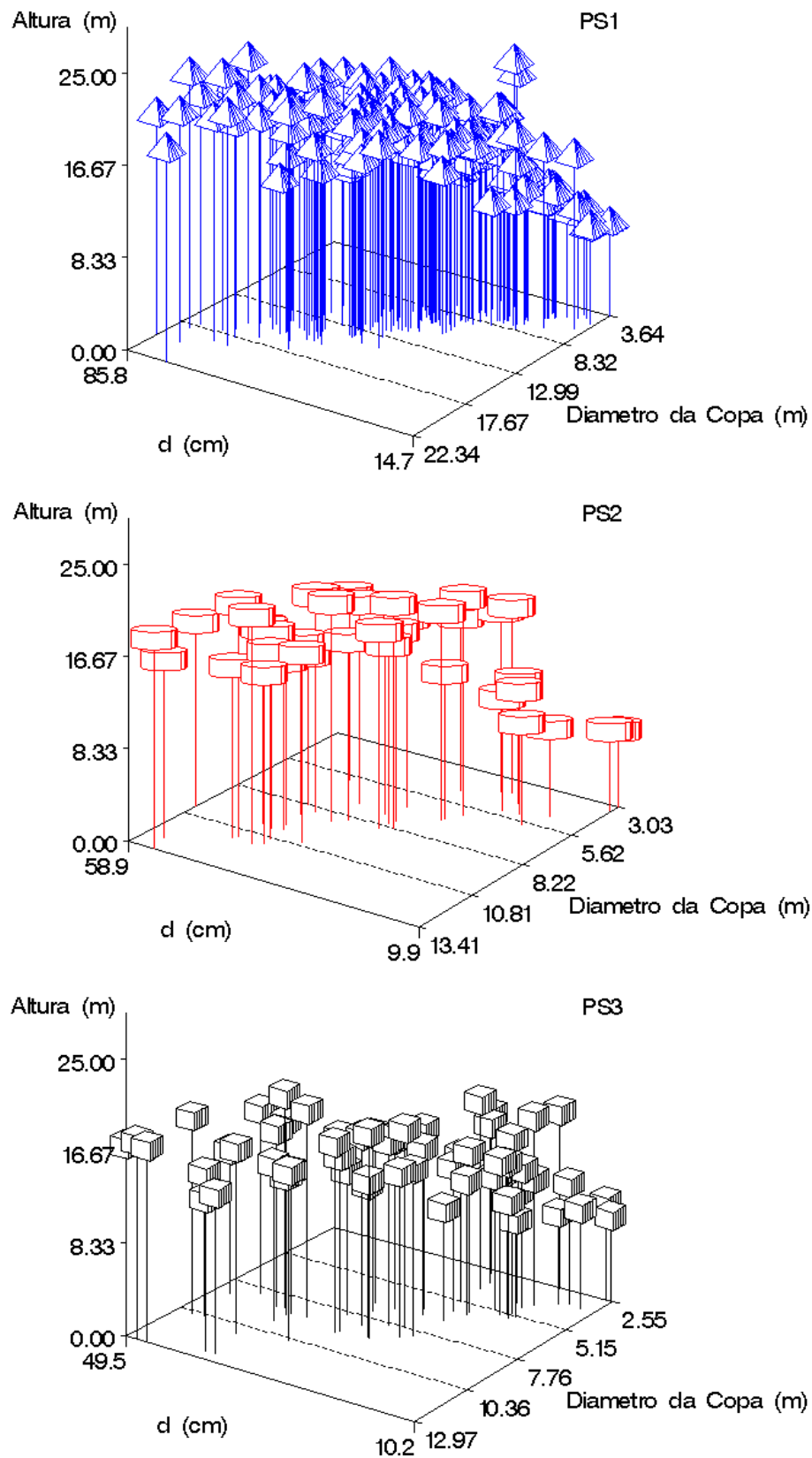


Figura 6 – Comportamento do diâmetro de copa em função do diâmetro a altura do peito por posição social: dominante (PS1); codominante (PS2); dominada (PS3).

Na Tabela 10, tem-se a análise de variância e o seu respectivo resumo estatístico do modelo máximo reajustado apenas para as variáveis significantes do diâmetro de copa em função do diâmetro à altura do peito com variáveis Dummy para as três posições sociais.

Tabela 10 –Análise de variância e o resumo estatístico dos parâmetros estimados do diâmetro de copa em função do diâmetro à altura do peito com variável Dummy para *Araucaria angustifolia*.

FV	GL	SQ	QM	F	Prob.>F
Modelo	3	94,7699	31,5900	496,36	<0,0001
Erro	290	18,4566	0,0636		
Total	293	113,2265			

Variável	Parâmetros Estimados	Erro Padrão	Valor de t	Prob.> t	FIV
Intercepto	1,61988	0,0518	31,26	<0,0001	0,0000
D	0,03417	0,0011	31,86	<0,0001	1,3906
D2	-0,30039	0,1064	-2,82	0,0051	8,5965
d*D2	0,01131	0,0033	3,46	0,0006	7,5805

Em que: FV= fonte de variação; GL= graus de liberdade; SQ= soma de quadrados; QM= quadrado médio; F= valor de F; Prob.>F= probabilidade de significância para o valor de F; d= diâmetro à altura do peito; D2= variável Dummy para árvores dominadas; FIV= fator de inflação de variância.

O modelo máximo com variáveis Dummy apresentou ajuste de ( $R^2_{aj.}=83,53\%$ ) e erro padrão da estimativa em porcentagem de ( $S_{yx}\%=15,47\%$ ). Nenhuma variável independente evidenciou valor de FIV (Fator de inflação de variâncias) maior que 10, apontando ausência de colinearidade nos seus estimadores.

A equação do diâmetro de copa em função do diâmetro à altura do peito para as três posições sociais está representado na Figura 7 e passa a ser expresso por:

$$\sqrt{\hat{dc}_i} = 1,61988 + 0,03417 (d)_i - 0,30039D2_i + 0,01131((d)D2)_i \quad (21)$$

Em que:  $\sqrt{\hat{dc}_i}$  = diâmetro da copa da i-ésima árvore;  $d_i$  =diâmetro à altura do peito da i-ésima árvore; D2= variável Dummy para árvores dominadas.

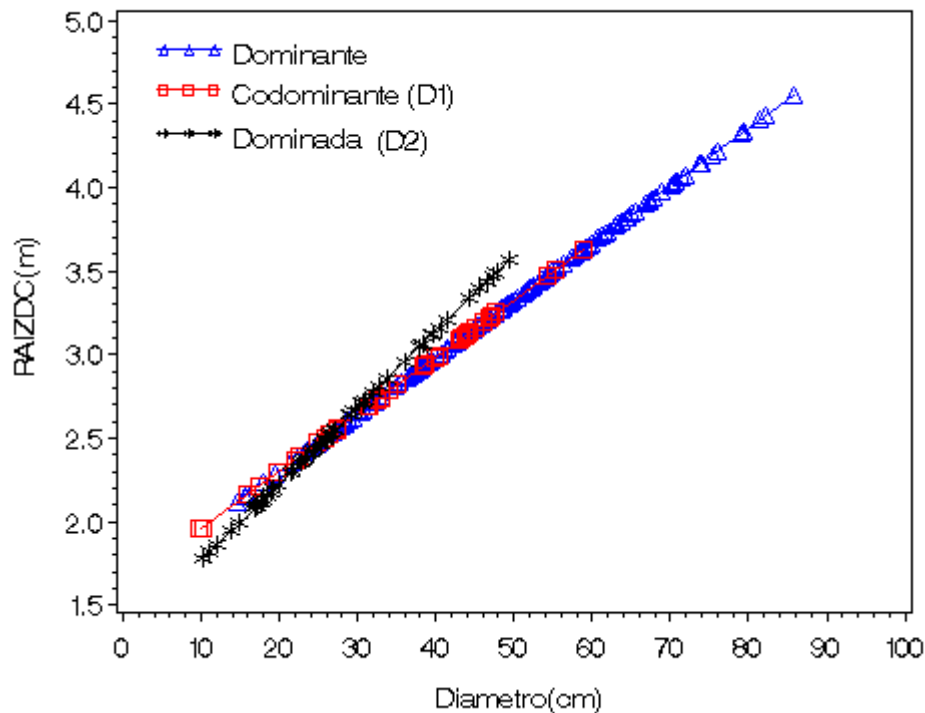


Figura 7 – Desenvolvimento das linhas do diâmetro de copa para árvores de *Araucaria angustifolia* na posição sociológica dominante, codominante e dominada (D2) estimada pelo modelo linear simples com transformação na variável dependente em raiz quadrada com variáveis Dummy.

Na Figura 7, observou-se que as árvores dominadas, com diâmetro à altura do peito de até 25 cm, possuem menor diâmetro de copa, possivelmente, devido à pouca luminosidade recebida pela copa dentro da floresta que, por consequência, inibe o seu crescimento em largura. O efeito da competição sofrido pelas árvores dominadas também determinou diretamente as dimensões da copa. Caso seja alta e comprometa a vitalidade da copa, poderá dificultar a sua recuperação, em alguns casos tornando mesmo irreversível, após a liberação da concorrência de seus competidores.

Neste sentido, Nogueira (1989), estudando a reação do incremento radial de árvores de araucária, verificou ser possível promover maior crescimento radial com abertura das copas, desde que as árvores consideradas possuam copas com características de alta vitalidade e de forma cônica ou hemisférica.

## 4.1.2.2 Métodos para calcular área de projeção da copa

Os valores médios, máximos, mínimos e o seu coeficiente de variação para os três métodos analisados na determinação da área de projeção de copa de araucária estratificados por posição social (Tabela 11) demonstraram diferenças de valores, segundo a posição sociológica das árvores.

Tabela 11 –Área de projeção da copa de *Araucaria angustifolia*, estratificados por posição sociológica, em Lages, SC.

Métodos	Posição Social	Média	Máximo	Mínimo	CV%	Ear (%)
ACC8	PS1 (N=193)	105,40	392,06	10,36	63,83	7,60
ACC4		103,68	306,35	9,59	64,34	7,65
ACC2		123,80	487,74	11,52	64,82	7,71
ACC8	PS2 (N=40)	56,27	141,24	7,19	60,87	16,21
ACC4		60,25	159,26	4,91	68,48	18,23
ACC2		70,81	257,02	8,19	73,82	19,65
ACC8	PS3 (N=61)	46,00	132,02	0,93	74,52	15,94
ACC4		47,08	145,80	3,73	74,89	16,01
ACC2		60,56	236,15	5,27	79,79	17,06

Em que: CV%= coeficiente de variação; Ear=erro de amostragem relativo.

Os resultados da área de copa calculados como circular (ACC) com 8 (oito), 4 (quatro) e 2 (dois) raios opostos mostraram médias de (105,40; 103,68 e 123,80) m<sup>2</sup> com coeficiente de variação de (63,83%; 64,34% e 64,82%) m<sup>2</sup>, respectivamente, em árvores dominantes (Tabela 11).

As estimativas do coeficiente de variação entre os métodos foram homogêneas para as árvores de posição social dominante, variando mais na posição social codominante, seguida da posição social dominada. Esse resultado refletiu a maior homogeneidade da forma da copa das árvores dominantes seguido das dominadas, devido à pouca dinâmica das copas nesta posição sociológica. Da mesma maneira, a quantidade de variação encontrada na posição social codominante foi consequência dos diferentes graus de competição e luminosidade a que essas copas estão submetidas.



O erro de amostragem relativo calculado para a variável área de copa entre as posições sociais e por método, mostrou a possibilidade de obter um erro menor que 8% em árvores dominantes, independentemente do método a ser usado, e que este erro tende a diminuir com o aumento do número de raios de copa medido nas árvores. Mas, para o grupo das árvores codominantes e dominadas, o erro de amostragem relativo variou de 15,0% a 20,0% aproximadamente, constatando a variabilidade encontrada da dimensão da copa e, por conseguinte, na sua área, sendo necessário amostrar mais indivíduos na floresta para obter-se um menor erro de amostragem.

A análise das áreas médias, dentro de cada posição sociológica, apontou ainda que existiu grande variação de valores, com tendência de aumento da superfície quando deu-se a redução do número de raios empregados no cálculo.

De forma contrária, a árvore com placa 72 (PL72) de posição sociológica dominante teve a superfície de projeção da copa subestimada em 21,86% quando calculada com base em quatro raios medidos nas posições norte (N), sul (S), leste (L) e oeste (O). Nesta mesma árvore, a superfície de área de copa, calculada com dois raios opostos, superestimou em 24,40%, ou seja, 85,71m<sup>2</sup>, a área em relação à superfície obtida com 8 (oito) raios, comprovando o efeito da forma de copa na estimativa da superfície.

A mesma tendência foi verificada ao se analisar as regressões das superfícies de copa calculadas com 8 (oito), 4 (quatro) e 2 (dois) raios para árvores dominantes, codominantes e dominadas. Nas Figuras 8a e 8c, observou-se a sobreposição das estimativas para os métodos de 8 (oito) e 4 (quatro) raios, com superestimativa de valores quando a área foi calculada com dois raios.

Na Figura 8b, que corresponde às árvores da classe codominante, os métodos com 4 (quatro) e 8 (oito) raios diferenciaram-se com tendência de superestimativa das áreas calculadas com 4 (quatro) raios à medida em que aumentou o diâmetro ou a área basal da árvore nesta classe sociológica, também as áreas calculadas com 2 (dois) raios apresentaram-se superestimadas, tomando-se como referência o método de 8 (oito) raios.

As regressões calculadas para as superfícies de copa em função da área basal obtidas com 8 (oito), 4 (quatro) e 2 (dois) raios (Figura 8), por sua vez, apresentaram coeficientes de determinação entre 54% e 79%.

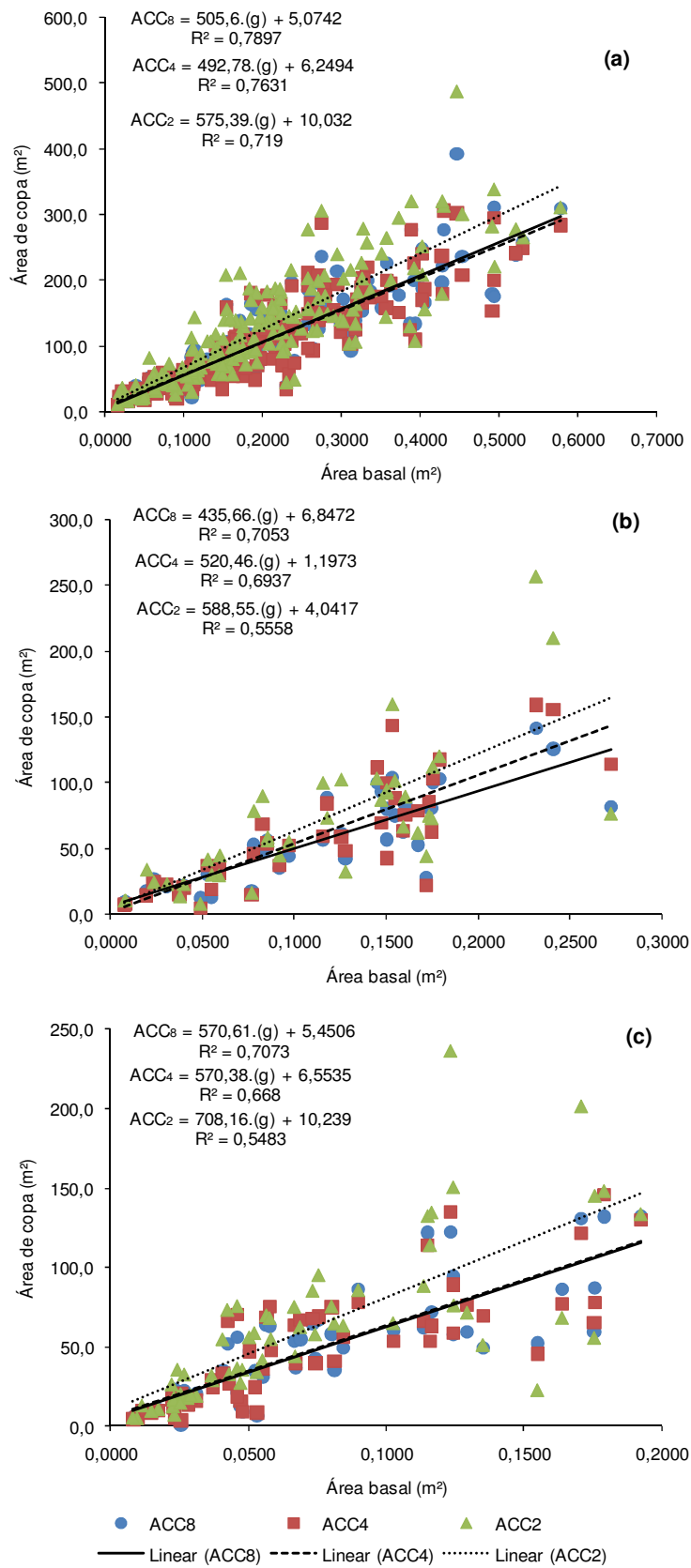


Figura 8 – Área de copa determinada pelos três métodos para as posições sociais: dominante (a);codominante (b) e dominada (c).

O teste das condicionantes para normalidade e homocedasticidade da variável dependente da área de copa detectou heterocedasticidade pelo teste de Bartlett ( $X^2=128,5$ ; Prob.<0,0001). A transformação Box e Cox (1964), na variável dependente área de copa, pela potência 0,267 (Área de copa<sup>0,267</sup>), permitiu obter variâncias homogêneas pelo teste de Bartlett ( $X^2=2,5$ ; Prob.<0,9623).

A condição de normalidade dos dados também foi atendida após a elevação da variável dependente pela potência 0,267, sendo não significativa pelo teste de Cramer Von Mises (W-Sq=0,12553; Prob.>D=0,0509), indicando que os dados transformados da área de copa apresentaram distribuição normal (Figura 9).

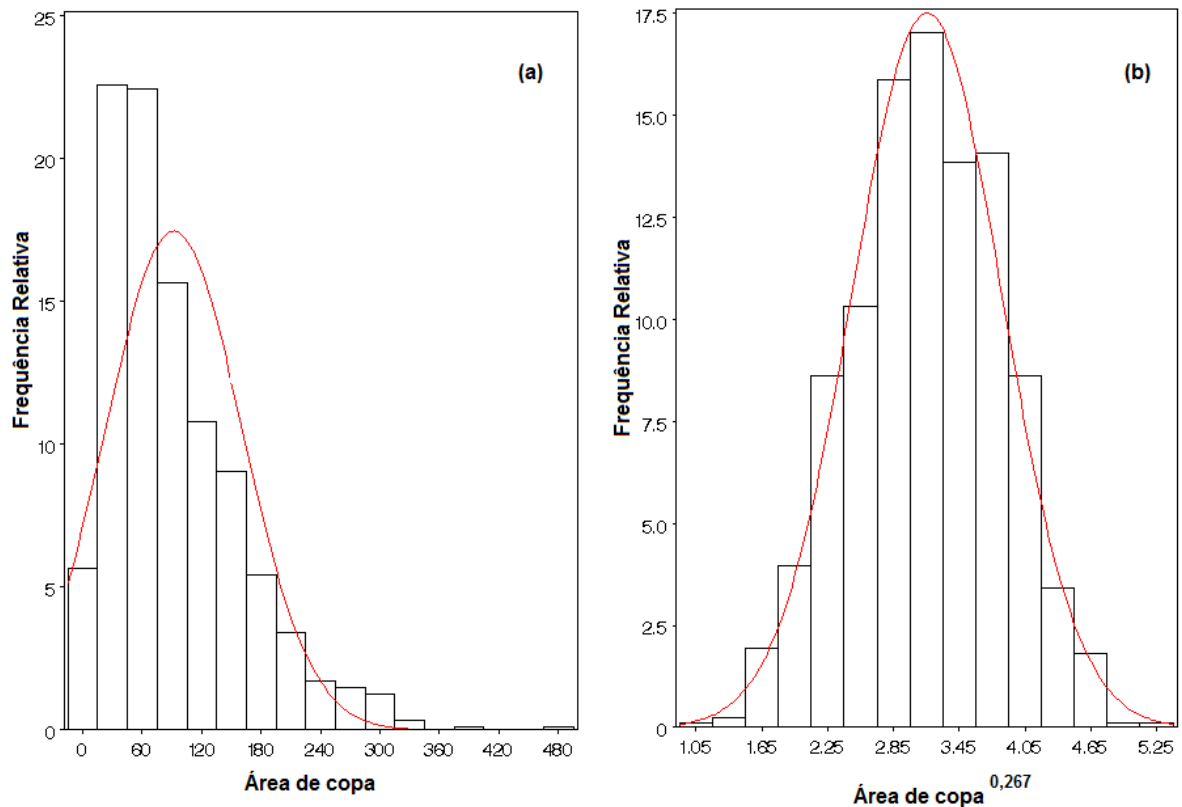


Figura 9 – Teste de normalidade para a variável dependente: sem transformação na variável dependente Área de copa não seguindo uma distribuição normal (a); com transformação na variável dependente Área de copa<sup>0,267</sup> seguindo uma distribuição normal (b).

Esses resultados possibilitaram a análise da variância e o teste de significância para os tratamentos, conforme pode-se identificar na Tabela 12.

Tabela 12 –Análise de variância dos métodos de determinação da área de projeção de copa de árvores de *Araucaria angustifolia*.

FV	GL	SQ	QM	F	Prob.>F
Tratamentos	8	81,7636	10,2205	26,99	<0,0001
Erro	873	330,5328	0,3786		
Total	881	412,2964			

Em que: FV=fonte de variação; GL= graus de liberdade; SQ= soma de quadrados; QM= quadrado médio; F= valor de F; Prob.>F = probabilidade de significância para o valor de F.

A análise de variância expôs que os tratamentos diferem entre si, o que foi comprovado pela significância da combinação dos métodos de cálculo da área de copa com a posição social (Prob.<0,0001).

A análise de contraste das médias dos tratamentos (Tabela 13) demonstrou o efeito dos métodos de cálculo da área de projeção copa para uma mesma posição social e o efeito da posição social sobre o mesmo método de área de copa.

Tabela 13 –Valores calculados do teste t para as médias da superfície de projeção de copa ACC8, ACC4 e ACC2 em cada posição sociológica de *Araucaria angustifolia*.

i/j	Tratamentos								
	T1	T2	T3	T4	T5	T6	T7	T8	T9
T1		4,79*	7,82*	0,24 <sup>ns</sup>	4,60*	7,74*	-2,32*	3,38*	5,64*
T2	<0,0001		1,61 <sup>ns</sup>	-4,64*	-0,15 <sup>ns</sup>	1,50 <sup>ns</sup>	-6,14*	-1,10 <sup>ns</sup>	-0,01 <sup>ns</sup>
T3	<0,0001	0,1069		-7,73*	-1,77 <sup>ns</sup>	-0,13 <sup>ns</sup>	-9,50*	-2,82*	-1,83 <sup>ns</sup>
T4	0,8086	0,0001	<0,0001		4,45*	7,57*	-2,56*	3,23*	5,47*
T5	<0,0001	0,8838	0,0763	<0,0001		1,66 <sup>ns</sup>	-5,95*	-0,95 <sup>ns</sup>	0,15 <sup>ns</sup>
T6	<0,0001	0,1340	0,8980	<0,0001	0,0972		-9,34*	-2,70*	-1,70 <sup>ns</sup>
T7	0,0207	<0,0001	<0,0001	0,0107	<0,0001	<0,0001		4,73*	7,25*
T8	0,0008	0,2738	0,0049	0,0013	0,3429	0,0070	<0,0001		1,19 <sup>ns</sup>
T9	0,0001	0,9888	0,0677	<0,0001	0,8835	0,0893	<0,0001	0,2345	

Em que: ns: não significante; \*=significante em Pr < 0,05; Comparações múltiplas ajustadas por Tukey-Kramer; A diagonal superior mostra os valores de t e a inferior as probabilidades. T1=ACC8\*PS1; T2=ACC8\*PS2; T3=ACC8\*PS3; T4=ACC4\*PS1; T5=ACC4\*PS2; T6=ACC4\*PS3; T7=ACC2\*PS1; T8=ACC2\*PS2; T9=ACC2\*PS3.

O método de área de copa com oito raios fixos ACC8 foi o de maior precisão, com maior representatividade da verdadeira dimensão da copa. A comparação dos métodos ACC8 e ACC4 para árvores dominantes apontou que não havia diferença

significante entre os dois métodos (T4-T1 (Prob.<0,8086)). O mesmo resultado foi encontrado para as árvores codominantes e dominadas (Tabela 13). Esse resultado da comparação do valor médio diferiu do encontrado na análise da Figura 8b, em que a linha de regressão do método com 4 (quatro) raios superestimou áreas de projeção de copa.

Quando o método ACC8 foi comparado com ACC2, esta diferença foi significativa (T7-T1 (Prob.<0,0207)), com os valores de área de copa tendendo a ser superestimados conforme representados na Figura 8a.

A análise do efeito da posição social para o método ACC8 revelou diferenças significativas (T2-T1 (Prob.<0,0001)); (T3-T1 (Prob.<0,0001)). O mesmo resultado foi encontrado para os outros métodos ACC4 (T5-T4 (Prob.<0,0003)); (T6-T4 (Prob.<0,0001)) e ACC2 (T7-T8 (Prob.<0,0001); (T7-T9 (Prob.<0,0001)) evidenciando que o mesmo método diferiu em tamanho de área de copa quando analisados entre as posições sociais, porque, em cada posição social, existiu um diâmetro de copa máximo encontrado na floresta.

O método de área de copa com 4 (quatro) raios fixos - ACC4 - comparado com o método ACC2 para árvores dominantes indicou diferenças significantes (T7-T4 (Prob.<0,0107). Ao contrário, em árvores codominantes e dominadas, quanto aos valores analisados das áreas médias, eles não foram relevantes (T8-T5 (Prob.<0,3429)) e (T9-T6 (Prob.<0,0893)). Esse resultado refletiu a dimensão da média da distribuição, não evidenciando a tendência de superestimativa das áreas em relação às calculadas com 8 (oito) raios.

Embora a comparação dos valores médios tenha indicado a possibilidade de se calcular a área de projeção de copa de árvores codominantes e dominadas com dois raios (T8-T5(Prob.<0,3429)) e (T9-T6 (Prob.<0,0893)), esse procedimento conduziu à superestimativa nas árvores de maior diâmetro no caso destas classes sociológicas.

A análise dos resultados de comparação de médias e das regressões ajustadas para os métodos e posições sociológicas (Tabela 13 e Figura 8) mostrou que árvores de araucária, nas posições sociológicas dominante e dominada de copa regular, podem ter área de projeção da copa calculadas com 4 (quatro) raios sem perder acurácia em relação ao valor obtido com 8 (oito) raios. Já árvores codominadas deveriam ter a área calculada com 8 (oito) raios de copa. Esses

resultados, entretanto, indicam que o fator de maior influência é a regularidade da dimensão da copa nos quadrantes.

Na análise de métodos de área copa para espécie de *Pinus elliotti* Engelm., Nutto et al. (2001) concluíram que o método de oito raios de copa com ângulos variáveis foi mais preciso que o método de quatro raios de copa com ângulos fixos. A provável causa desta divergência seria a origem das árvores que eram provenientes de diferentes sítios e localidades geográficas, além de serem originárias de povoamentos com idades distintas e diferentes intensidades de desbaste.

#### 4.1.3 Relações morfométricas

Deve-se esclarecer que devido à inexistência de estudos das relações morfométricas para a araucária em diferentes posições sociais até o presente momento, a maioria dos resultados foram comparados com árvores de espécies folhosas nativas do Brasil, que apresentam características morfológicas distintas quando comparados com coníferas. Desta forma, a comparação serve apenas como um referencial.

##### 4.1.3.1 Proporção de copa

Os valores médios, máximos, mínimos e o seu coeficiente de variação para a proporção de copa estratificada por posição social e para todo o conjunto de dados encontram-se na Tabela 14.

Tabela 14 –TabelaValores médios, máximos e mínimos da proporção de copa em araucária.

Variável Morfométrica	PS	n	Média	Máximo	Mínimo	CV%
Proporção de copa	PS1	193	31,21	75,00	10,32	48,19
	PS2	40	28,34	66,96	8,07	56,27
	PS3	61	27,61	60,71	5,08	47,61
	T	294	30,07	75,00	5,08	49,32

Em que: n= número de indivíduos; PS=posição sociológica, 1= dominante, 2= codominante 3=dominada; T= todos os dados desconsiderando a posição sociológica.

Os resultados evidenciaram árvores dominantes com maior proporção de copa que as dos estratos inferiores, alcançando em média 31,21%. Desconsiderando a posição social, o comprimento de copa varia de 5,08% a 75,00% da altura. A proporção de copa em árvores codominantes foi a que apresentou maior oscilação em relação à média, com coeficiente de variação de 56,27%.

A amplitude de variação da proporção de copa esteve associada às dimensões da árvore e aos diferentes graus de concorrência a que estavam submetidas na floresta. A variável proporção de copa é um indicador de vitalidade, pois quanto maior a proporção de copa, tanto mais produtiva pode ser a árvore.

Orellana e Koehler (2008) verificaram, em árvores dominantes de *Ocotea odorifera* (Vell.) Rohwer, valor máximo de proporção de copa de 69,23%, médio de 58,00% e o mínimo foi de 38,46%. Roman et al. (2009), estudando características morfométricas para *Cordia trichotoma* (Vell.) Arrab. ex Steud., constataram proporção de copa mínima de 26,20%, médio de 54,50% e máximo de 76,70%.

A modelagem da relação da proporção de copa em função do diâmetro, por posição sociológica e para o conjunto de dados em araucária, encontra-se na Tabela 15.

Tabela 15 –Equações e estatísticas para a proporção de copa em função do diâmetro a altura do peito.

Variável Morfométrica	PS	n	Equações	Estatísticas		
				R <sup>2</sup> <sub>aj.</sub>	Syx%	Sig. F
Proporção de copa	PS1	193	$\hat{P}c_i = 13,87652 + 728,20589 \left( \frac{1}{d_i} \right)$	0,2356	42,14	<0,0001
	PS2	40	$\hat{P}c_i = 14,36296 + 421,67468 \left( \frac{1}{d_i} \right)$	0,2269	49,50	0,0011
	PS3	61	$\hat{P}c_i = 15,59204 + 302,12127 \left( \frac{1}{d_i} \right)$	0,1512	42,54	0,0013
	T	294	$\hat{P}c_i = 20,34452 + 343,03101 \left( \frac{1}{d_i} \right)$	0,1182	46,03	<0,0001

Em que: PS=posição sociológica, 1= dominante, 2= codominante 3=dominada; T= todos os dados desconsiderando as posições sociológicas; n= número de indivíduos; R<sup>2</sup><sub>aj.</sub>= coeficiente de determinação ajustado; Syx%= erro padrão em porcentagem;  $\hat{P}c_i$  =proporção de copa da i-ésima árvore; d<sub>i</sub> =diâmetro à altura do peito da i-ésima árvore.

A proporção de copa apresentou uma correlação negativa com diâmetro à altura do peito. À medida que as árvores engrossam a proporção de copa diminui, demonstrando que a mortalidade dos ramos na base da copa foi maior que a velocidade do crescimento apical.

Os baixos valores de coeficiente de determinação ajustados e os elevados erros padrões da estimativa em porcentagem para os modelos encontrados na Tabela 15 destacam a grande variabilidade dos dados observados, os quais não puderam ser totalmente descritos pelo diâmetro das árvores, ainda que os modelos tenham sido todos significativos.

A função ajustada para as árvores codominantes e dominadas reduziu em 21,10% e 15,10% a proporção de copa entre os diâmetros à altura do peito de 10 a 20 cm, respectivamente, conforme Figura 10b e 10c, indicando que o efeito acentuado da competição sobre indivíduos de pequenos diâmetros refletiu-se diretamente na diminuição do comprimento de copa e, como decorrência, na menor área de assimilação fotossintética.



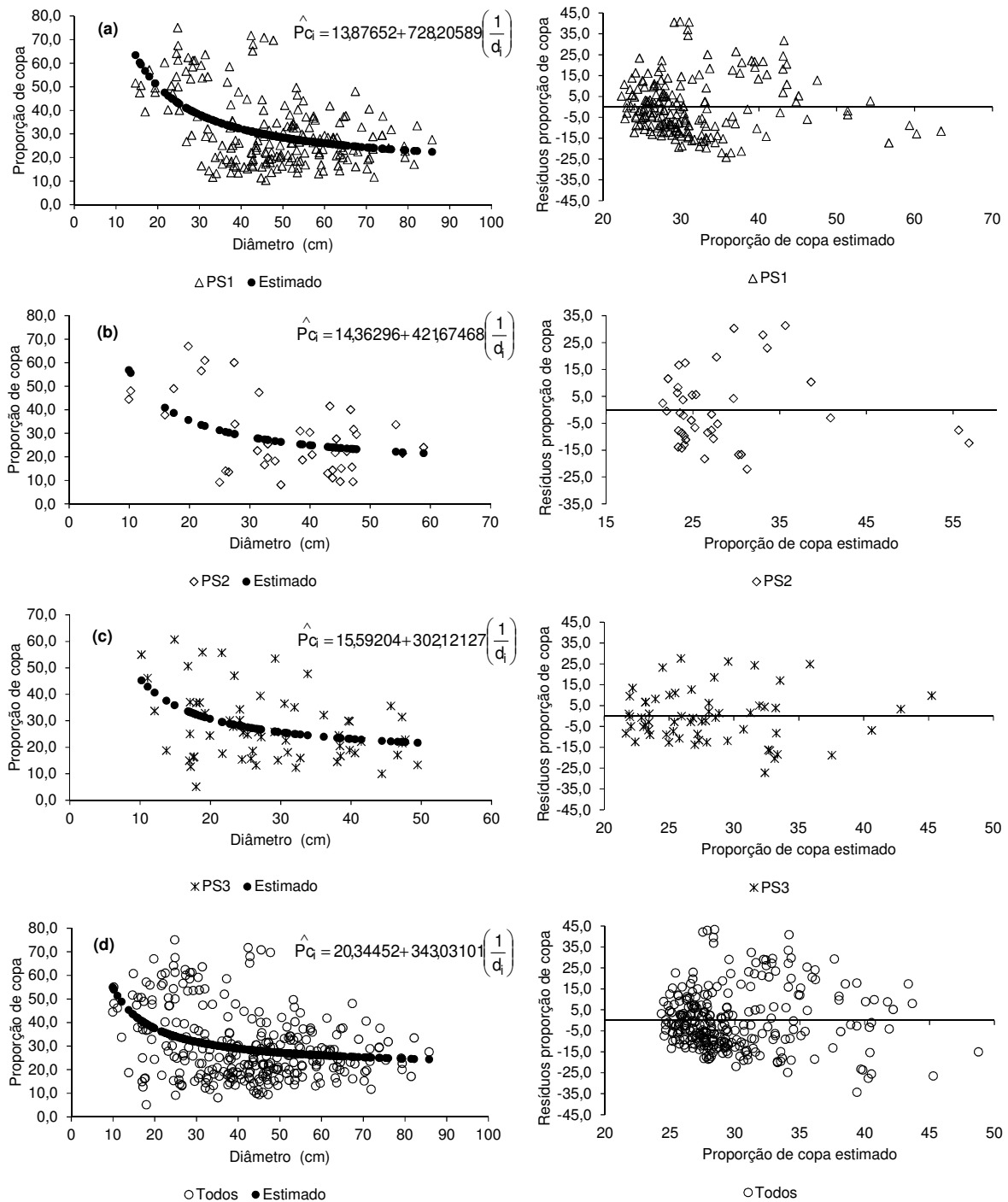


Figura 10 – Proporção de copa em função do diâmetro a altura do peito para árvores de *Araucaria angustifolia*, dominantes (a), codominantes (b), dominadas (c) e desconsiderando posição social (d).

Para a análise de covariância, usou-se o modelo hiperbólico comum entre as posições sociais e a adição de variáveis Dummy indicadoras das posições sociais. Na Tabela 16, evidenciou-se não existir diferenças entre os níveis das linhas de regressão das posições sociológica codominante D1 (Prob.<0,9203) e dominada D2

(Prob.<0,7296) em relação às árvores dominantes. No entanto, quando avaliada a inclinação das linhas de regressão, ela apontou valor de probabilidade significativa entre árvores codominantes, segundo a interação (1/d)\*D1 (Prob.=0,0354), e dominadas (1/d)\*D2 (Prob.=0,0017), comprovando que as regressões tinham inclinações diferentes e, assim, a dimensão da proporção de copa varia com o diâmetro e com a posição sociológica das árvores.

Tabela 16 –Análise de covariância da proporção de copa em função do diâmetro a altura do peito.

FV	GL	SQ	QM	F	Prob.>F
Modelo	5	15103,87	3020,77	17,80	<0,0001
Erro	287	48719,26	169,75		
Total	292	63823,14			
(1/d)	1	10403,65	10403,65	61,29	<0,0001
D1	1	1,70	1,70	0,01	0,9203
D2	1	20,32	20,32	0,12	0,7296
(1/d)*D1	1	758,85	758,85	4,47	0,0354
(1/d)*D2	1	1697,83	1697,83	10,00	0,0017

Em que: FV=fonte de variação; GL= graus de liberdade; SQ= soma de quadrados; QM= quadrado médio; F= valor de F; Prob.>F= probabilidade de significância para o valor de F; d= diâmetro à altura do peito; D1= variável Dummy para árvores codominantes; D2= variável Dummy para árvores dominadas.

Na Tabela 17, tem-se a análise de variância do modelo máximo da proporção de copa em função do diâmetro à altura do peito com variáveis Dummy para as três posições sociais, recalculado apenas com as variáveis independentes significantes e o seu respectivo resumo estatístico.

Tabela 17 –Análise de variância e resumo estatístico dos parâmetros estimados da proporção de copa em função do diâmetro a altura do peito com variável Dummy para *Araucaria angustifolia*.

FV	GL	SQ	QM	F	Prob.>F
Modelo	3	15083,50	5027,83	29,81	<0,0001
Erro	289	48739,63	168,65		
Total	292	63823,14			

Variável	Parâmetros Estimados	Erro Padrão	Valor de t	Prob.> t	FIV
Intercepto	14,2963	1,8761	7,62	<0,0001	0
1/d	713,2518	75,9946	9,39	<0,0001	2,2513
1/d*D1	-290,0441	69,2445	-4,19	<0,0001	1,46881
1/d*D2	-384,2918	59,2466	-6,49	<0,0001	2,04279

Em que: FV= fonte de variação; GL= graus de liberdade; SQ= soma de quadrados; QM= quadrado médio; F= valor de F; Prob.>F= probabilidade de significância para o valor de F; d= diâmetro à altura do peito; D1= variável Dummy para árvores codominantes; D2= variável Dummy para árvores dominadas; FIV= fator de inflação de variância.

O modelo máximo com variáveis Dummy apresentou ajuste de ( $R^2_{aj.}=22,84\%$ ) e erro padrão da estimativa em porcentagem de ( $S_{yx}\%=43,06\%$ ), além do que nenhuma variável independente apresentou valor de FIV (Fator de inflação de variâncias) maior que 10, indicando ausência de multicolinearidade.

A equação da proporção de copa em função do diâmetro à altura do peito para as três posições sociais está representado na Figura 11 e passa a ser expresso por:

$$\hat{Pc}_i = 14,2963 + 713,2518 \left( \frac{1}{d} \right)_i - 290,0441 \left( \left( \frac{1}{d} \right) D1 \right)_i - 384,2918 \left( \left( \frac{1}{d} \right) D2 \right)_i \quad (22)$$

Em que:  $\hat{Pc}_i$  =proporção de copa da i-ésima árvore;  $d_i$  =diâmetro à altura do peito da i-ésima árvore; D1= variável Dummy para árvores codominantes; D2= variável Dummy para árvores dominadas.

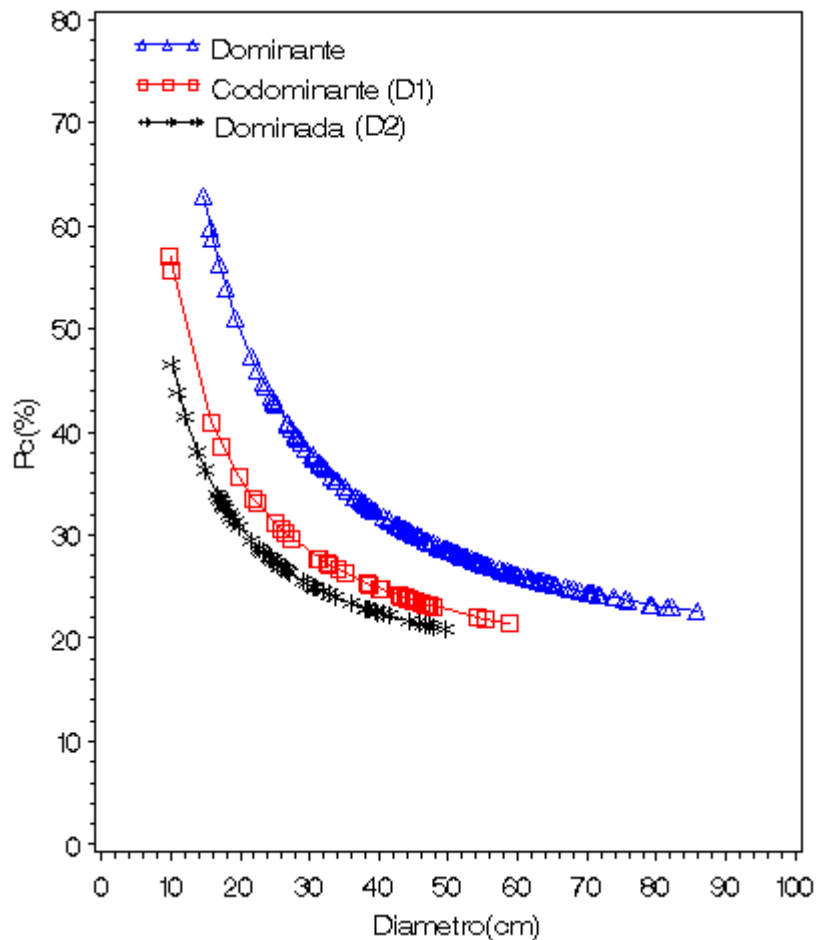


Figura 11 – Desenvolvimento das linhas de regressão da proporção de copa para árvores de *Araucaria angustifolia* na posição sociológica dominante, codominante (D1) e dominada (D2) estimada pelo modelo parabólico com variáveis Dummy.

As árvores dominantes e codominantes apresentaram maior proporção de copa para um mesmo diâmetro à altura do peito em relação aos indivíduos dominados. A tendência parabólica decrescente modificou-se entre as posições sociais à medida que as árvores engrossam. Os indivíduos codominantes são os árvores que têm maior amplitude de variação da proporção de copa (Tabela 14 e Tabela 15), resultado da maior dinâmica da copa neste estrato social influenciado pela competição por espaço e luz em que as árvores estão submetidas na floresta.

#### 4.1.3.2 Formal de copa

Os valores médios, máximos, mínimos e o seu coeficiente de variação para formal de copa estratificado por posição social e para todo o conjunto de dados encontram-se na Tabela 18.

Tabela 18 –Valores médios, máximos e mínimos de formal de copa em araucária.

Variável Morfométrica	PS	n	Média	Máximo	Mínimo	CV%
Formal de copa	PS1	193	2,36	5,82	0,63	48,49
	PS2	36	2,03	4,60	0,68	50,58
	PS3	61	2,10	5,64	0,60	53,65
	T	294	2,31	5,97	0,60	51,76

Em que: n= número de indivíduos; PS=posição sociológica, 1= dominante, 2= codominante 3=dominada; T= todos os dados desconsiderando as posições sociológicas.

O valor de formal de copa médio foi de 2,31, com máximo de 5,97 e mínimo de 0,60, demonstrando a grande variação desta variável, independentemente do estrato social, conforme os valores do coeficiente de variação que oscilou entre 48,49% á 51,76% (Tabela 18). Saliente-se, neste caso, que valores altos de formal de copa indicam árvores com copas mais curtas e largas, enquanto valores baixos representam árvores com copas mais longa e estreita, obtendo maior manto de copa.

Em estudos de relações morfométricas realizados com *Cabralea canjerana* (Vell.) Mart. em mata secundária nativa do Rio Grande do Sul, Durlo (2001) encontrou valores médios de formal de copa de 0,74, valor mínimo de 0,29 e máximo de 3,33, demonstrando, mesmo para uma espécie folhosa, uma amplitude de variação muito grande para esta variável.

A modificação nas formas da copa da araucária deu-se conforme a idade e o grau de concorrência. Em árvores novas, o crescimento em altura é proporcionalmente maior que o crescimento lateral dos galhos, dando assim características de copa mais cônica (baixo formal de copa). Quando o incremento em altura diminuiu, a copa tomou uma forma elipsoidal (NOGUEIRA, 1989). Com o

avanço da idade, ao atingir a maturidade, a copa assumiu forma quase plana ou de umbela (alto formal de copa). Desta fase em diante, a gema apical tende a ficar em um nível mais baixo que a dos galhos da extremidade, que continuam crescendo para os lados e para cima, sendo um indicativo de senilidade da espécie (REITZ; KLEIN, 1966).

A modelagem da relação do formal de copa em função do diâmetro por posição sociológica e para o conjunto de dados em araucária é apresentada na Tabela 19.

Tabela 19 – Modelos estatísticos e parâmetros estatísticos para formal de copa em função do diâmetro a altura do peito.

Variável Morfométrica	PS	n	Equações	Estatísticas		
				R <sup>2</sup> <sub>aj.</sub>	Syx%	Sig. F
Formal de copa	PS1	193	$\hat{F}c_i = 0,04888(d_i)$	0,8736	39,49	<0,0001
	PS2	36	$\hat{F}c_i = 0,05440(d_i)$	0,8747	37,17	0,0001
	PS3	60	$\hat{F}c_i = 0,07465(d_i)$	0,8888	37,82	<0,0001
	T	294	$\hat{F}c_i = 0,05174(d_i)$	0,8591	41,93	<0,0001

Em que: PS=posição sociológica, 1= dominante, 2= codominante 3=dominada; T= todos os dados desconsiderando as posições sociológicas; n= número de indivíduos; R<sup>2</sup><sub>aj.</sub>= coeficiente de determinação ajustado; Syx%= erro padrão em porcentagem;  $\hat{F}c_i$  =proporção de copa da i-ésima árvore;  $d_i$  =diâmetro à altura do peito da i-ésima árvore.

O formal de copa apresentou uma correlação positiva com diâmetro à altura do peito independente do estrato social da árvore com tendência linear crescente (Figura 12). Todavia, os elevados ajustes encontrados por posição social e para todo conjunto de dados foi consequência da eliminação do intercepto  $\hat{\beta}_0$  da equação de regressão, que não alcançou o limite estabelecido de significância (Prob.>0,05).

Durlo (2001) encontrou, para a variável formal de copa em canjerana, baixos coeficientes de determinação, significância do valor de F em nível menor que 5% em árvores dominantes. O mesmo modelo  $\ln(\hat{F}c)_i = \beta_0 + \beta_1 \ln(d_i) + \varepsilon_i$  ao ser aplicado no caso de árvores codominantes e dominadas não apresentou significância do valor F,

com erro elevado, mostrando que não houve associação entre o diâmetro à altura do peito e o formal de copa.

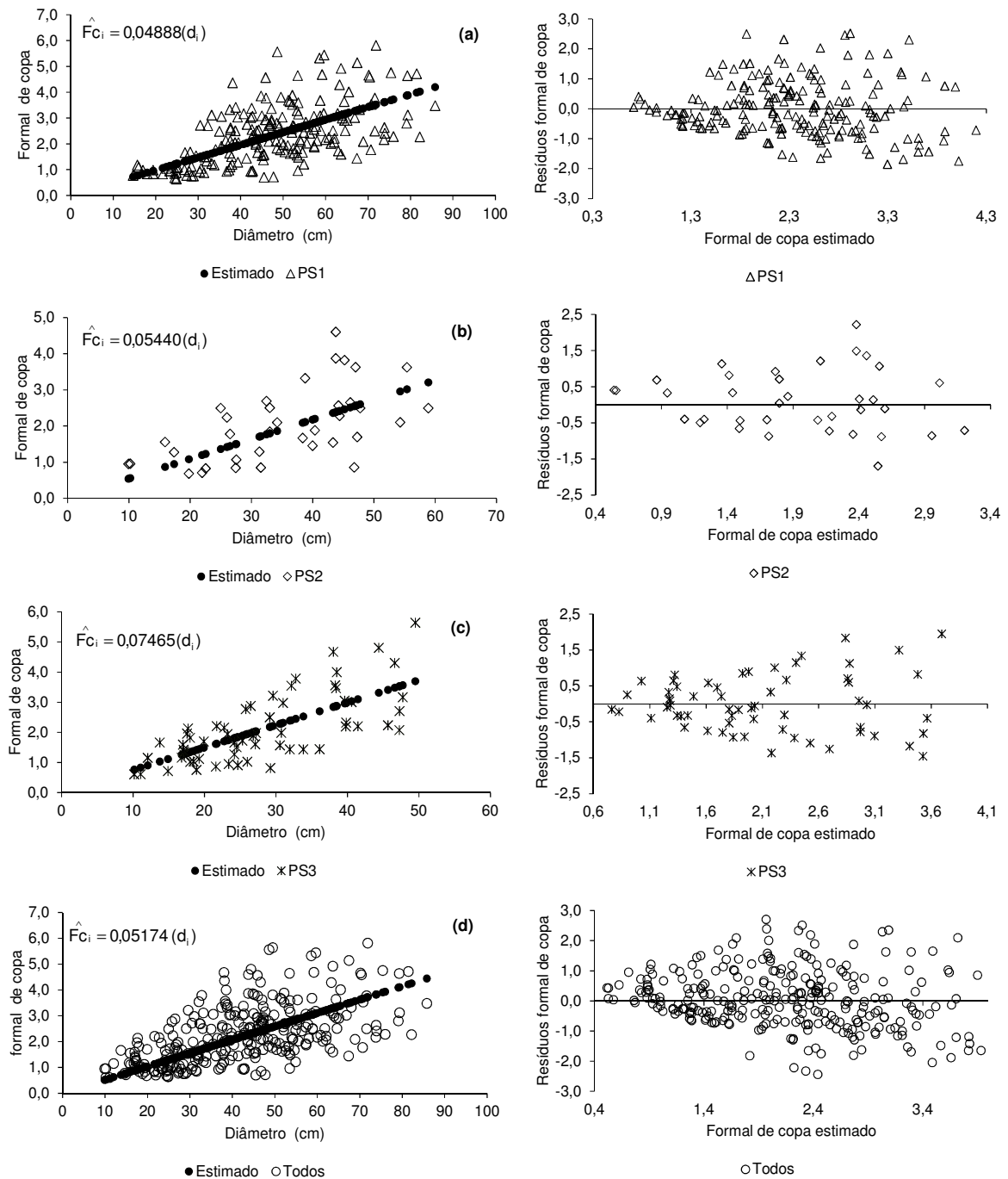


Figura 12 – Formal de copa em função do diâmetro a altura do peito para árvores de *Araucaria angustifolia*, dominantes (a), codominantes (b), dominadas (c) e desconsiderando posição social (d).

Para a análise de covariância, usou-se o modelo linear simples sem intercepto comum entre as posições sociais e a adição de variáveis Dummy

indicadoras das posições sociais, consentindo verificar se existem diferenças em inclinação das linhas de regressão. Na Tabela 20, aponta-se o valor de probabilidade significativa para a variável  $d \cdot D2$  (Prob.=0,0001), demonstrando que apenas o grupo das árvores dominadas apresentaram regressões distintas quanto à inclinação das curvas e, assim, a relação formal de copa não se difere com o aumento do diâmetro para árvores dominantes e codominantes. Este resultado demonstrou que a razão do diâmetro de copa com o comprimento de copa entre as posições sociais dominante e codominante tende a ser a mesma, contudo, as dimensões da copa das árvores são diferentes.

Tabela 20 –Análise de covariância do formal de copa em função do diâmetro a altura do peito.

FV	GL	SQ	QM	F	Prob.>F
Modelo	3	1610,39	536,80	681,47	<0,0001
Erro	285	224,50	0,7877		
Total	288	1834,89			
d	1	428,98	428,98	544,59	<0,0001
$d \cdot D1$	1	1,35	1,35	1,71	0,1923
$d \cdot D2$	1	32,74	32,74	41,57	<0,0001

Em que: FV=fonte de variação; GL= graus de liberdade; SQ= soma de quadrados; QM= quadrado médio; F= valor de F; Prob.>F= probabilidade de significância para o valor de F; d= diâmetro à altura do peito; D1= variável Dummy para árvores codominantes; D2= variável Dummy para árvores dominadas.

Na Tabela 21, expressa-se a análise de variância do modelo máximo do formal de copa em função do diâmetro à altura do peito com variáveis Dummy para as três posições sociais, recalculado apenas com as variáveis independentes significantes e o seu respectivo resumo estatístico.



Tabela 21 –Análise de variância e resumo estatístico dos parâmetros estimados do formal de copa em função do diâmetro a altura do peito com variável Dummy para *Araucaria angustifolia*.

FV	GL	SQ	QM	F	Prob.>F
Modelo	2	1609,04	804,52	1018,82	<0,0001
Erro	286	225,84	0,7897		
Total	288	1834,89			

Variável	Parâmetros Estimados	Erro Padrão	Valor de t	Prob.> t	FIV
d	0,04938	0,001216	40,63	<0,0001	1,10267
d*D2	0,02527	0,003984	6,34	<0,0001	1,10267

Em que: FV= fonte de variação; GL= graus de liberdade; SQ= soma de quadrados; QM= quadrado médio; F= valor de F; Prob.>F= probabilidade de significância para o valor de F; d= diâmetro à altura do peito; D2= variável Dummy para árvores dominadas; FIV= fator de inflação de variância.

O modelo máximo com variáveis Dummy apresentou ajuste de ( $R^2_{aj.}=87,61\%$ ) e erro padrão da estimativa em porcentagem de ( $S_{yx}\%=39,33\%$ ), sendo que nenhuma variável independente apresentou valor de FIV (Fator de inflação de variâncias) maior que 10, indicando ausência de multicolinearidade.

A equação do formal de copa em função do diâmetro à altura do peito para as três posições sociais está representado na Figura 13 e passa a ser expresso por:

$$\hat{F}c_i = 0,04938 (d)_i + 0,02527((d)D2)_i \quad (23)$$

Em que:  $\hat{F}c_i$  =formal de copa da i-ésima árvore;  $d_i$  =diâmetro à altura do peito da i-ésima árvore; D2= variável Dummy para árvores dominadas.

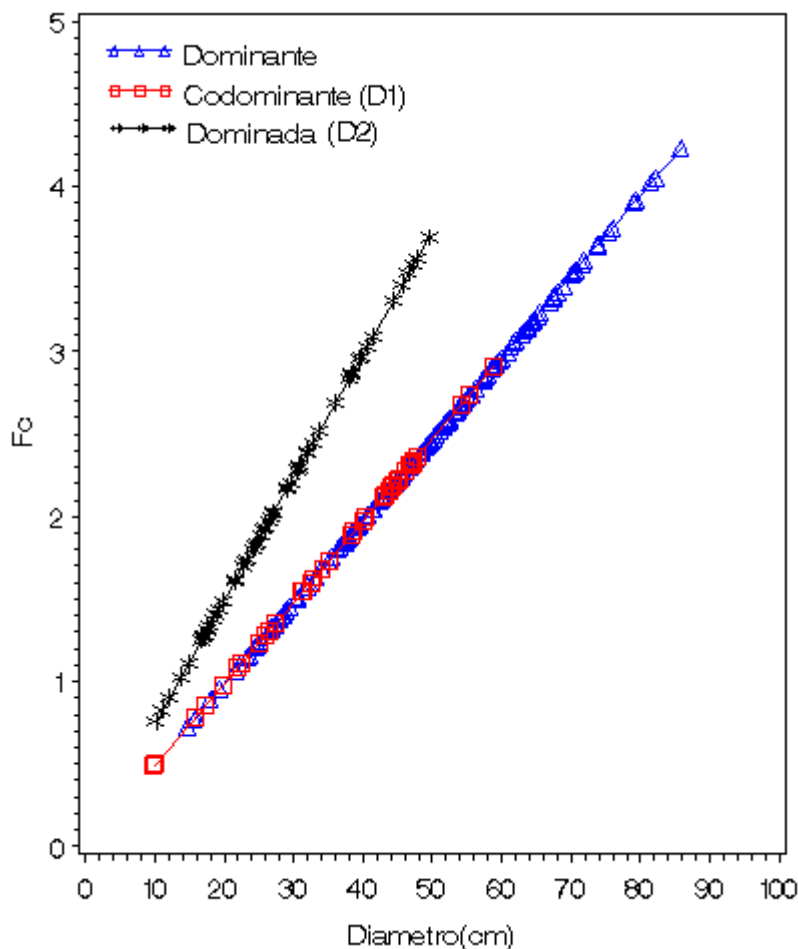


Figura 13 – Desenvolvimento das linhas de regressão do formal de copa para árvores de *Araucaria angustifolia* na posição sociológica dominante, codominante (D1) e dominada (D2) estimada pelo modelo linear simples com variáveis Dummy.

As linhas representadas na Figura 13 confirmam que, para um mesmo diâmetro à altura do peito, as árvores dominadas exibiram maior formal de copa, efeito da competição lateral dos seus concorrentes e da menor intensidade lúmica recebida pela copa que, como decorrência, inibiu o seu crescimento e fez com que os indivíduos deste estrato social investissem em maior expansão lateral da copa por luz (diâmetro de copa) do que o comprimento de copa. Em árvores dominantes e codominantes, a variável formal de copa apresentou a mesma tendência média, mas cabe salientar que, embora esta razão seja a mesma, as dimensões da copa destes indivíduos são diferentes.

#### 4.1.3.3 Grau de esbeltez - h/d

Os valores médios, máximos, mínimos e o seu coeficiente de variação para grau de esbeltez (h/d) estratificado por posição social e para todo o conjunto de dados são visualizados na Tabela 22.

Tabela 22 –Valores médios, máximos e mínimos do grau de esbeltez em araucária.

Variável Morfométrica	PS	n	Média	Máximo	Mínimo	CV%
Grau de esbeltez	PS1	193	40,40	97,06	22,43	24,64
	PS2	40	48,11	77,31	29,03	26,84
	PS3	61	56,36	102,35	28,33	29,80
	T	294	44,72	102,35	22,43	30,51

Em que: n= número de indivíduos; PS=posição sociológica, 1= dominante, 2= codominante 3=dominada; T= todos os dados desconsiderando as posições sociológicas.

Árvores dominadas propiciaram grau de esbeltez superior aos das árvores que ocupam os estratos superiores, em média. Quando desconsiderada a posição social, os valores variaram de 22,43 a 102,35.

Em árvores de *Ocotea odorifera* (Vell.) Rohwer, o grau de esbeltez mesmo em árvores dominantes, teve grande amplitude de variação, com o mínimo de 34,0 e o máximo de 93,0 (ORELLANA e KOEHLER, 2008).

O grau de esbeltez é uma variável que caracteriza a estabilidade das árvores, de modo que, quando a relação é alta, ela indica que o crescimento em diâmetro é menor em relação à altura, sendo a árvore menos estável. Esta relação pode ser utilizada para indicar a instabilidade da árvore contra ventos ou mesmo servir como referência para desbastes.

Mattos (2007), em um estudo de produtividade e incremento em Floresta Nativa do Rio Grande do Sul, obteve, para o grau de esbeltez, valores de coeficiente de variação semelhantes ao do presente estudo, para as espécies de *Cabralea canjerana* (Vell.) Mart., *Cedrela fissilis* Vell. e *Cordia trichotoma* (Vell.) Arrab. ex Steud., de 29,95%, 29,33% e 26,29%, respectivamente.

A modelagem da relação do grau de esbeltez ( $h/d$ ) em função do diâmetro por posição sociológica e para o conjunto de dados em araucária pode ser visualizada na Tabela 23.

Tabela 23 –Equações e estatísticas para grau de esbeltez em função do diâmetro a altura do peito.

Variável Morfométrica	PS	n	Equações	Estatísticas		
				$R^2_{aj.}$	Syx%	Sig. F
Grau de Esbeltez	PS1	192	$\hat{G}e_i = 121,79811 - 21,42118 \ln(d_i)$	0,6901	12,62	<0,0001
	PS2	40	$\hat{G}e_i = 131,85479 - 23,85186 \ln(d_i)$	0,6023	16,93	<0,0001
	PS3	61	$\hat{G}e_i = 171,88516 - 35,29716 \ln(d_i)$	0,6809	16,83	<0,0001
	T	294	$\hat{G}e_i = 142,41105 - 26,70387 \ln(d_i)$	0,7215	16,10	<0,0001

Em que: PS=posição sociológica, 1= dominante, 2= codominante 3=dominada; T= todos os dados desconsiderando as posições sociológicas; n= número de indivíduos;  $R^2_{aj.}$ = coeficiente de determinação ajustado; Syx%= erro padrão em porcentagem;  $\hat{G}e_i$  =proporção de copa da i-ésima árvore;  $d_i$  =diâmetro à altura do peito da i-ésima árvore.

O grau de esbeltez explicitou correlação negativa com diâmetro à altura do peito, com tendência logarítmica decrescente (Figura 14). As equações ajustadas para o grau de esbeltez independentemente da posição social demonstraram ser possível estimar, com precisão, a partir do diâmetro à altura do peito como variável independente, devido ao bom ajuste das equações e à baixa amplitude de variação dos resíduos.

O erro padrão da estimativa em porcentagem para as equações varia entre 12,62% e 16,93% em árvores dominantes e codominantes, respectivamente. Os coeficientes de determinação ajustado oscilaram entre 0,6901 e 0,6023 para essas posições sociais.

O mesmo modelo logarítmico foi utilizado com alta precisão ( $R^2_{aj.}=0,88$ ; Syx%=15,8) para estimar o grau de esbeltez de *Bertholletia excelsa* Bonpl. (castanheira-do-brasil) em florestas nativas no sul do Estado de Roraima por Tonini et al. (2008).

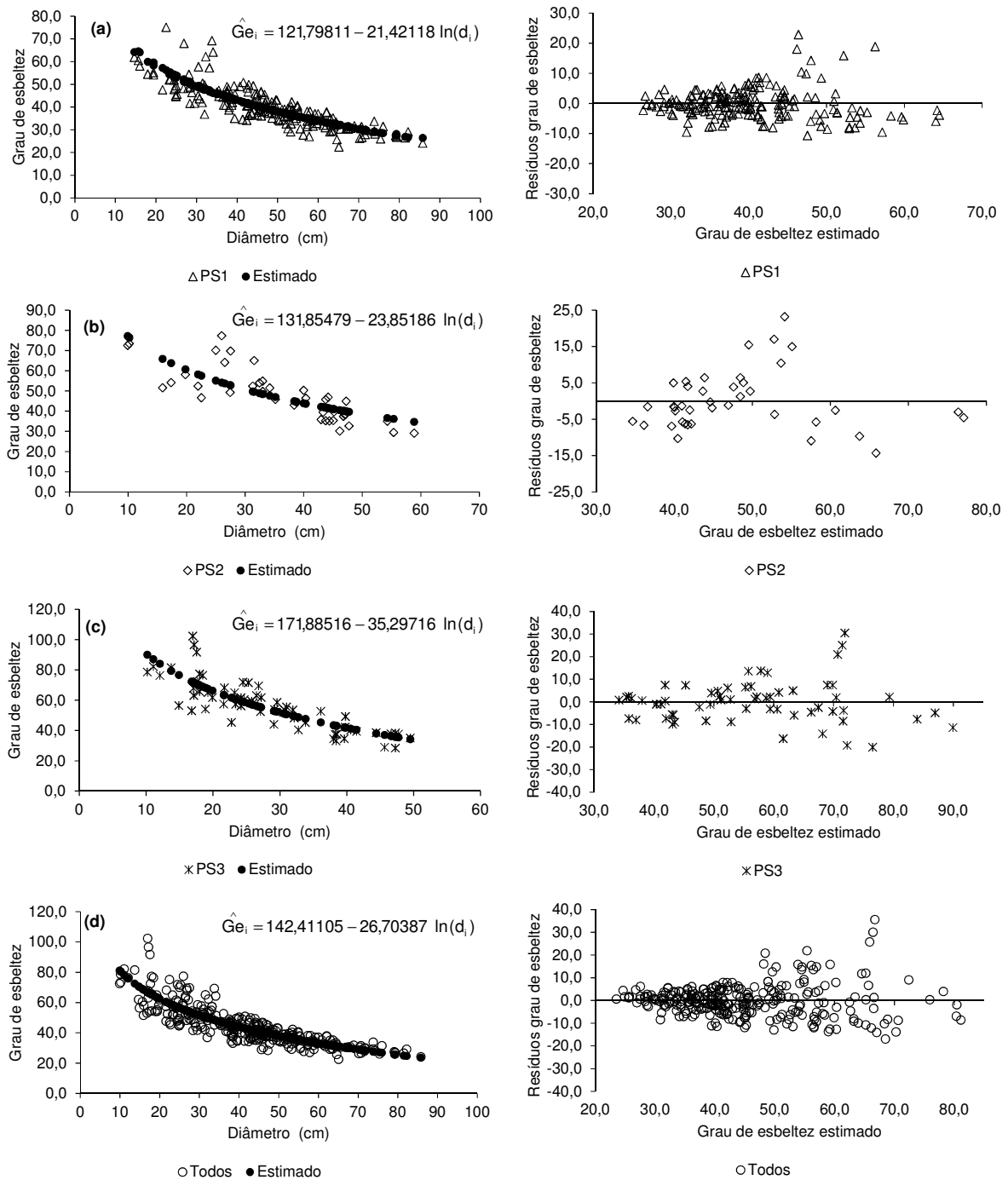


Figura 14 – Grau de esbeltez em função do diâmetro a altura do peito para árvores de *Araucaria angustifolia*, dominantes (a), codominantes (b), dominadas (c) e desconsiderando posição social (d).

Para a análise de covariância, adotou-se o modelo logarítmico comum entre as posições sociais e a adição de variáveis Dummy indicadoras das posições sociais. Na Tabela 24, revelou-se existir diferenças entre os níveis e inclinações das linhas de regressão da posição sociológica dominada D2 (Prob.<0,0001) e  $\ln(d)^*D2$

(Prob.<0,0001) em relação às árvores dominantes. No entanto, árvores codominantes não tiveram diferenças significativas em nível e inclinação das linhas de regressão D1 (Prob.=0,6761) e  $\ln(d)*D1$  (Prob.=0,7331), evidenciando que as regressões tinham interceptos e inclinações semelhantes e, assim, a dimensão do grau de esbeltez ou relação h/d variou com o diâmetro apenas para árvores dominadas.

Tabela 24 –Análise de covariância do grau de esbeltez em função do diâmetro a altura do peito.

FV	GL	SQ	QM	F	Prob.>F
Modelo	5	40522,45	8104,49	167,98	<0,0001
Erro	287	13847,08	48,25		
Total	292	54369,52			
$\ln(d)$	1	12916,84	12916,84	267,72	<0,0001
D1	1	8,44	8,44	0,17	0,6761
D2	1	1115,78	1115,78	23,13	<0,0001
$\ln(d)*D1$	1	5,62	5,62	0,12	0,7331
$\ln(d)*D2$	1	1039,10	1039,10	21,54	<0,0001

Em que: FV=fonte de variação; GL= graus de liberdade; SQ= soma de quadrados; QM= quadrado médio; F= valor de F; Prob.>F= probabilidade de significância para o valor de F; d= diâmetro à altura do peito; D1= variável Dummy para árvores codominantes; D2= variável Dummy para árvores dominadas.

Na Tabela 25, expressa-se a análise de variância do modelo máximo do grau de esbeltez ou relação h/d em função do diâmetro à altura do peito com variáveis Dummy para as três posições sociais, recalculado apenas com as variáveis independentes significantes e o seu respectivo resumo estatístico.

Tabela 25 –Análise de variância e resumo estatístico dos parâmetros estimados do modelo grau de esbeltez ou relação h/d em função do diâmetro a altura do peito com variável dummy para *Araucaria angustifolia*.

FV	GL	SQ	QM	F	Prob.>F
Modelo	3	40494,00	13498,00	281,16	<0,0001
Erro	289	13874,53	48,01		
Total	292	54368,53			

Variável	Parâmetros Estimados	Erro Padrão	Valor de t	Prob.> t	FIV
Intercepto	129,2796	4,4428	29,10	<0,0001	0
ln(d)	-23,3017	1,1762	-19,81	<0,0001	1,58727
D2	42,6055	8,7527	4,87	<0,0001	76,1391
ln(d)*D2	-11,9955	2,5726	-4,66	<0,0001	71,7184

Em que: FV= fonte de variação; GL= graus de liberdade; SQ= soma de quadrados; QM= quadrado médio; F= valor de F; Prob.>F= probabilidade de significância para o valor de F; d= diâmetro à altura do peito; D1= variável Dummy para árvores codominantes; D2= variável Dummy para árvores dominadas; FIV= fator de inflação de variância.

O modelo máximo com variáveis Dummy demonstrou ajuste de ( $R^2_{aj.}=74,22\%$ ) e erro padrão da estimativa em porcentagem de ( $S_{yx}\%=15,49\%$ ). Porém, a variável independente expressou valor de FIV (Fator de inflação de variâncias) maior que 10, apontando a presença de multicolinearidade. Segundo Montgomery e Peck (1981), quando o valor for menor que 100, considera-se que a colinearidade é fraca e logo não constitui um problema sério para análise.

A equação do grau de esbeltez em função do diâmetro à altura do peito para as três posições sociais pode ser vista na Figura 15 e passa a ser expressa por:

$$\hat{G}e_i = 129,27962 - 23,30165 \ln(d)_i + 42,60554 (D2)_i - 11,99551 (\ln(d)D2)_i \quad (24)$$

Em que:  $\hat{G}e_i$  = grau de esbeltez da i-ésima árvore;  $d_i$  = diâmetro à altura do peito da i-ésima árvore; D2= variável Dummy para árvores dominadas.

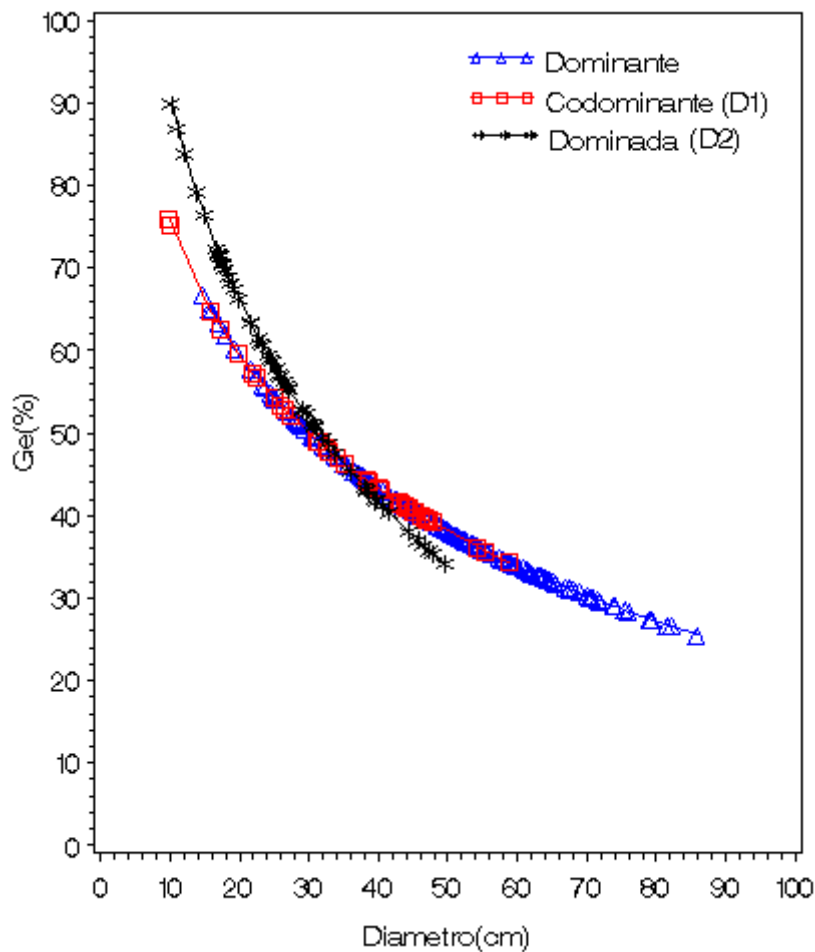


Figura 15 – Desenvolvimento das linhas de regressão do grau de esbeltez ou relação  $h/d$  para árvores de *Araucaria angustifolia* na posição sociológica dominante, codominante (D1) e dominada (D2) estimado pelo modelo logarítmico com variáveis Dummy.

As curvas representadas na Figura 15 evidenciam que, as árvores dominadas apresentam maiores valores de grau de esbeltez com diâmetros à altura do peito abaixo de 30 cm. Isso é decorrência do menor crescimento em diâmetro em relação ao da altura; devido a menor luminosidade disponibilizada pelo dossel e o efeito da competição sobre estes indivíduos, fazendo com que as árvores jovens de araucária neste estrato social invistam menos no crescimento em diâmetro, implicando em árvores menos estáveis. No entanto, quando avaliado diâmetros à altura do peito superior a 30 cm esta relação diminui, uma vez que as árvores dominadas tendem a perder o vigor do crescimento em altura, procurando estabilizá-lo à medida que engrossam lentamente. Em árvores dominantes e codominantes, a variável grau de esbeltez apresentou a mesma tendência média, mas cabe mencionar que, embora



esta razão seja a mesma, as proporções entre a altura total e o diâmetro a altura do peito destes indivíduos são diferentes.

#### 4.1.3.4 Índice de abrangência

Os valores médios, máximos, mínimos e o seu coeficiente de variação para o índice de abrangência estratificado por posição social e para todo o conjunto de dados encontram-se na Tabela 26.

Tabela 26 –Valores médios, máximos e mínimos do índice de abrangência para araucária.

Variável Morfométrica	PS	n	Média	Máximo	Mínimo	CV%
Índice de Abrangência	PS1	190	0,61	1,14	0,35	23,92
	PS2	37	0,52	0,78	0,31	22,37
	PS3	60	0,49	0,91	0,16	33,46
	T	293	0,57	1,14	0,16	28,11

Em que: n= número de indivíduos; PS=posição sociológica, 1= dominante, 2= codominante 3=dominada; T= todos os dados desconsiderando as posições sociológicas.

Os resultados revelaram valores de índice de abrangência médio de 0,61 e máximo de 1,14 para árvores dominantes, superior aos valores dos estratos inferiores encontrados da floresta. As árvores dominadas tiveram o menor valor 0,16. Esta variável adverte para a necessidade de espaço da árvore com aumento da altura, podendo ser usada como indicador de desbaste no povoamento, tomando como controle uma altura objetivo (árvore dominante).

Padoin (2007), determinando diretrizes de desbastes para *Pinus taeda* L., mencionou que o desbaste pode ser definido seguindo como referência a altura dominante, pois árvores mais altas possuem copas mais largas do que as árvores mais jovens de menor altura dominante, necessitando, por isso, maior espaço de crescimento.

A modelagem da relação do índice de abrangência em função do diâmetro por posição sociológica e para o conjunto de dados em araucária apresentam-se na Tabela 27.

Tabela 27 –Equações e estatísticas para o índice de abrangência em função do diâmetro a altura do peito.

Variável Morfométrica	PS	n	Equações	Estatísticas		
				R <sup>2</sup> <sub>aj.</sub>	Syx%	Sig. F
Índice de abrangência	PS1	190	$\hat{I}A_i = 0,44001 + 0,00006598(d_i^2)$	0,4665	17,48	<0,0001
	PS2	37	$\hat{I}A_i = 0,42654 + 0,00000142(d_i^3)$	0,3079	19,56	<0,0002
	PS3	60	$\hat{I}A_i = 0,18505 + 0,01086(d_i)$	0,4731	24,29	<0,0001
	T	293	$\hat{I}A_i = 0,27987 + 0,00678(d_i)$	0,4732	20,40	<0,0001

Em que: PS=posição sociológica, 1= dominante, 2= codominante 3=dominada; T= todos os dados desconsiderando as posições sociológicas; n= número de indivíduos; R<sup>2</sup><sub>aj.</sub>= coeficiente de determinação ajustado; Syx%= erro padrão em porcentagem;  $\hat{I}A_i$ =proporção de copa da i-ésima árvore; d<sub>i</sub> =diâmetro à altura do peito da i-ésima árvore.

O índice de abrangência demonstrou correlação positiva com diâmetro à altura do peito com tendência linear crescente para árvores dominadas e para todo o conjunto de dados desconsiderando a posição social (Figura 16). A equação para árvores dominantes necessitou da adição de um termo quadrático, enquanto as codominantes, de um termo cúbico para a melhoria das estatísticas (Tabela 27).

Esse comportamento denotou que o crescimento em altura acompanharia o crescimento do diâmetro da copa das árvores dominantes e codominantes, até que, com o avanço da idade, o crescimento em altura reduzir-se-á e a copa continuará crescendo radialmente (Figura 16a, b). Este crescimento varia de acordo com a idade das árvores e o sítio, sendo que, quanto mais rico o sítio, menor o crescimento radial da copa (SEITZ, 1991).

Roman et al. (2009) verificaram resultados semelhantes ao do presente estudo com aumento do diâmetro à altura do peito das árvores de louro-pardo, quando as taxas de crescimento em diâmetro de copa tenderam a superar as taxas de crescimento em altura das árvores. Entretanto, Costa et al. (2009), estudando aspectos silviculturais de castanheira-do-brasil em sistemas agroflorestais na

Amazônia Central para indivíduos jovens com 12 anos de idade, observaram que o índice de abrangência tendeu a diminuir com o aumento da altura, porque o crescimento em altura era maior que o crescimento do diâmetro da copa.

A análise de covariância não foi realizada para a variável índice de abrangência, pois as tendências entre as posições sociológicas eram diferentes, logo, não sendo possível o agrupamento das três posições sociais por meio de uma única equação de regressão.

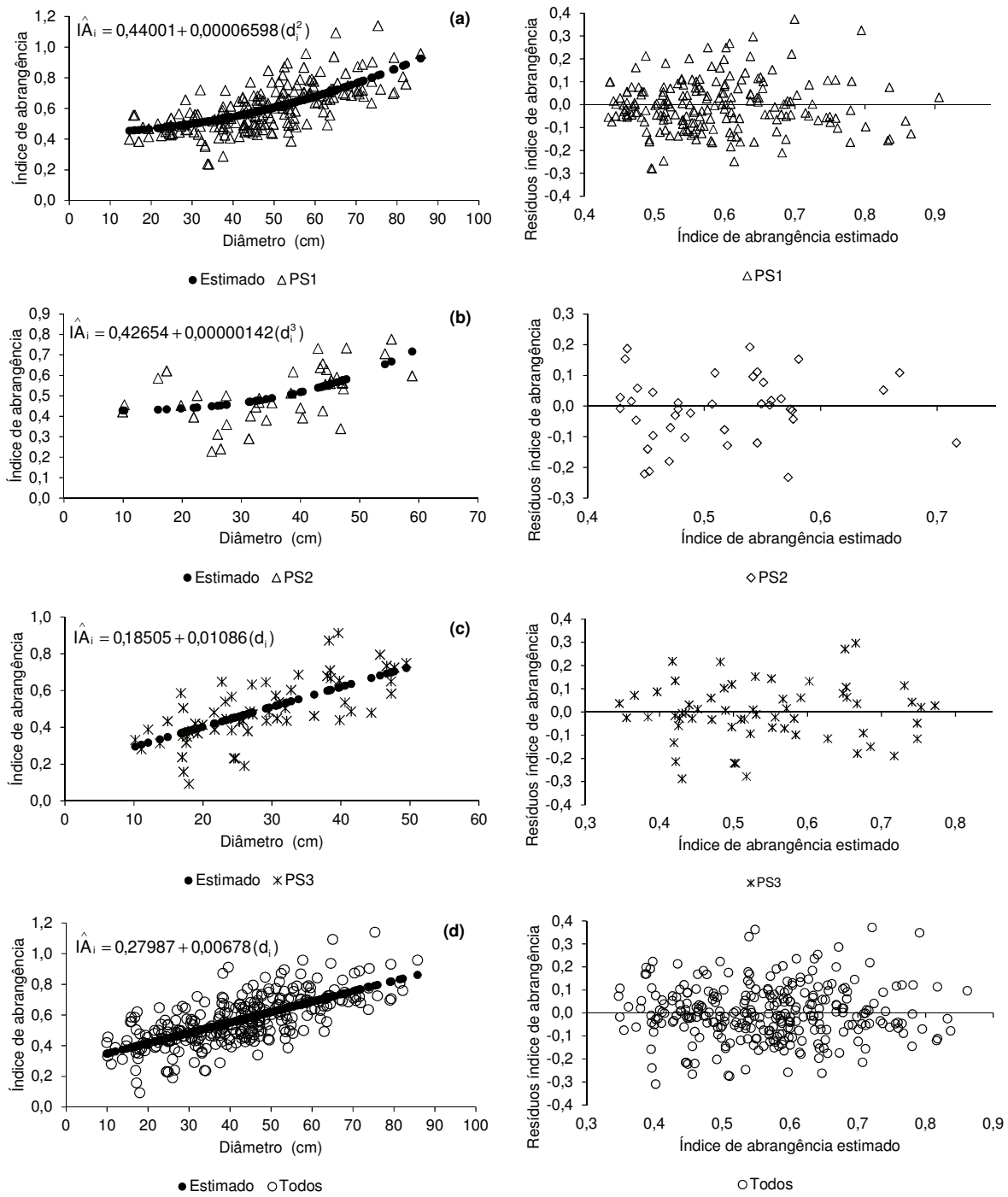


Figura 16 – Índice de abrangência em função do diâmetro a altura do peito para árvores de *Araucaria angustifolia*, dominantes (a), codominantes (b), dominadas (c) e desconsiderando posição social (d).

#### 4.1.3.5 Índice de saliência

Os valores médios, máximos, mínimos e o seu coeficiente de variação para o índice de saliência estratificado por posição social e para todo o conjunto de dados estão expressos na Tabela 28.

Tabela 28 –Valores médios, máximos e mínimos do índice de saliência em araucária.

Variável Morfométrica	PS	N	Média	Máximo	Mínimo	CV%
Índice de Saliência	PS1	193	23,19	37,29	13,08	14,80
	PS2	40	22,99	33,55	12,68	20,04
	PS3	56	26,41	35,11	18,40	15,25
	T	293	23,66	37,29	11,02	17,21

Em que: n= número de indivíduos; PS=posição sociológica, 1= dominante, 2= codominante 3=dominada; T= todos os dados desconsiderando as posições sociológicas.

O índice de saliência médio encontrado para todo o conjunto de dados foi 23,66 com máximo 37,29 e mínimo de 11,02. As árvores dominantes tiveram o menor coeficiente de variação, 14,80%, quando comparado com os demais estratos sociais, marcando maior homogeneidade desta variável em relação à média (Tabela 28).

As árvores dominantes apresentaram os valores de índice de saliência entre 37,29 e 13,08 respectivamente, para o máximo e mínimo. Em árvores codominantes e dominadas, o valor máximo foi 33,55 e 35,11, com mínimo de 12,68 e 18,40. Esses resultados salientaram que as árvores codominantes, provavelmente, devido ao aumento da competição lateral, tiveram uma redução do valor máximo de 37 para 34 vezes o diâmetro à altura do peito. Os valores encontrados para árvores dominadas foram semelhantes aos da classe codominantes, porém, com o aumento do valor mínimo para 18, apontando um aumento da largura mínima de copa nesta classe sociológica.

A modelagem da relação do índice de saliência em função do diâmetro por posição sociológica e para o conjunto de dados em araucária pode ser vista na Tabela 29.

Tabela 29 –Equações e estatísticas para o índice de saliência em função do diâmetro a altura do peito.

Variável Morfométrica	PS	n	Equações	Estatísticas		
				R <sup>2</sup> aj.	Syx%	Sig. F
Índice de saliência	PS1	193	$\hat{IS}_i = 22,53375 + 29054 \left( \frac{1}{d_i^3} \right)$	0,1224	13,87	<0,0001
	PS2	40	$\hat{IS}_i = 18,32019 + 140,79228 \left( \frac{1}{d_i} \right)$	0,3112	16,63	<0,0001
	PS3	56	$\hat{IS}_i = 27,78392 - 0,00004060 (d_i^3)$	0,0960	14,50	<0,0115
	T	293	$\hat{IS}_i = 20,97470 + 93,73224 \left( \frac{1}{d_i} \right)$	0,1163	16,18	<0,0001

Em que: PS=posição sociológica, 1= dominante, 2= codominante 3=dominada; T= todos os dados desconsiderando as posições sociológicas; n= número de indivíduos; R<sup>2</sup>aj.= coeficiente de determinação ajustado; Syx%= erro padrão em porcentagem;  $\hat{IS}_i$  =proporção de copa da i-ésima árvore;  $d_i$  =diâmetro à altura do peito da i-ésima árvore.

O índice de saliência apontou correlação negativa com diâmetro à altura do peito, pois à medida que as árvores engrossam, o valor do índice de saliência diminuiu independentemente do estrato social (Figura 17).

Apesar dos baixos valores de coeficiente de determinação ajustado para as equações da Tabela 29, foi possível considerar o comportamento como uma tendência, visto que os modelos apresentaram o nível de significância menor que 5%, de modo que as regressões foram significantes.

Valores baixos de coeficiente de determinação também foram encontrados para a variável índice de saliência por Durlo (2001), em canjerana, com o modelo  $\ln(\hat{IS})_i = \beta_0 + \beta_1 \ln(d_i) + \varepsilon_i$ , demonstrando a baixa associação entre as duas variáveis com a linha de regressão em posição quase paralela ao eixo da abscissa. Os índices de morfometria calculados para árvores de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze

tiveram grande variabilidade devido à diferença nas dimensões da copa das árvores ocasionadas pela competição.

A análise de covariância não foi realizada para a variável índice de saliência tendo em vista que as tendências entre as posições sociológicas eram diferentes, logo não sendo possível o agrupamento das três posições sociais por meio de uma única equação de regressão.

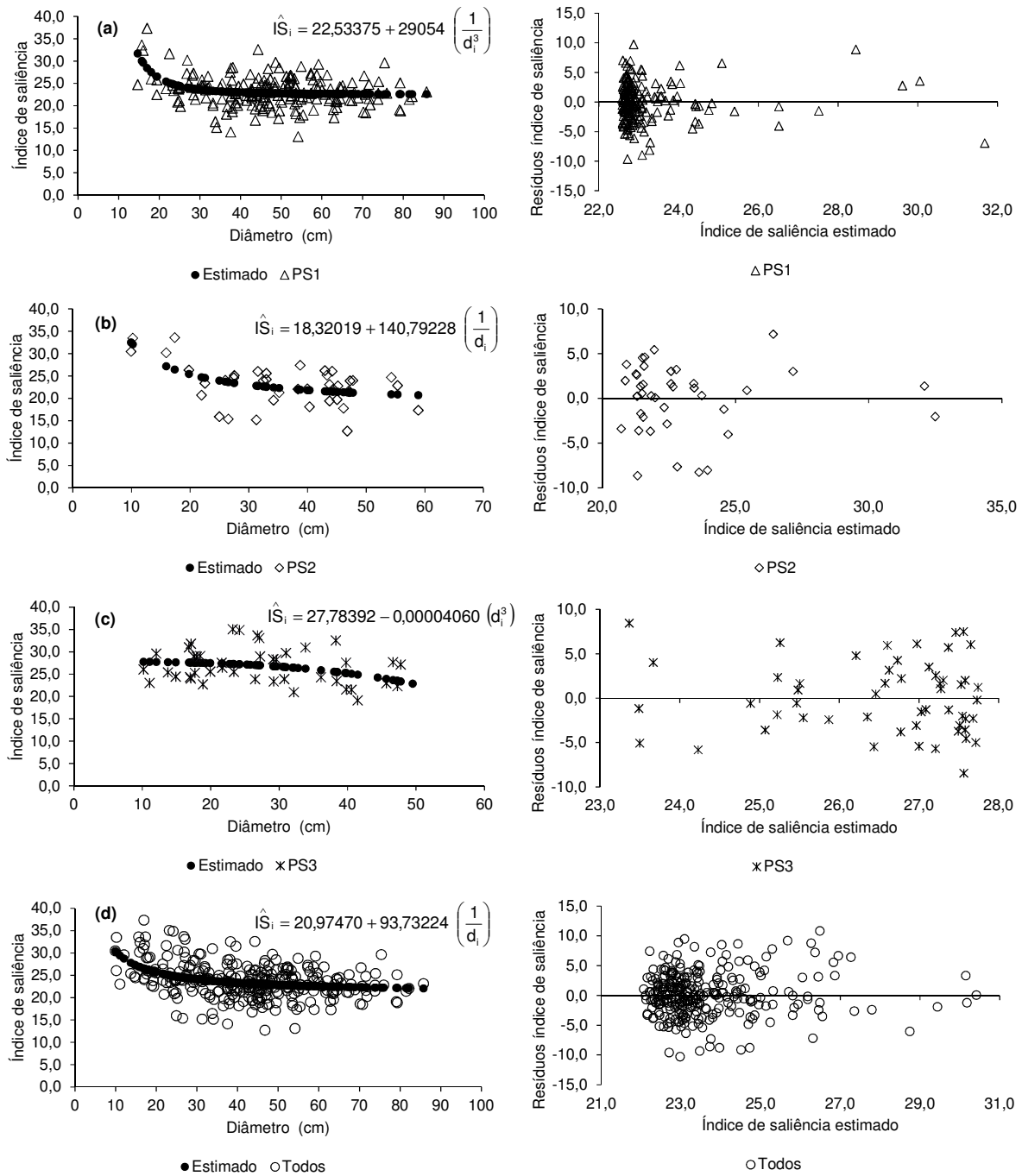


Figura 17 – Índice de saliência em função do diâmetro a altura do peito para árvores de *Araucaria angustifolia*, dominantes (a), codominantes (b), dominadas (c) e desconsiderando posição social (d).



## 4.2 Modelagem do crescimento periódico em área basal

Na construção do modelo de incremento periódico em área basal, verificou-se a necessidade da transformação Box e Cox na variável dependente (IPg%) que originou um valor de lambda com o zero contido no intervalo de confiança. Esse resultado mostrou que a melhor transformação a ser empregada fosse logarítmica, segundo vários autores como Box e Cox (1964), Silva et al. (1994) e Schneider et al. (2009).

A transformação logarítmica do incremento periódico em área basal (LN(IPg%)) permitiu obter homocedasticidade de variância, segundo o teste de Bartlett ( $X^2=10,67$ ; Prob.<0,0990), e a normalidade, pelo teste de Kolmogorov-Smirnov ( $D=0,0864$ ; Prob.> $D=0,05$ ), conforme representado na Figura 18 para os dados com e sem transformação.

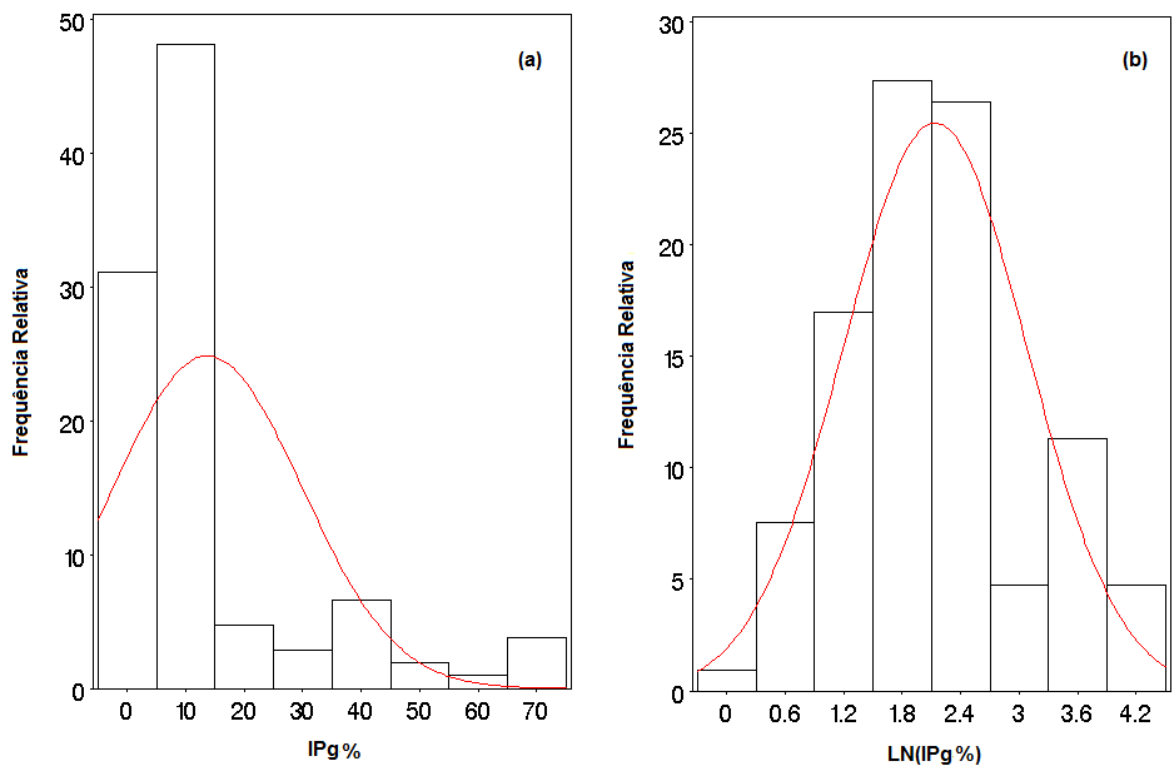


Figura 18 – Frequência relativa do incremento periódico em área basal de *Araucaria angustifolia* sem transformação (IPg%) (a); com transformação LN(IPg%) (b).

A análise de correlação de Pearson, comparando o incremento periódico em área basal com variáveis dendrométricas e morfométricas, viabilizou selecionar 11 variáveis: diâmetro à altura do peito, altura total, altura do fuste, diâmetro de copa, área de copa, comprimento de copa, proporção de copa, formal de copa, grau de esbeltez, índice de abrangência e índice de saliência, que podem ser consultadas no Anexo M, quando interagindo com as variáveis Dummy descritoras das classes diamétricas e posições sociológicas, produziram 110 variáveis que originaram a regressão:

$$\text{LN}(\text{IPg}_{\%}) = f(\text{FC}, \text{D8CC}, \text{D8PC}, \text{GE}) \quad (25)$$

Em que:

LN(IPg<sub>%</sub>) = Incremento periódico em área basal transformado;

FC = Formal de copa;

D8CC = Comprimento de copa das árvores dominantes segundo a variável Dummy (D8);

D8PC = Proporção de copa das árvores dominantes segundo a variável Dummy (D8);

GE = Grau de esbeltez ou relação h/d.

Os passos de regressão calculados no procedimento *Stepwise* foram agrupados na Tabela 30, juntamente com os parâmetros estatísticos do modelo.

Tabela 30 – Coeficientes e parâmetros estatísticos do modelo de incremento periódico em área basal.

Passos	Variável	Coeficiente	$S_{yx}$	F	$R^2(\text{mod})$	F (mod)
1	Intercepto	$\hat{\beta}_0 = 3,50896$	0,13413	684,38	0,5587	131,69
	FC	$\hat{\beta}_1 = -0,58001$	0,05054	131,69		
2	Intercepto	$\hat{\beta}_0 = 2,96742$	0,20099	217,97	0,6053	12,14
	FC	$\hat{\beta}_1 = -0,48620$	0,05506	77,97		
	D8PC	$\hat{\beta}_2 = 0,01249$	0,00358	12,14		
3	Intercepto	$\hat{\beta}_0 = 2,97065$	0,15680	358,91	0,7621	67,23
	FC	$\hat{\beta}_1 = -0,39622$	0,04434	79,86		
	D8CC	$\hat{\beta}_2 = -0,32099$	0,03915	67,23		
	D8PC	$\hat{\beta}_3 = 0,05794$	0,00621	87,10		
4	Intercepto	$\hat{\beta}_0 = 1,28593$	0,35700	12,97	0,8113	26,34
	FC	$\hat{\beta}_1 = -0,20866$	0,05395	14,96		
	GE	$\hat{\beta}_2 = 2,08777$	0,40680	26,34		
	D8CC	$\hat{\beta}_3 = -0,24817$	0,03780	43,10		
	D8PC	$\hat{\beta}_4 = 0,05855$	0,00556	110,98		

Em que:  $S_{yx}$  = erro padrão da estimativa; F = valor da estimativa de F;  $R^2$  = coeficiente de determinação; F (mod) = valor de F do modelo;  $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \hat{\beta}_3, \hat{\beta}_4$  = são coeficientes.

No passo 1, deu-se a entrada da variável formal de copa (FC) por ter maior correlação com a variável dependente, com um F de 131,69; no passo 2, por seu turno, foi adicionada a variável proporção de copa para as árvores dominantes (D8PC) com um valor de F de 12,14, já no passo 3, a variável comprimento de copa para as árvores dominantes (D8CC), com F de 67,23 e, por fim, no passo 4, a variável grau de esbeltez ou relação h/d (GE) com F de 26,34.

Com quatro passos, o procedimento *Stepwise* chegou à resolução do modelo com significância de 5% (Tabela 31).

Tabela 31 –Resumo estatístico da seleção *stepwise*.

Variável	R <sup>2</sup> - Parcial	R <sup>2</sup> - Equação	F	Prob. > F
FC	0,5587	0,5587	131,69	<0,0001
D8PC	0,0465	0,6053	12,14	0,0007
D8CC	0,1568	0,7621	67,23	<0,0001
GE	0,0492	0,8113	26,34	<0,0001

Em que: R<sup>2</sup> Parcial= coeficiente de determinação parcial; R<sup>2</sup>= coeficiente de determinação da equação; F=valor da estimativa de F; FC=formal de copa; D8PC=proporção de copa das árvores dominante, D8CC=comprimento de copa das árvores dominantes e GE= grau de esbeltez ou relação h/d.

A maior parte da variação explicada pelo modelo de regressão foi associada com as características dimensionais da copa (formal de copa (FC), proporção de copa (D8PC) e comprimento de copa (D8CC)) que contribuem com 76,21% (coeficiente de determinação parcial).

A característica atual da morfometria das árvores representa um efeito sofrido no passado que atuou como regulador do tamanho e da forma da copa, bem como das taxas de crescimento. Nas Figuras 19a e 19b, verificou-se o efeito da competição expresso indiretamente com a redução do diâmetro, da proporção de copa e do incremento em área basal para as árvores que ocupavam piores posições sociais (dominadas e codominantes) comparadas com as dominantes.

De acordo com Curtis (1970 apud HASENAUER, 1997), árvores livres (solitárias), sem competição, apresentam o incremento e a dimensão máxima e têm sido usadas na condução de diretrizes de manejo e na modelagem do crescimento e da competição.

Na modelagem do incremento em área basal de árvores individuais de *Cedrela odorata* L., na Floresta Amazônica, Da Cunha (2009) determinou que os fatores de dimensão da árvore (altura total, grau de esbeltez, comprimento e formal de copa) contribuíram em maior grau para explicar a variação do incremento em área basal (82,7%). A maior parte das variáveis que expressava a morfometria da árvore estiveram associadas à copa, indicando ser um referencial para uso na predição do crescimento quando se deseja maior precisão e confiança dos modelos matemáticos.

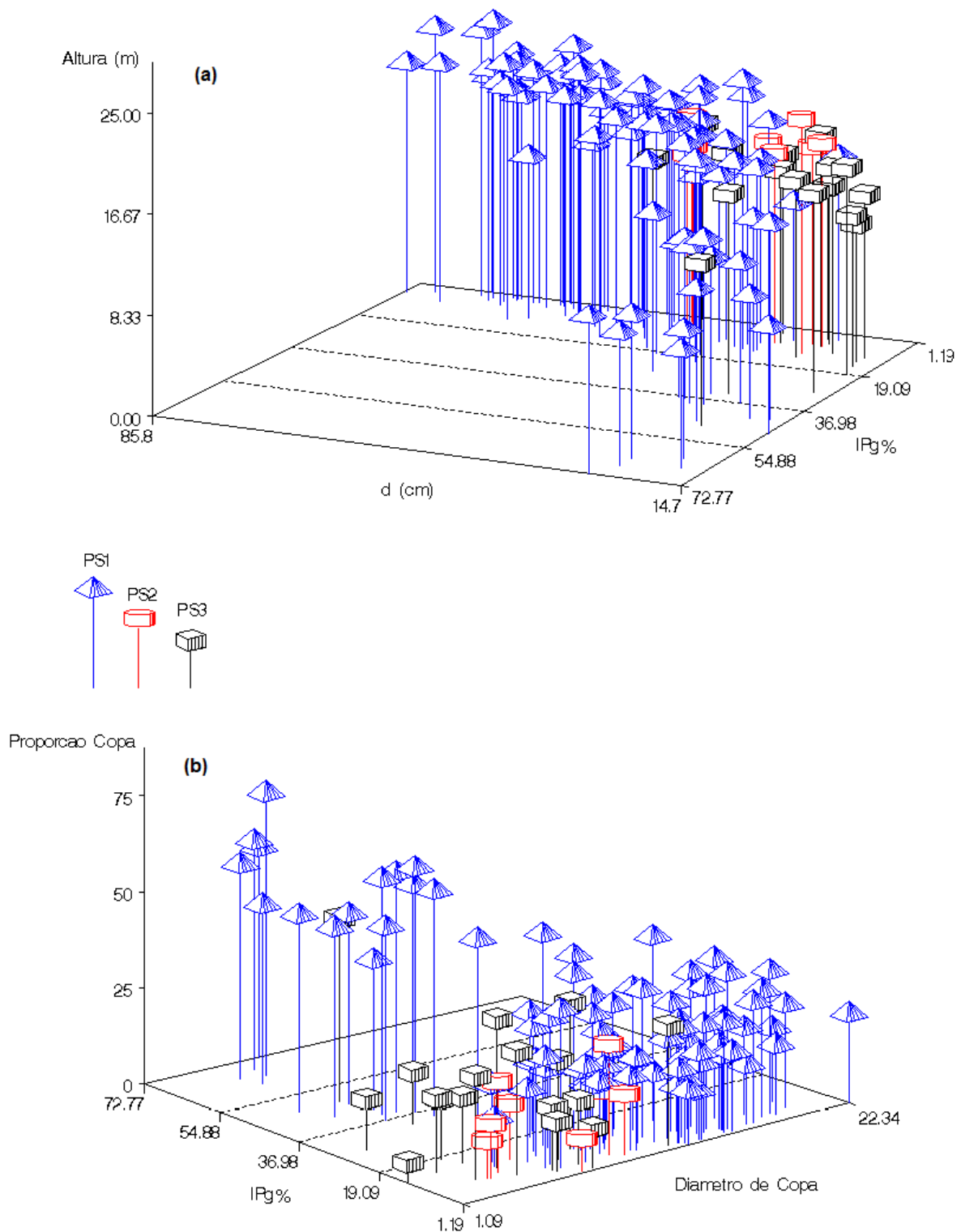


Figura 19 – Comportamento do diâmetro à altura do peito ( $d$ ) relacionado com o incremento periódico em área basal sem transformação logarítmica ( $IPg\%$ ) e a altura total ( $h$ ) das árvores de araucária (a); comportamento do incremento periódico em área basal sem transformação logarítmica ( $IPg\%$ ) relacionado com o diâmetro de copa ( $d_c$ ) e a proporção de copa ( $P_c$ ) das árvores de araucária (b); (PS1) árvores dominante, (PS2) codominante e (PS3) dominada.

As variáveis morfométricas, comprimento e proporção de copa, explicaram 20,33% da variação total do incremento em área basal para árvores dominantes (Figuras 20a e b). Segundo Hasenauer e Monserud (1996), o comprimento de copa está fortemente influenciado pelas condições do crescimento no passado, sugerindo a sua utilização como um descritor da competição da árvore. O comprimento da copa é uma medida de potencial fotossintético, conforme mencionado por (DANIELS; BURKHART, 1975 apud HASENAUER; MONSERUD, 1996). Para Assmann (1970), por sua vez, a morfometria da copa é uma importante medida de vigor da árvore, podendo-se considerar que copas estreitas e longas são preferidas, visto que possibilitam crescer em espaçamento reduzido, com maior número de árvores por unidade de área.

Monserud e Sterba (1996) desenvolveram um modelo de incremento em área basal para árvores individuais de 26 espécies na Áustria, utilizando variáveis de tamanho, competição e de sítio. De acordo com os autores, as variáveis de tamanho, representadas pelo diâmetro à altura do peito e o comprimento de copa, explicaram 14,1% a 47,2% da variação do incremento em área basal, estando essa oscilação dependente da espécie.

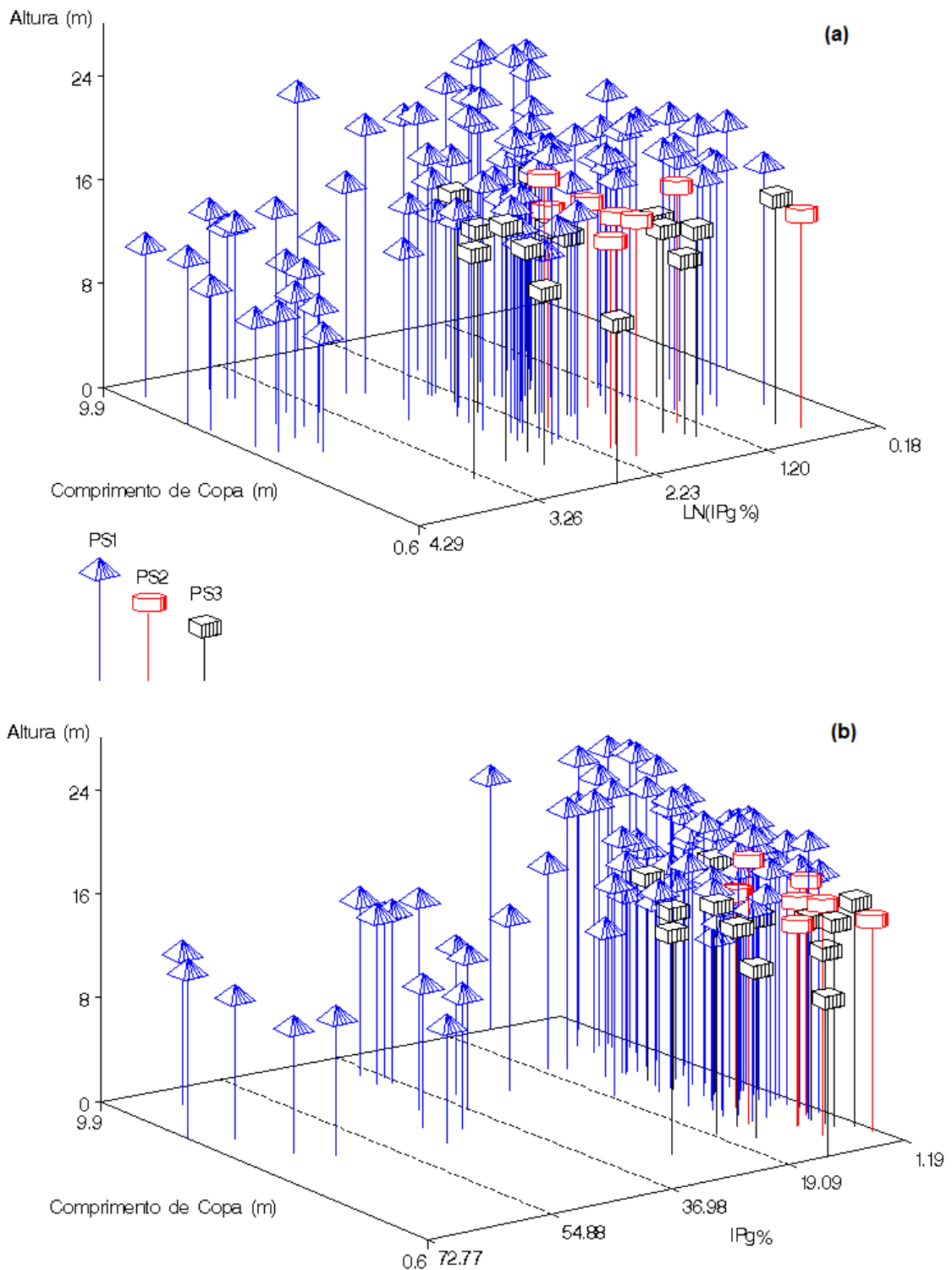


Figura 20 – Comportamento do incremento periódico em área basal com transformação logarítmica  $\text{LN}(\text{IPg}\%)$  relacionado com o comprimento de copa (cc) e a altura total (h) das árvores de araucária (a); Comportamento do incremento periódico em área basal sem transformação logarítmica ( $\text{IPg}\%$ ) relacionado com o comprimento de copa (cc) e a altura total (h) das árvores de araucária (b); (PS1) dominante; (PS2) codominante; (PS3) dominada. Gráficos sem os pontos considerados *outliers*.

Durante a modelagem do incremento periódico em área basal, nenhuma variável independente apresentou valores de FIV (Fator de Inflação de variância) maior que 6,51859, explicitando a ausência de inflação na variância de seus estimadores, ou seja, não ocorreu multicolinearidade (Tabela 32). De acordo com Schneider et al. (2009), o grau de multicolinearidade a que os coeficientes de regressão estão submetidos pode gerar estimativas errôneas dos parâmetros, assumindo valores absurdos ou sem nenhuma coerência com o fenômeno biológico.

Tabela 32 –Resumo estatístico dos parâmetros estimados do modelo de incremento periódico em área basal.

Variável	GL	Parâmetros Estimados	Erro Padrão	Valor de t	Prob. > t	FIV
Intercepto	1	1,28593	0,35700	3,60	<0,0005	0
FC	1	-0,20866	0,05395	-3,87	<0,0002	2,58714
GE	1	2,08777	0,40680	5,13	<0,0001	2,42241
D8CC	1	-0,24817	0,03780	-6,57	<0,0001	6,51859
D8PC	1	0,05855	0,00556	10,53	<0,0001	6,48203

Em que: FIV= fator de inflação de variância.

A distância de Cook's utilizada para o diagnóstico de observações influentes identificou três pontos ( $D > 0,050$ ), que foram verificados e eliminados da base de dados (Figura 21). A respeito desta questão, Souza (1998) já havia citado que existem situações em que as observações não são influentes individualmente, mas em grupo e, neste caso, recomendou, para o controle dos pontos influentes, adotar o auxílio de estimador robusto.



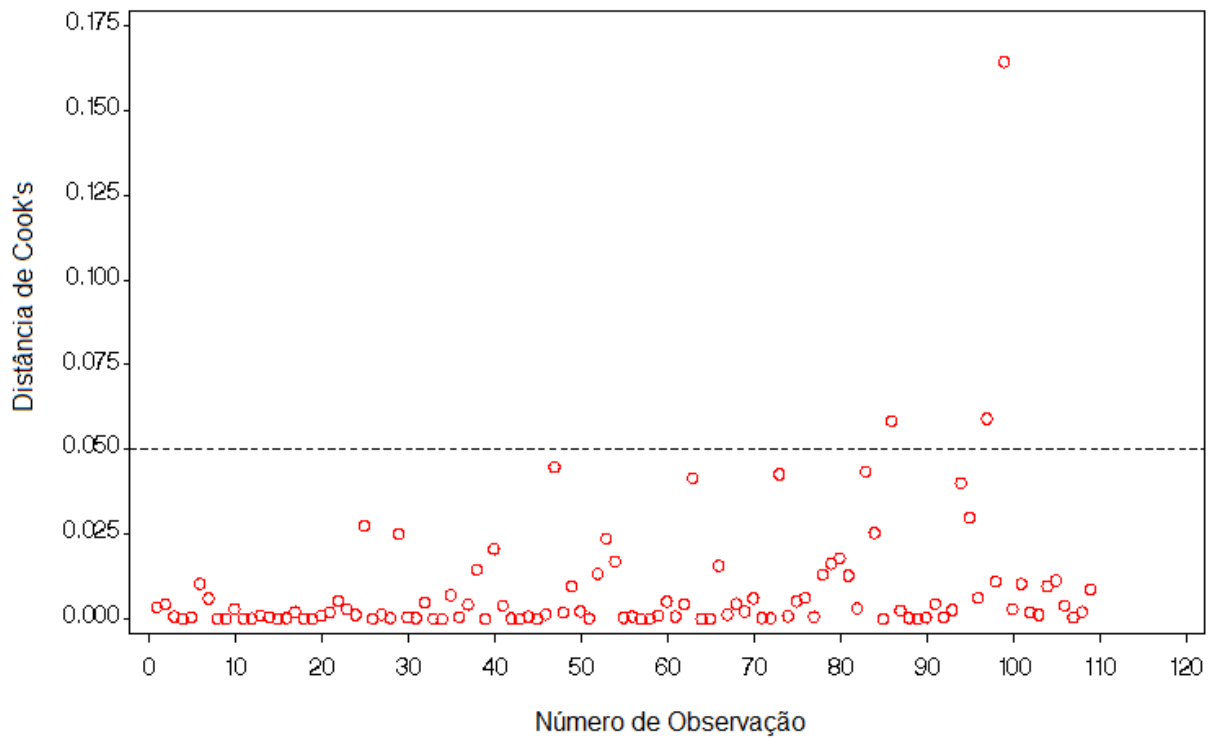


Figura 21 – Detecção de pontos influentes.

Com a eliminação dos pontos influentes, o modelo teve um aumento significativo do ajuste e da significância para todas as variáveis independentes. O modelo reajustado permitiu descrever o crescimento periódico em área basal das árvores individuais de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze com maior acurácia, conforme representado na Figura 22, em que se constatou a boa dispersão dos valores ajustados sobre os observados em toda a amplitude dos diâmetros.

$$\widehat{\text{LN}(\text{IPg}\%)}_i = 1.2859 - 0.2087\text{FC}_i + 2.0878\text{GE}_i - 0.2482\text{D8CC}_i + 0.0586\text{D8PC}_i$$

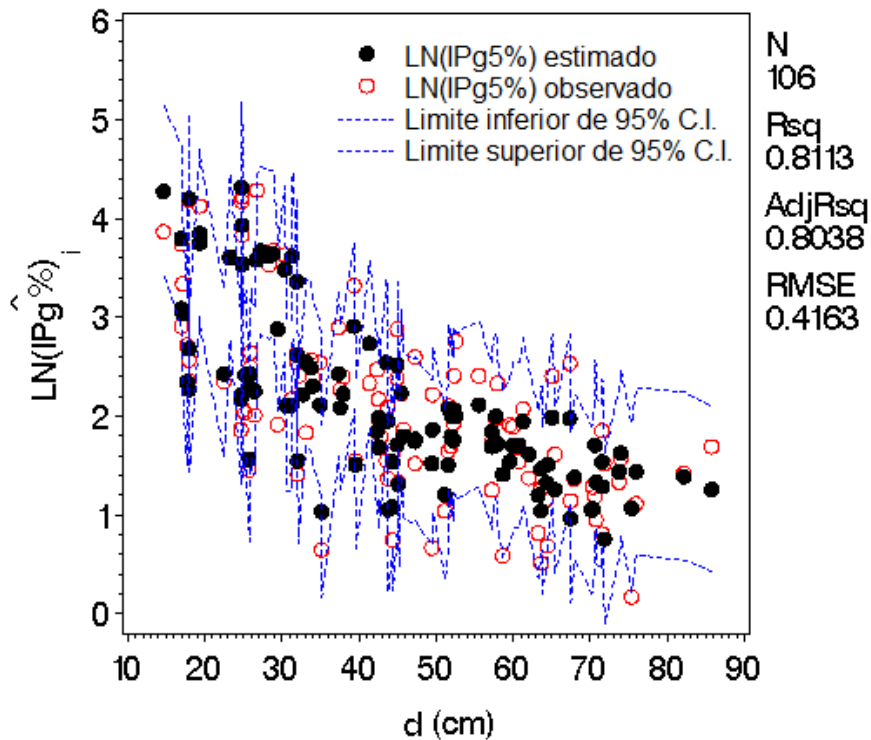


Figura 22 – Distribuição do incremento periódico em área basal observado e ajustado em função do diâmetro à altura do peito em árvores individuais de araucária.

O modelo ofereceu um bom ajuste e precisão com um coeficiente de determinação ajustado de 0,8038, ou seja, mais de 80% da variação do crescimento periódico em área basal foi explicado pela regressão com as variáveis morfométricas. O erro padrão da estimativa em porcentagem foi de ( $S_{yx}\% = 25,77\%$ ), abrangendo grande parte da amplitude dos dados observados.

Utilizando a modelagem do incremento em área basal em árvores de araucária em função de variáveis meteorológicas, morfométricas e ambientais, na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS, Zanon (2007) encontrou um modelo resultante que explicou 84,12% da variação do crescimento total.

A contribuição das variáveis independentes do modelo de regressão está representada na Figura 23. Observou-se uma relação logarítmica decrescente do incremento periódico em área basal à medida que o formal de copa aumentava, ou seja, árvores com alto formal de copa (copa mais curta e larga) evidenciaram menor taxa de incremento em área basal quando comparadas com árvores com baixo

formal de copa (copa longa e estreita), conforme expresso na Figura 23a, comprovando que, para uma mesma área de copa, são mais eficientes as árvores de melhor posição social (dominantes) se comparadas com as codominantes e as dominadas, de acordo com a Figura 19b.

As variáveis, proporção de copa e comprimento de copa, foram significantes apenas para as árvores dominantes (Dummy 8 - D8), registrando que a relação destas variáveis com o incremento periódico é crescente, à medida que aumenta o comprimento e a proporção de copa, cresceu a taxa de incremento em área basal. Nas Figuras 23b e 23c, os pontos referentes ao valor zero da abscissa são as observações referente às árvores codominantes e dominadas, as quais não foram significantes no modelo.

As árvores com grau de esbeltez ou relação  $h/d$  entre 0,35 e 0,62, representadas na parte superior da Figura 23d, apresentaram maior incremento, em torno de 72% em um período de cinco anos de crescimento. Essas árvores caracterizam indivíduos jovens com diâmetro pequeno (Figura 19a) e com alta proporção de copa (Figura 19b).

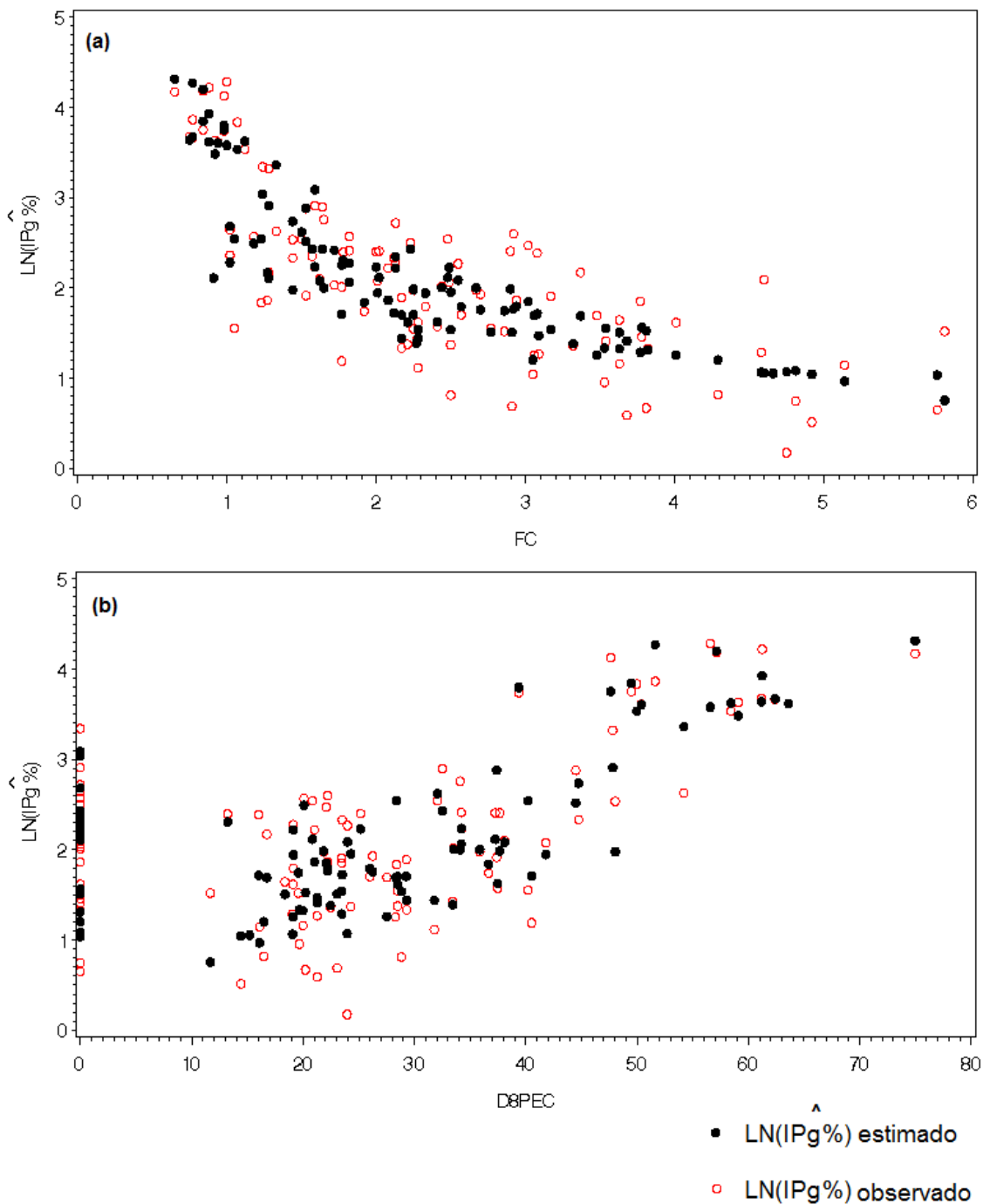


Figura 23 – Distribuição dos dados estimados e observados do modelo de crescimento periódico em área basal transformado  $\widehat{LN(IPg\%)}$  em função de cada variável independente: FC - formal de copa (a); D8PC - proporção de copa para árvores dominantes segundo a variável Dummy (D8) (b); D8CC - comprimento de copa para árvores dominantes segundo a variável Dummy (D8) (c); GE - grau de esbeltez ou relação h/d (d).

Continuação .....

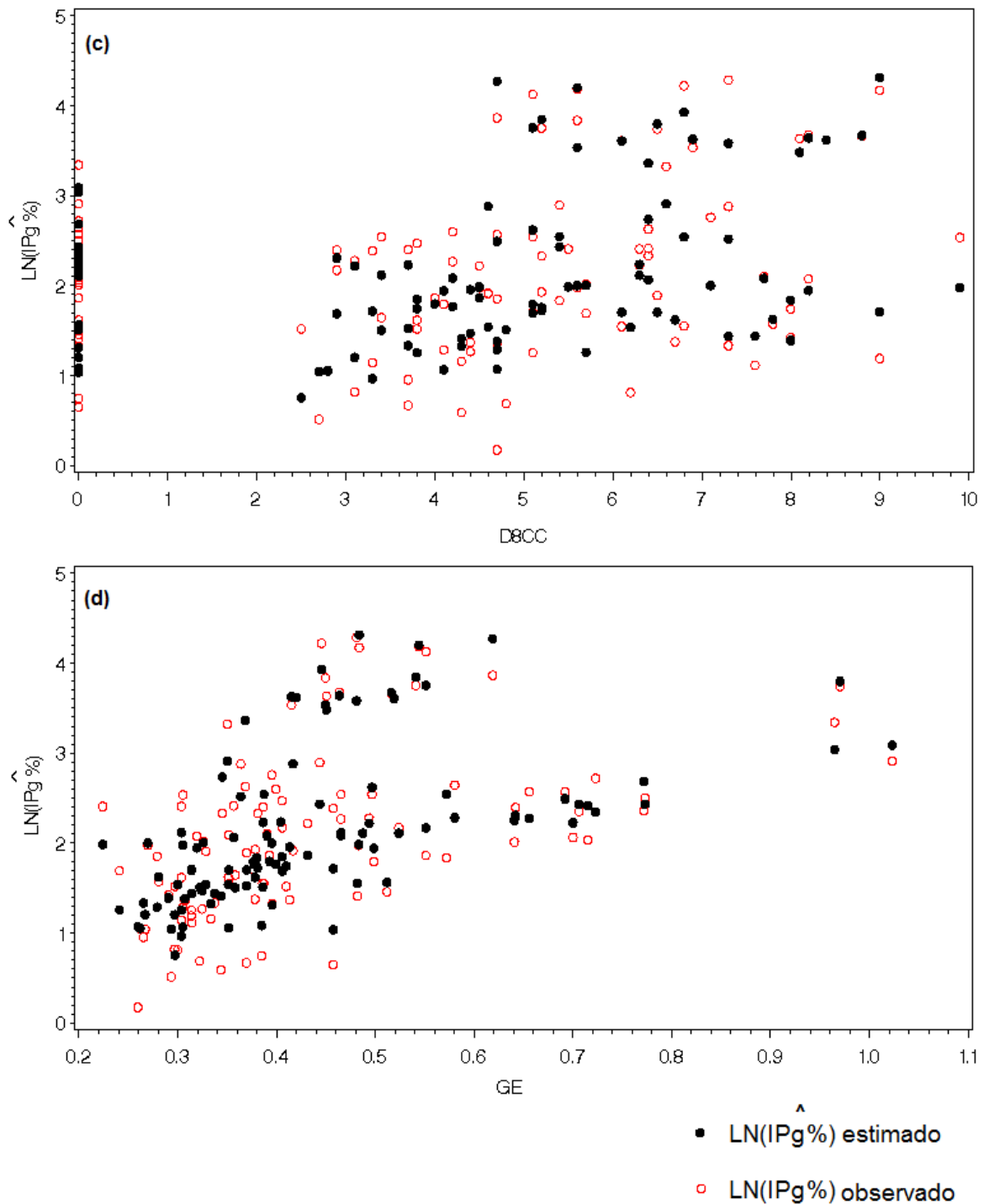


Figura 23 – Distribuição dos dados estimados e observados do modelo de crescimento periódico em área basal transformado  $\widehat{LN(IPg\%)}$  em função de cada variável independente: FC - formal de copa (a); D8PC - proporção de copa para árvores dominantes segundo a variável Dummy (D8) (b); D8CC - comprimento de copa para árvores dominantes segundo a variável Dummy (D8) (c); GE - grau de esbeltez ou relação h/d (d).

A dispersão dos resíduos padronizados em função do incremento periódico em área basal (Figura 24a) revelou existir cinco pontos além dos limites (dentro da área de rejeição) a considerar o valor crítico de t em  $\pm 1,98$  para 105 graus de liberdade pela distribuição t de Student ( $t_{n-1gl}^{\alpha=0,05} \Rightarrow t_{105gl}^{\alpha=0,05} = 1,98$ ). Os pontos fora destes limites foram analisados na base de dados e não foram associados a qualquer erro, sendo, dessa forma, mantidos, pois, estatisticamente são admissíveis.

A dispersão dos resíduos em função da variável dependente estimada na Figura 24b mostrou distribuição homogênea sem a presença de erros sistemáticos que superestimassem ou subestimassem valores.

Os testes de condicionantes de regressão indicaram resíduos homocedásticos pelo teste de White (Prob.> $\chi^2=0,4092$ ) e distribuição normal pelo teste de Shapiro Wilk (Prob.=0,2703). Além disso, o teste de Durbin-Watson revelou não haver indícios de correlação entre erros (DW=1,78) positivos (Prob.<DW=0,0884) e negativos (Prob.>DW=0,9116), comprovando um bom ajuste e precisão do modelo.

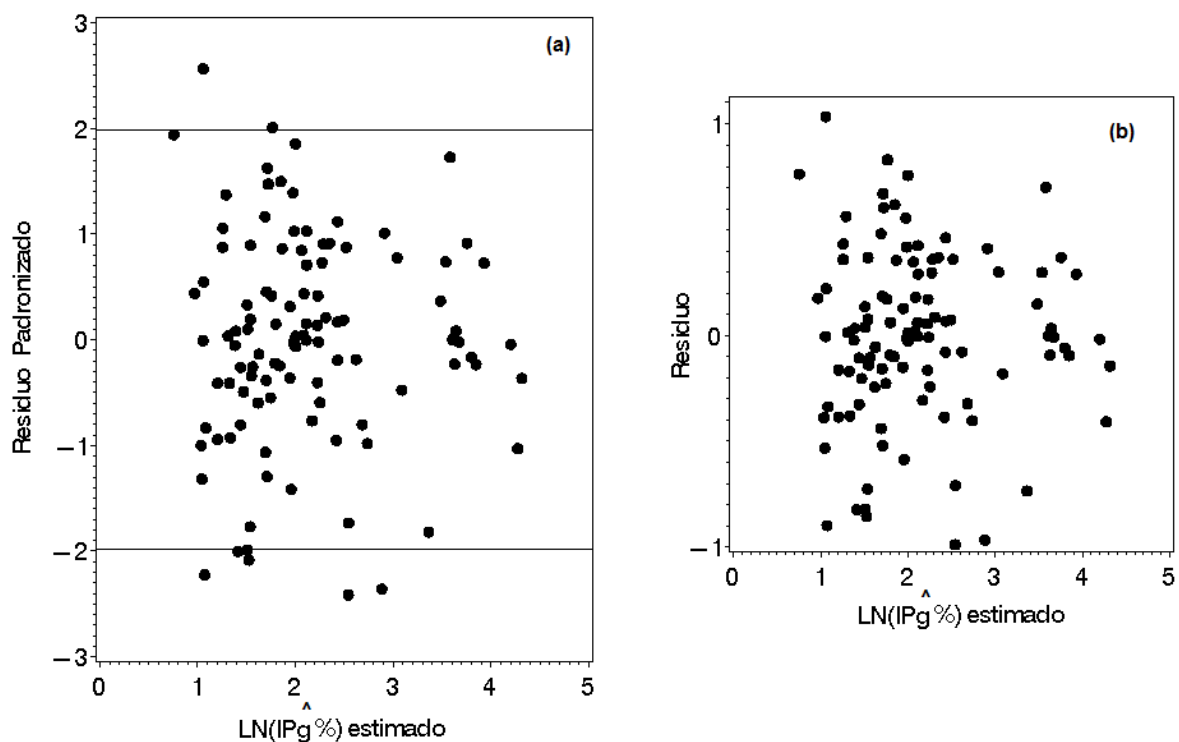


Figura 24 – Resíduo padronizado em função da variável dependente estimada LN(IPg%) (a); Resíduo em função da variável dependente estimada LN(IPg%) (b).

## 5 CONCLUSÕES

Os resultados obtidos no presente estudo permitem concluir que:

- 1) a altura total é estimada com relativa precisão e baixo erro pelo modelo de Backman modificado com variáveis Dummy descritoras das posições sociológicas;
- 2) o diâmetro de copa é estimado com precisão e baixo erro pelo modelo linear simples com a variável dependente transformada pela raiz quadrada e variáveis Dummy para estratificar as árvores dominadas;
- 3) a área de projeção da copa calculada a partir de oito raios tem maior acurácia, representando melhor a verdadeira dimensão da copa. A comparação estatística das áreas médias de copa não identifica diferenças significantes para áreas determinadas com quatro e oito raios, porém a análise gráfica demonstra a tendência de superestimativa das áreas calculadas com quatro e dois raios de copa de forma irregular, copas que são frequentes nas árvores codominantes e dominadas;
- 4) a determinação da área de projeção da copa com a medição de quatro raios pode ser empregada em copas simétricas para não haver perda de acurácia;
- 5) existe uma grande variação nas características morfométricas na araucária, no entanto, é possível ajustar modelos matemáticos significantes em função do diâmetro à altura do peito. Os baixos valores do coeficientes de determinação ajustados, encontrados na maioria dos modelos, são justificados pela alta variabilidade das florestas nativas, as quais são heterogêneas e inequidâneas;
- 6) a transformação logarítmica da variável dependente, incremento periódico em área basal, traz bom ajuste e precisão ( $R^2_{aj.}=0,8038$ ;  $S_{yx}\%=25,77\%$ ) ao modelo de regressão, tendo, como variáveis independentes, o formal de copa, a proporção de copa, o comprimento de copa e o grau de esbeltez;

- 7) as variáveis morfométricas da copa: forma de copa, comprimento de copa, proporção de copa explicam 76,21% da variação total do modelo de crescimento em área basal;
- 8) o efeito da competição reduz o comprimento de copa, alterando mais a proporção de copa das árvores codominante e dominada se comparadas com as árvores dominantes.
- 9) é possível usar variáveis morfométricas, principalmente as que caracterizam as dimensões da copa para descrever o incremento em área basal de árvores de araucária.



## REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALDER, D. **Estimación del volume forestal y predicción Del rendimento:** con referencia especial a los trópicos. Roma: FAO: MONTES, 1980. 80 p.

ARNEY, J.D. Tables for quantifying competitive stress on individual trees. **Canadium Forestry Service**. Information Report BC-X-78, 1973.

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

BELLA, I.E. A new competition model for individual trees. **Forest Science**, v.17, p. 364-372, 1971.

BOX, G.E.P.; COX, D.R. An analysis of transformations. **Journal of the Royal Statistical Society**. London, B-26, p.211-243. 1964.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Lista oficial das espécies da flora brasileira ameaçadas de extinção. Anexo I da Instrução Normativa n. de set. de 2008. Disponível: <<http://www.mma.gov.br/ascom/ultimas/index.cfm?id=4370>>. Acesso em: 23 maio de 2011.

CARVALHO, P.E.R. **Espécies florestais brasileira**. Colombo: EMBRAPA-CNPQ; Brasília: EMBRAPA-SPI, 2003. 1038 p.

CARVALHO, P.E.R. **Espécies florestais brasileira: recomendações silviculturais, potencialidades e uso da madeira**. Colombo: EMBRAPA-CNPQ; Brasília: EMBRAPA-SPI, 1994. 640 p.

COIMBRA, J. L. M. et al. Esperanças matemáticas dos quadrados médios: uma análise essencial. **Ciência Rural**. Santa Maria, v.36, n.6, p.1730-1738, 2006.

COSTA, J. R. et al. Aspectos silviculturais da castanha-do-brasil (*Bertholletia excelsa*) em sistemas agroflorestais na Amazônia Central. **Acta Amazonica**. v.39, n.4, p. 843-850. 2009.

CUNHA, T. A. da. **Modelagem do incremento de árvores individuais de *Cedrela odorata* L. na Floresta Amazônica.** 2009. 87 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

DELLA-FLORA, J. B. **Modelos de Crescimento para Árvores Singulares *Nectandra megapotamica* (Spreng.) Mez. e *Ocotea puberula* Ness.** 2001. 60 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2001.

DRAPER, N. R.; SMITH, H. **Applied regression analysis.** New York: Wiley, 1966. 407 p.

DURLO, M. A. **Zuwachsuntersuchungen und Einzelbaumwachstumsmodelle für *Cabralea canjerana*, *cedrela fissilis* und *Cordia trichitima* in sekundären Laubmischwäldern SüdBrasiliens.** 1996. 175 p. Dissertation. Institut für Waldwachstumsforschung. Universität für Bodenkultur, Wien, 1996.

DURLO, M.A. Relações morfométricas para *Cabralea canjerana* (Well.) Mart. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 11, n. 1, p. 141-150, jun. 2001.

DURLO, M.A.; DENARDI, L. Morfometria de *Cabralea canjerana*, em mata secundária nativa do Rio Grande do Sul. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 8, n. 1, p. 55-66, nov.1998.

DURLO, M.A.; SUTILI, F.J.; DENARDI, L. Modelagem da copa de *Cedrela fissilis* Vellozo. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 14, n. 2, p. 79-89, dez. 2004.

EK, A. R.; MONSERUD, R. A. FOREST: A computer model for simulating the growth and reproduction of mixed species forest stands. Univ. of Wisconsin-Madison, Research Report, R 2635. 13 p., 1974.

EPAGRI. **Dados e informações biofísicas da Unidade de Planejamento Regional Planalto Sul Catarinense** – UPR3, Florianópolis, 2002. 70 p.

FINGER, C. A. G. **Biometria florestal.** Santa Maria: CEPEF/FATEC/UFSM, 2006. 284 p.

FORMENTO, S.; SCHORN, L. A.; RAMOS, R. A. B. Dinâmica estrutural de uma Floresta Ombrófila Mista em Campo Belo do Sul, SC. **Cerne**, Lavras, v.10, n.2, p. 196-212, 2004.

FURNIVAL, G.M. An index for comparing equations used in constructing volume tables. **Forest Science**, v.7, n.4, p. 337-341, 1961.

FREUND, R. J.; LITTELL, R.C. **SAS for linear models: a guide to the ANOVA and GLM Procedures**. SAS Institute INC., Cary, NC, 1981.

GERHARDT. E.J.; FINGER. C.A.G.; LONGHI. S.J.; SCHUMACHER. M.V. Contribuição da análise multivariada na classificação de sítios em povoamentos de *Araucaria angustifolia* (bertol.) kuntze baseada nos fatores físicos e morfológicos do solo e no conteúdo de nutrientes da serapilheira. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.11, n.2, p. 41-57, 2001.

GUERRA, M. P. et al. Exploração, manejo e conservação da araucária (*Araucaria angustifolia*). In: SIMÕES, L. L.; LINO, C. F. (Eds.). **Sustentável Mata Atlântica: A exploração de seus recursos florestais**. São Paulo: SENAC, 2002. p.85-102.

HASENAUER, H. Dimensional relationships of open-grown trees in Austria. **Forest Ecology and Management**, v. 96, p. 197-206, 1997.

HASENAUER, H.; MONSERUD, R. A. A crown ratio model for Austrian forests. **Forest Ecology and Management**, v. 84, p. 49-60, 1996.

HEGYI, F. A simulation model for managing jack-pine stands. In: FRIES, G. **Growth models for tree and stand population**. Stockolm: Royal College of Forestry, Research note, n.30, p.74-90, 1974.

HESS, A. F. **Inter-relações no crescimento de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze em diferentes locais do Rio Grande do Sul**. 2006. 177 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2006.

HESS, A. F.; CALGAROTTO, A.R.; PINHEIRO, R.; WANGINIYAK, T.C.R. Proposta de manejo de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze utilizando o quociente de Liocourt e análise de incremento, em propriedade rural no Município de Lages, SC. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v.30, n.64, p. 337-345, Nov./dez. 2010.

HOOGH, R. J. **Site-Nutrition-Growth relationships of *Araucaria angustifolia* (bertol.) kuntze in southern Brazil**. 1981. 161 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) - Albert-Ludwigs-Universität, 1981.

HOPPE, J.M.; CALDEIRA, M.V.W. Correlações entre o crescimento de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze plantada na floresta nacional de Passo Fundo RS com as características químicas do solo **Rev. Acad., Ciênc. Agrár. Ambient.**, Curitiba, v.1, n.4, p.33-40. 2003a.

HOPPE, J.M.; CALDEIRA, M.V.W. Micronutrientes na copa e suas correlações com o crescimento da *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze plantada em Passo Fundo. Rio Grande do Sul. **Rev. Acad., Ciênc. Agrár. Ambient.**, Curitiba, v.1, n.2, p.21-32. 2003b.

HUECK, K. **As florestas da América do Sul**. São Paulo: Polígono, 1972. 239 p.

HUSCH, B.; MILLER, I. C.; BEERS, T. W. **Forest mensuration**. 3.ed. New York: John Wiley, 1982. 402p.

IBAMA. **Lista oficial de flora ameaçada de extinção. Portaria 37-N 1992**. Disponível em: < <http://www.ibama.gov.br/flora/extincao.htm> >. Acessado em: 22 de maio de 2011.

KRAUSE, M.R. Desmatamento na Serra do Mar. **Boletim FBCN**, v.19, p.42-48, 1984.

LAMPRECHT, H. **Silvicultura nos trópicos: ecossistemas florestais e respectivas espécies arbóreas**. Universidade Gottingen. Eschborn. Alemanha, 1990. 343 p.

LISBOA, G. S. **Fotografias aéreas de escala grande e imagem IKONOS-2 no mapeamento de copa de *Araucaria angustifolia***. 2009, 104 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Unicentro, Irati, 2009.

LONGHI, S. J. **A estrutura de uma floresta natural de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze, no Sul do Brasil**. 1980, 198 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1980.

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

MARCHIORI, J.N.C. **Dendrologia das Gimnospermas**. Santa Maria: Ed. Da Universidade Federal de Santa Maria, 2005. 161p.

MATTOS, R. B. **Produtividade e incremento de *cabralea canjerana* (Vell.) Mart., *Cedrela fissilis* Vell. e *Cordia trichotoma* (Vell.) Arrab. Ex Steud., em floresta nativa no Rio Grande do Sul.** 2007. 105f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

MITSCHERLICH, G.; SONNTAG, G. Paperversuche: Modell für eine regenerate und Neuputz-papel-ertragstafel im Oberheingebiet. **Allg. Forst und Jg.** N.153, p. 213-219. 1982.

MITSUDA, Y.; ITO, S.; TAKATA, K. Effects of competitive and cooperative interaction among neighboring trees on tree growth in a naturally regenerated even-aged *Larix sibirica* Stand in considering height stratification. **Journal of Forest Research.** v.7 p. 185-191, 2002.

MONSERUD, R.; STERBA, H.A. A basal area increment model for individual trees growing in even-and-uneven-aged forest stands in Austria. **Forest Ecology and Management**, v.80, p. 57-80, 1996.

MONTGOMERY, D.C.; PECK, E.A. **Introduction to linear regression analysis.** New York : J. Wiley, 1981. 504p.

NASCIMENTO, R. G. M. et al. Relações dendrométricas de *Araucaria angustifolia*. **Nota científica.** Colombo, v.30, n.64, p.369-374, Nov./dez. 2010.

NEGRELLE, R. R. B.; SILVA, F. C. Fitossociologia de um trecho de floresta com *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Kuntze no município de Caçador, SC. **Boletim de Pesquisas Florestais**, v.24/25, p.37-54, 1992.

NETER, J.; KUTNER, M.H.; NACHTSHEIM, C. J. **Applied linear regression models.** New York: McGraw-Hill, 1996, 713 p.

NOGUEIRA, A. C. **Reação do crescimento radial da *Araucaria angustifolia* (Bert.) Kuntze em florestas naturais que sofreram corte seletivo.** 1989, 107 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1989.

NUTTO, L. Manejo do crescimento diamétrico de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Kuntze. baseado na árvore individual. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.11, n.2, p.9-25, dez. 2001.

NUTTO, L. et al. Utilização dos parâmetros da copa para avaliar o espaço vital em povoamentos de *Pinus elliottii* Engelm. **Boletim de Pesquisa Florestal**, v. 42, p. 110-122, jan./jun. 2001.

NUTTO, L.; SPATHELF, P. Modelagem da desrama natural de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Kuntze. **Revista Floresta**. v.33, n.3, p.295-309. 2003.

OLIVEIRA, Y. M. M. Características entre parâmetros dendrométricos em *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Kuntze utilizando fotografias aéreas. **Boletim de Pesquisa Florestal**. n.5, p. 69-105, dez. 1982.

OLIVEIRA-FILHO, A. T.; FONTES, M. Patterns of floristic differentiation among Atlantic forests in Southeastern Brazil and the influence of climate. **Biotropica**, The Association for Tropical Biology, v. 32, n. 4, p. 793–810, 2000.

ORELLANA, E.; KOEHLER, A.B. Relações morfométricas de *Ocotea odorifera* (Vell.) Rohwer. **Revista Acadêmica Ciências Agrárias e Ambientais**, Curitiba, v. 6, n. 2, p. 229-237, abr./jun. 2008.

PADOIN, V.; FINGER, C.A.G. Relações entre as dimensões da copa e a altura das árvores dominantes em povoamentos de *Pinus taeda* L. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.20, n.1, p.95-105, jan.-mar. 2010.

PADOIN, V. **Diretrizes para desbaste de *Pinus taeda* L em função da altura dominante**. 2007. 95 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

PÉLLICO NETTO, S.; BRENA, D. A. **Inventário florestal**. Curitiba: Edição do autor, 1997. 316 p.

PRETZSCH, H. Perspektiven einer modellorientierten Waldwachstumsforschung **Forstwissenschaftliches Centralblatt**, v.14, p. 188-209. 1995.

PRODAN, M. et al. **Mensura Forestal**. San José: Instituto Interamericano de Cooperación para la Agricultura, 1997, 561 p.

PUCHALSKI, Â. **Variações edafo-climáticas e ocorrência natural da *Araucaria angustifolia* (Bert.) kuntze no Estado de Santa Catarina**. 2004, 91p. Dissertação (Mestrado em Recursos Genéticos Vegetais) - Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2004.

REITZ, R.; KLEIN, R. M. **Flora ilustrada catarinense: Araucariáceas**. Itajaí: Herbário Barbosa Rodrigues, 1966. 63 p.

RICHARDS, F. J. A flexible growth function for empirical use. **Journal experimental of Botany**, Oxford, v.10, p.290-300, 1959.

RICKLEFS, R. E. **A economia da natureza**. 3. ed. Rio de Janeiro, RJ: Guanabara Koogan S.A. 1996. 470p.

RINN, F. **TSAP, version 3.0, reference manual**: computer program for tree ring analysis and presentation. Heidelberg: Dipl.-Phys., 1996. 263p.

ROMAN, M.; BRESSAN, D.A.; DURLO, M.A. Variáveis morfométricas e relações interdimensionais para *Cordia trichotoma* (Vell.) Arráb. Ex Steud. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 19, n. 4, p. 473-480, out.-dez., 2009.

SANQUETTA, C. R. **Fundamentos biométricos dos modelos de simulação florestal**. Curitiba: FUPEF. 1996. 49 p.

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

SAS/STAT. **User's guide** – release 9.1.3 edition. Cary N. C.: SAS Institute Inc. 2004.

SCHNEIDER, P. R.; SCHNEIDER, P.S.P. **Introdução ao manejo florestal**. Santa Maria: FACOS-UFSM, 2008. 566 p.

SCHNEIDER, P. R. et al. **Análise de regressão aplicada à Engenharia Florestal**. 2ª Ed. Santa Maria: UFSM, CEPEF, 2009. 236p.

SCHNEIDER, P. R.; FINGER, C.A.G. **Manejo Sustentado de Florestas Inequiâneas Heterogêneas**. Santa Maria: UFSM, 2000. 195 p.

SCOLFORO, J. R. **Mensuração florestal 4: avaliação da produtividade florestal através da classificação de sítio**. Lavras: ESAL, 1993. 138 p.

SCOLFORO, J.R. **Biometria florestal: Parte I: modelos de regressão linear e não-linear; Parte II: modelos para relação hipsométrica, volume, afilamento, e peso de matéria seca**. Lavras: UFLA/FAEPE, 2005. 352 p.

SEITZ, R. A. Avanços na silvicultura de *Pinus* sp. e *Araucaria angustifolia* no Sul do Brasil. In: SIMPÓSIO INTERNACIONAL “O DESAFIO DAS FLORESTAS NEOTROPICAIS”, 1991, Curitiba. **O desafio das florestas neotropicais**. Curitiba: Universidade Federal do Paraná; Freiburg: Universidade Albert Ludwig, p. 153-176. 1991.

SILVA, J.A.A.; BAILEY, R.L. Considerações teóricas sobre o uso correto do índice de Furnival na seleção de equações volumétricas. **Revista Árvore**, Viçosa, 15 (3): 323-327, 1991.

SILVA, J. A. A; MACHADO, S.A.; BORDERS, B.E; BAILEY, R.L. Aumento da precisão de modelos volumétricos através do uso da transformação de Box e Cox. **Cerne**, v.1, n. 1, p. 13-16, 1994.

SOLIGO, A. J. **Crescimento da *Araucaria angustifolia* regenerada sob *Pinus elliottii* e em povoamento homogêneo interplantado com *pinus* spp.** 2009. 132 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2009.

SOUZA, G. S. **Introdução aos Modelos de Regressão Linear e não-linear**. Brasília: Embrapa, 1998. 505 p.

SPURR S. H. **Forest Inventory**. New York : Ronald Press, 1952, 476 p.

TONINI, H.; ARCO-VERDE, M.F. Morfologia da copa para avaliar o espaço vital de quatro espécies nativas da Amazônia. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 40, n. 7, p. 633-638, jul. 2005.

TONINI, H.; KAMINSKI,P.E.; COSTA, P. da. Relação da produção de sementes de castanha-do-brasil com características morfométricas da copa e índices de competição. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 43, n. 11, p. 1509-1516, nov. 2008.

VANCLAY, J. K. **Modelling forest growth and yield: applications to mixed tropical Forests**. Copenhagem: CAB International, 1994. 312p.

WEST, P. W. Use of diameter increment and basal area increment in tree growth studies. **Can. J. For. Res.**, v.10, p. 71-77, 1980.



WIMBERLY, M.C.; BARE, B.B. Distance-dependent and distance-independent models of douglas - fir and western hemlocks basal area growth following silvicultural treatment. **Forest Ecology and Management**, v.89, p.1-11.,1996.

ZANON, M. L.B. **Crescimento da *Araucaria angustifolia* (Bertol.) kuntze diferenciado por dióica**. 2007. 110 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2007.

ZANON, M.L.B.; FINGER, C.A.G. Relação de variáveis meteorológicas com o crescimento das árvores de *Araucaria angustifolia* (bertol.) kuntze em povoamentos implantados. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.20, n.3, p.467-476, jul.-set., 2010.

ZEIDE, B. Analysis of growth equations. **Forest Science**, v. 39, n. 3, p. 549 - 616, 1993.



## **ANEXOS**

ANEXO A – Estatísticas das equações lineares ajustadas da relação hipsométrica de *Araucaria angustifolia* para árvores dominantes em Lages, SC.

Eq.	Condicionantes da Regressão								
	Coeficientes			Estatísticas			White's Test	Shapiro-Wilk	Durbin Watson
	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$R^2_{aj.}$	IF	$\chi^2$	Prob. $X^2$	Prob.	Prob. < DW
1	0,18739	2,15989	-	0,6932	3,5537	47,4058	<0,0001	0,0868	<0,0001
2	0,74530	0,91554	-	0,6358	3,4323	48,5831	0,0207	0,8198	0,0001
3	1,11496	0,46220	-	0,6464	3,5657	50,8590	0,0002	0,7968	0,0001
4	3,27305	-16,71339	-	0,6697	3,4462	47,1200	0,0006	0,5665	0,0001
5	4,04331	0,44994	-0,00297	0,6236	3,3475	46,6373	0,4631	0,7337	0,0001
6	-9,83358	7,32924	-	0,6209	3,3684	47,2314	0,1936	0,7868	0,0001

Em que: Eq.= número da equação;  $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2$  = são coeficientes;  $R^2_{aj.}$ = coeficiente de determinação ajustado; IF= índice de Furnival;  $\chi^2$  = estatística Qui-quadrado; F= valor de F calculado; Prob.  $X^2$  = probabilidade do teste White's; Prob. = probabilidade do teste de Shapiro-Wilk; Prob.<DW = probabilidade do teste de Durbin-Watson.

ANEXO B – Estatísticas das equações não lineares ajustadas da relação hipsométrica de *Araucaria angustifolia* para árvores dominantes em Lages, SC.

Eq.	Condicionantes da Regressão								
	Coeficientes			Estatísticas			White's Test	Shapiro-Wilk	Durbin Watson
	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$R^2_{aj.}$	IF	$\chi^2$	Prob. $X^2$	Prob.	Prob. < DW
7	22,31986	0,04118	1,14420	0,6293	3,3223	46,1877	0,1243	0,5986	<0,0001
8	-1,75906	2,05899	-0,21872	0,6288	3,3246	46,2639	0,4724	0,6097	<0,0001

Em que: Eq.= número da equação;  $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2$  = são coeficientes;  $R^2_{aj.}$ = coeficiente de determinação ajustado; IF= índice de Furnival;  $\chi^2$  = estatística Qui-quadrado; F= valor de F calculado; Prob.  $X^2$  = probabilidade do teste White's; Prob. = probabilidade do teste de Shapiro-Wilk; Prob.<DW = probabilidade do teste de Durbin-Watson.

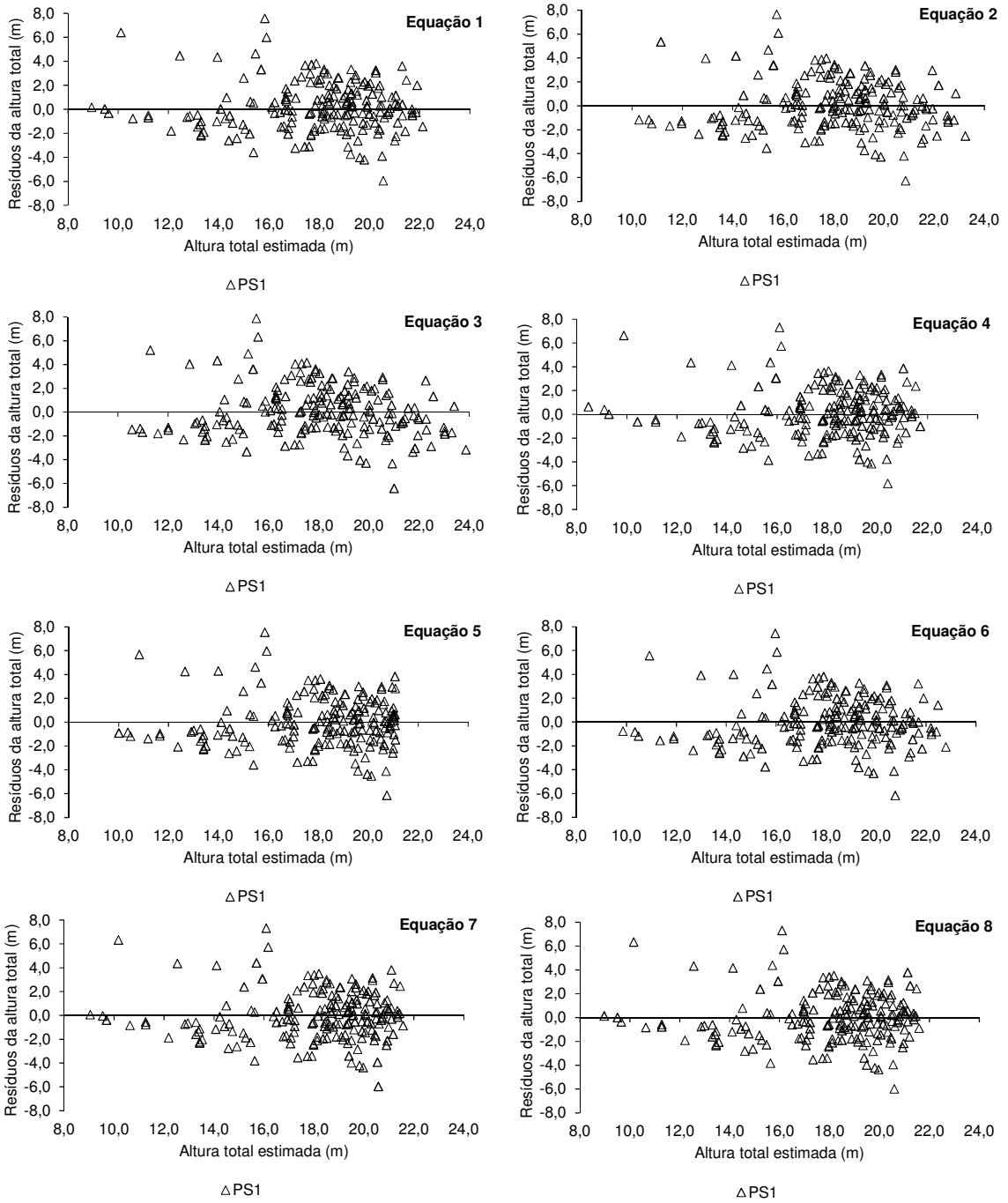


Figura 25 – Gráficos de resíduos dos modelos ajustados para a variável altura total em árvores dominante de *Araucaria angustifolia*.

ANEXO C – Estatísticas das equações lineares ajustadas da relação hipsométrica de *Araucaria angustifolia* para árvores codominantes em Lages, SC.

Eq.	Coeficientes			Estatísticas			Condicionantes da Regressão		
	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$R^2_{aj.}$	IF	$\chi^2$	White's Test Prob. $X^2$	Shapiro-Wilk Prob.	Durbin Watson Prob. < DW
	1	0,19614	1,80409	-	0,7538	3,8048	14,2342	0,0059	0,9125
2	-	1,13011	-	0,9933	4,2154	17,6771	0,5152	0,6650	0,2431
3	0,93844	0,51460	-	0,6258	4,1887	17,7031	0,2360	0,2800	0,0457
4	3,15331	-12,31333	-	0,7056	3,7153	13,3077	0,0084	0,6858	0,2726
5	-	0,82571	-0,00946	0,9824	3,5163	11,4382	0,2474	0,5130	0,2771
6	-49,57386	33,66215	-4,20260	0,6022	3,6330	12,9022	0,1594	0,5118	0,2469

Em que: Eq.= número da equação;  $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2$  = são coeficientes;  $R^2_{aj.}$ = coeficiente de determinação ajustado; IF= índice de Furnival;  $\chi^2$  = estatística Qui-quadrado; F= valor de F calculado; Prob.  $X^2$  = probabilidade do teste White's; Prob. = probabilidade do teste de Shapiro-Wilk; Prob.<DW = probabilidade do teste de Durbin-Watson.

ANEXO D – Estatísticas das equações não lineares ajustadas da relação hipsométrica de *Araucaria angustifolia* para árvores codominantes em Lages, SC.

Eq.	Coeficientes			Estatísticas			Condicionantes da Regressão		
	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$R^2_{aj.}$	IF	$\chi^2$	White's Test Prob. $X^2$	Shapiro-Wilk Prob.	Durbin Watson Prob. < DW
	7	19,29453	0,05696	-	0,5883	3,7425	13,2989	0,2369	0,2819
8	-5,29854	4,37732	-0,58576	0,6424	3,4446	11,7947	0,2072	0,3736	0,3207

Em que: Eq.= número da equação;  $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2$  = são coeficientes;  $R^2_{aj.}$ = coeficiente de determinação ajustado; IF= índice de Furnival;  $\chi^2$  = estatística Qui-quadrado; F= valor de F calculado; Prob.  $X^2$  = probabilidade do teste White's; Prob. = probabilidade do teste de Shapiro-Wilk; Prob.<DW = probabilidade do teste de Durbin-Watson.

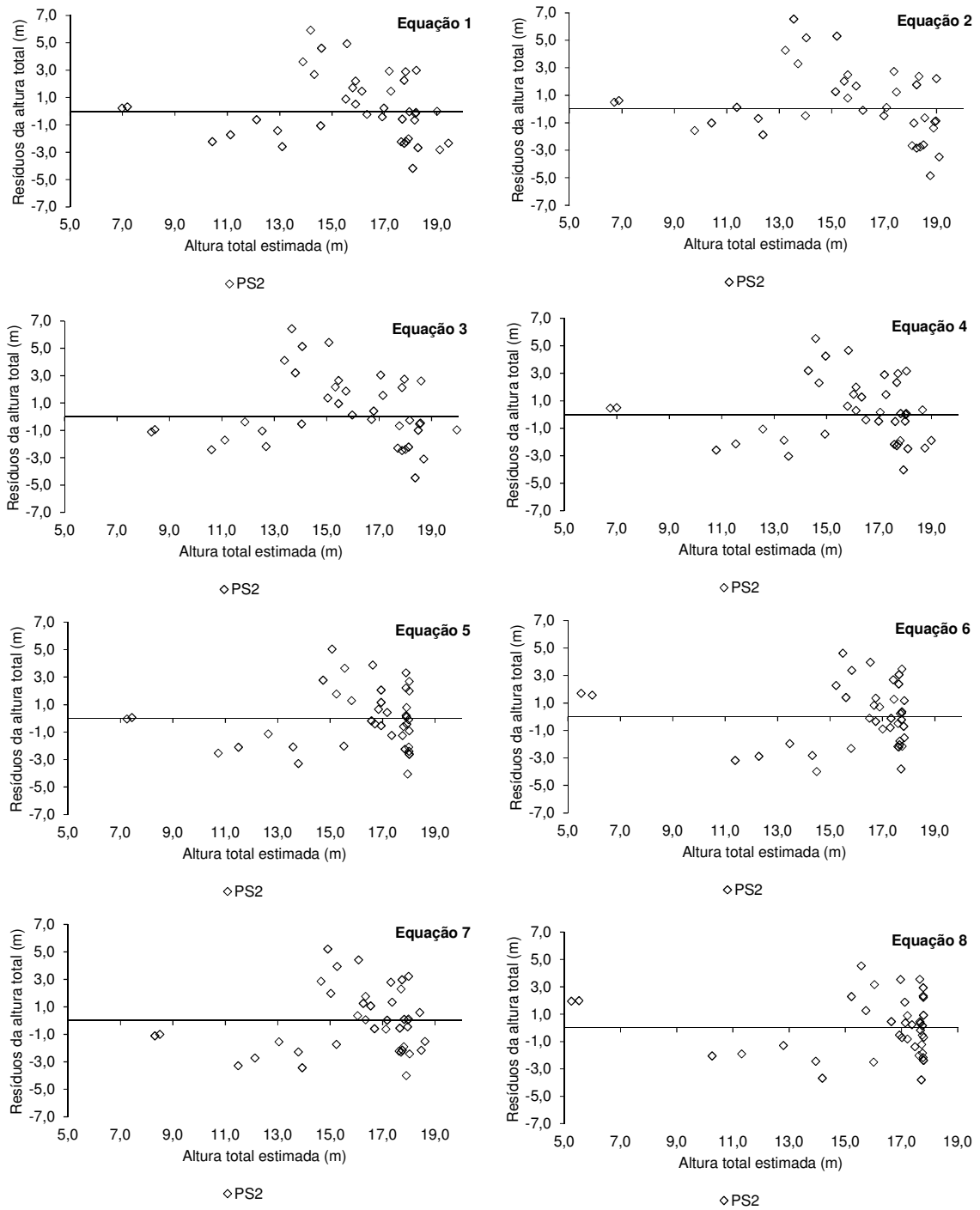


Figura 26 – Gráficos de resíduos dos modelos ajustados para a variável altura total em árvores codominante de *Araucaria angustifolia*.

ANEXO E – Estatísticas das equações lineares ajustadas da relação hipsométrica de *Araucaria angustifolia* para árvores dominadas em Lages, SC.

Eq.	Condicionantes da Regressão								
	Coeficientes			Estatísticas			White's Test	Shapiro-Wilk	Durbin Watson
	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	R <sup>2</sup> aj.	IF	$\chi^2$	Prob. X <sup>2</sup>	Prob.	Prob. < DW
1	0,21547	1,24931	-	0,5179	3,5992	20,0067	0,1059	0,4851	0,0160
2	1,71120	0,63556	-	0,4109	3,6206	20,8853	0,4681	0,2314	0,0058
3	1,48724	0,35671	-	0,4241	3,7274	21,7549	0,1483	0,3665	0,0048
4	3,01314	-8,74258	-	0,4972	3,4828	19,2052	0,1957	0,4471	0,0168
5	-	0,90632	-0,01229	0,9785	3,5125	19,5752	0,4105	0,5370	0,0579
6	-41,74355	30,70300	-4,07086	0,4501	3,3762	17,8529	0,2860	0,4098	0,0221

Em que: Eq.= número da equação;  $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2$  = são coeficientes; R<sup>2</sup>aj.= coeficiente de determinação ajustado; IF= índice de Furnival;  $\chi^2$  = estatística Qui-quadrado; F= valor de F calculado; Prob. X<sup>2</sup> = probabilidade do teste White's; Prob. = probabilidade do teste de Shapiro-Wilk; Prob.<DW = probabilidade do teste de Durbin-Watson.

ANEXO F – Estatísticas das equações não lineares ajustadas da relação hipsométrica de *Araucaria angustifolia* para árvores dominadas em Lages, SC.

Eq.	Condicionantes da Regressão								
	Coeficientes			Estatísticas			White's Test	Shapiro-Wilk	Durbin Watson
	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	R <sup>2</sup> aj.	IF	$\chi^2$	Prob. X <sup>2</sup>	Prob.	Prob. < DW
7	16,96457	0,07903	-	0,4408	3,4325	18,6262	0,4294	0,2390	0,0092
8	-	1,359493	-0,16379	0,4324	3,4582	18,9336	0,5194	0,2119	0,0075

Em que: Eq.= número da equação;  $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2$  = são coeficientes; R<sup>2</sup>aj.= coeficiente de determinação ajustado; IF= índice de Furnival;  $\chi^2$  = estatística Qui-quadrado; F= valor de F calculado; Prob. X<sup>2</sup> = probabilidade do teste White's; Prob. = probabilidade do teste de Shapiro-Wilk; Prob.<DW = probabilidade do teste de Durbin-Watson.



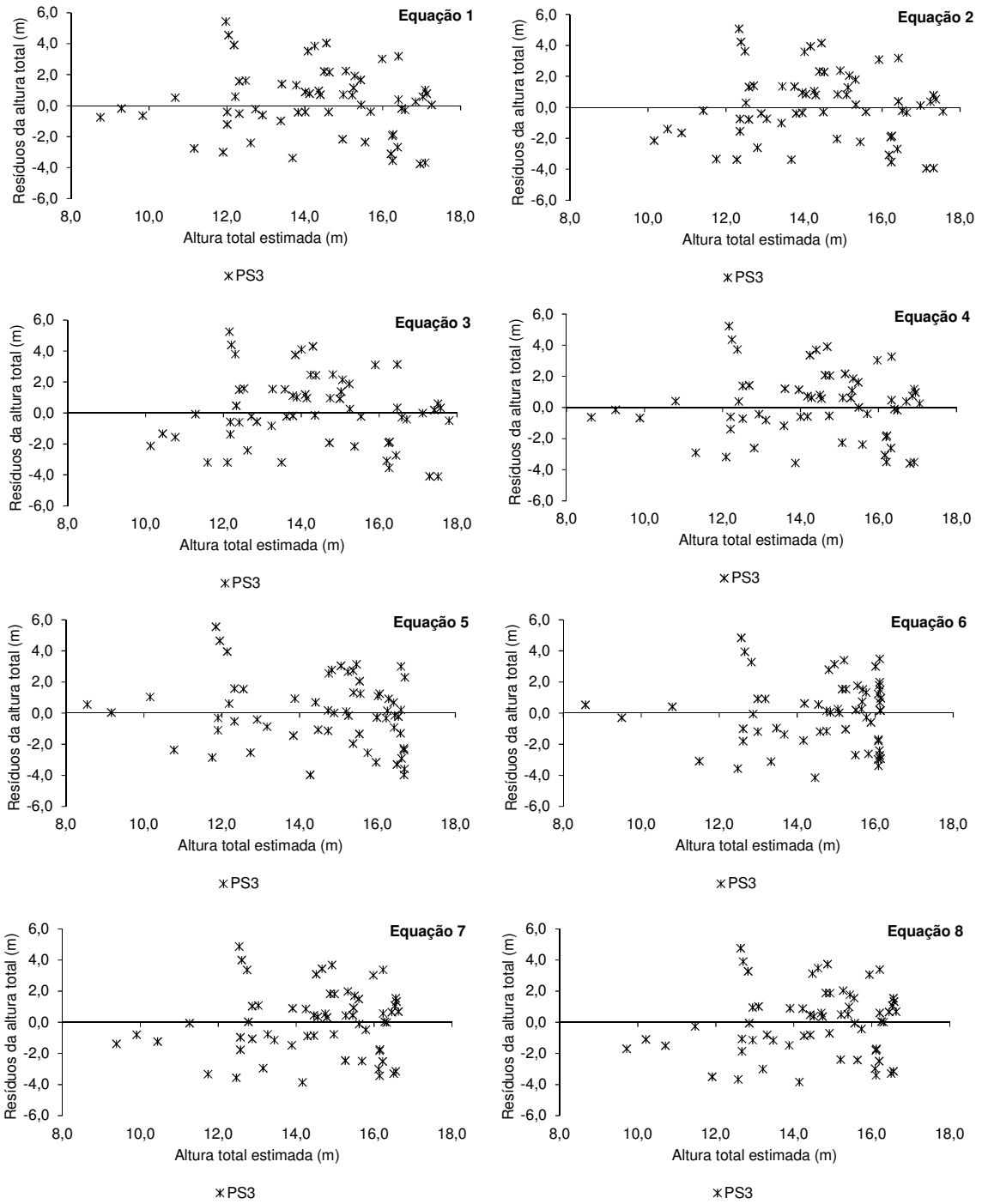


Figura 27 – Gráficos de resíduos dos modelos ajustados para a variável altura total em árvores dominada de *Araucaria angustifolia*.

ANEXO G – Estatísticas das equações lineares ajustadas da relação hipsométrica de *Araucaria angustifolia* desconsiderando posição sociológica em Lages, SC.

Eq.	Condicionantes da Regressão								
	Coeficientes			Estatísticas			White's Test	Shapiro-Wilk	Durbin Watson
	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$R^2_{aj.}$	IF	$\chi^2$	Prob. $X^2$	Prob.	Prob. < DW
1	0,19760	1,72118	-	0,6904	3,8676	87,3975	<0,0001	0,0578	<0,0001
2	1,02521	0,84262	-	0,6481	3,6238	87,3815	<0,0003	0,4832	<0,0001
3	1,20812	0,43857	-	0,6550	3,7881	91,1871	<0,0001	0,2457	<0,0001
4	3,17781	-12,77193	-	0,6633	3,7422	87,6644	<0,0001	0,1186	<0,0001
5	6,02870	0,37482	-0,00234	0,6250	3,6046	87,9736	0,1035	0,6199	<0,0001
6	-6,94067	6,56601	-	0,6350	3,5622	85,2043	0,0527	0,5985	<0,0001

Em que: Eq.= número da equação;  $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2$  = são coeficientes;  $R^2_{aj.}$ = coeficiente de determinação ajustado; IF= índice de Furnival;  $\chi^2$  = estatística Qui-quadrado; F= valor de F calculado; Prob.  $X^2$  = probabilidade do teste White's; Prob. = probabilidade do teste de Shapiro-Wilk; Prob.<DW = probabilidade do teste de Durbin-Watson.

ANEXO H – Estatísticas das equações não lineares ajustadas da relação hipsométrica de *Araucaria angustifolia* desconsiderando posição sociológica em Lages, SC.

Eq.	Condicionantes da Regressão								
	Coeficientes			Estatísticas			White's Test	Shapiro-Wilk	Durbin Watson
	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$R^2_{aj.}$	IF	$\chi^2$	Prob. $X^2$	Prob.	Prob. < DW
7	23,30408	0,026697	0,696311	0,6325	3,5680	85,5943	0,2048	0,6012	<0,0001
8	-	1,165469	-0,10621	0,6347	3,5634	85,2916	0,0913	0,6038	<0,0001

Em que: Eq.= número da equação;  $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2$  = são coeficientes;  $R^2_{aj.}$ = coeficiente de determinação ajustado; IF= índice de Furnival;  $\chi^2$  = estatística Qui-quadrado; F= valor de F calculado; Prob.  $X^2$  = probabilidade do teste White's; Prob. = probabilidade do teste de Shapiro-Wilk; Prob.<DW = probabilidade do teste de Durbin-Watson.

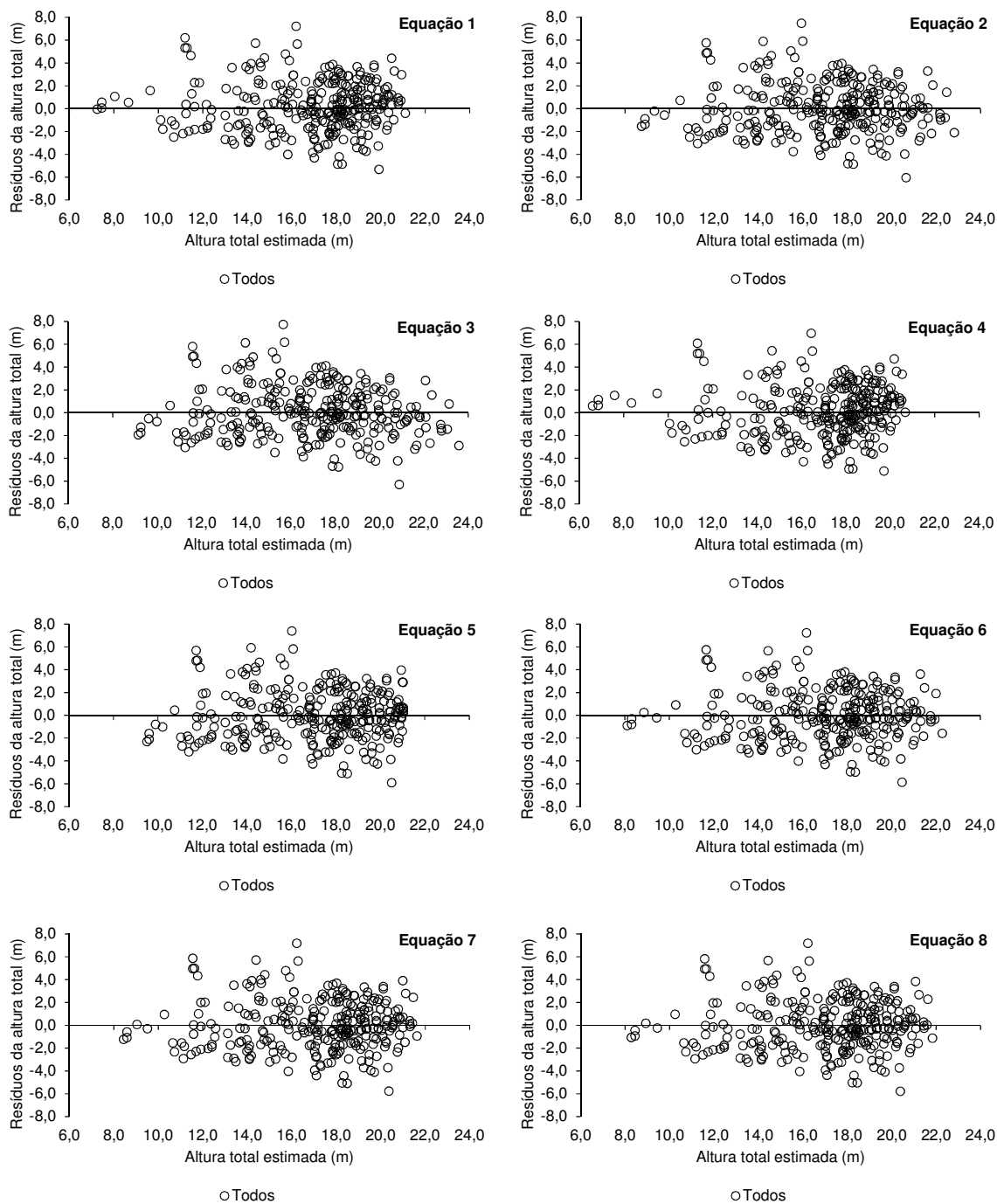


Figura 28 – Gráficos de resíduos dos modelos ajustados para a variável altura total para todo conjunto de dados desconsiderando a posição social em árvores de *Araucaria angustifolia*.

ANEXO I – Estatísticas das equações ajustadas do diâmetro de copa em função do diâmetro a altura do peito de *Araucaria angustifolia* para árvores dominante em Lages, SC.

Eq.	Condicionantes da Regressão							
	Coeficientes		Estatísticas			White's Test	Shapiro-Wilk	Durbin Watson
	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$R^2_{aj.}$	IF	$\chi^2$	Prob. $X^2$	Prob.	Prob. < DW
1	-	0,22846	0,9822	2,5357	41,2901	0,0065	0,9803	0,3267
2	5,51696	0,00217	0,7977	2,6960	45,4977	0,0007	0,7536	0,2725
3	1,32914	0,02107	0,8207	2,5543	45,9319	0,8305	0,6709	0,1569
4	-1,10619	0,90387	0,8326	2,4677	40,5436	0,4450	0,2171	0,0159
5	1,66948	0,03339	0,8310	2,4285	40,1251	0,1558	0,9758	0,2171

Em que: Eq.= número da equação;  $\hat{\beta}_0$ ,  $\hat{\beta}_1$  = são coeficientes;  $R^2_{aj.}$ = coeficiente de determinação ajustado; IF= índice de Furnival;  $\chi^2$  = estatística Qui-quadrado; F= valor de F calculado; Prob.  $X^2$  = probabilidade do teste White's; Prob. = probabilidade do teste de Shapiro-Wilk; Prob.<DW = probabilidade do teste de Durbin-Watson.

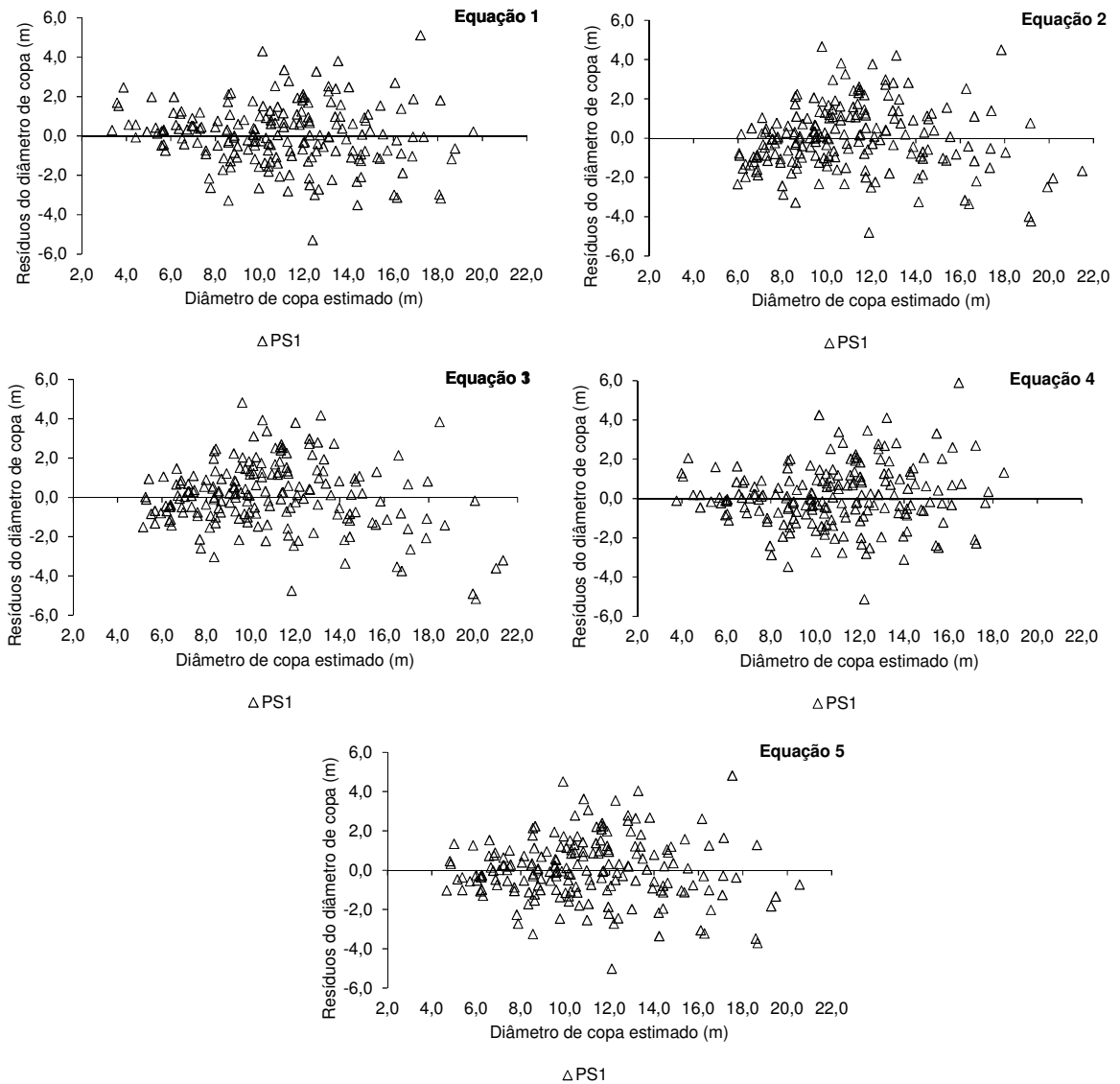


Figura 29 – Gráficos de resíduos dos modelos ajustados para a variável diâmetro de copa em árvores dominante de *Araucaria angustifolia*.

ANEXO J – Estatísticas das equações ajustadas do diâmetro de copa em função do diâmetro a altura do peito de *Araucaria angustifolia* para árvores codominante em Lages, SC.

Eq.	Condicionantes da Regressão							
	Coeficientes		Estatísticas			White's Test	Shapiro-Wilk	Durbin Watson
	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$R^2_{aj.}$	IF	$\chi^2$	Prob. $X^2$	Prob.	Prob. < DW
1	-	0,21964	0,9723	2,2939	10,3642	0,3041	0,0099	0,2530
2	4,10295	0,00272	0,7128	2,3247	9,3812	0,0887	0,1364	0,4788
3	1,05232	0,02685	0,7502	2,2846	9,3543	0,9859	0,0079	0,6596
4	-0,69748	0,77404	0,7505	2,2832	8,9643	0,6441	0,0003	0,3494
5	1,51764	0,03535	0,7516	2,1824	8,6072	0,6111	0,0168	0,5037

Em que: Eq.= número da equação;  $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1$  = são coeficientes;  $R^2_{aj.}$ = coeficiente de determinação ajustado; IF= índice de Furnival;  $\chi^2$  = estatística Qui-quadrado; F= valor de F calculado; Prob.  $X^2$  = probabilidade do teste White's; Prob. = probabilidade do teste de Shapiro-Wilk; Prob.<DW = probabilidade do teste de Durbin-Watson.

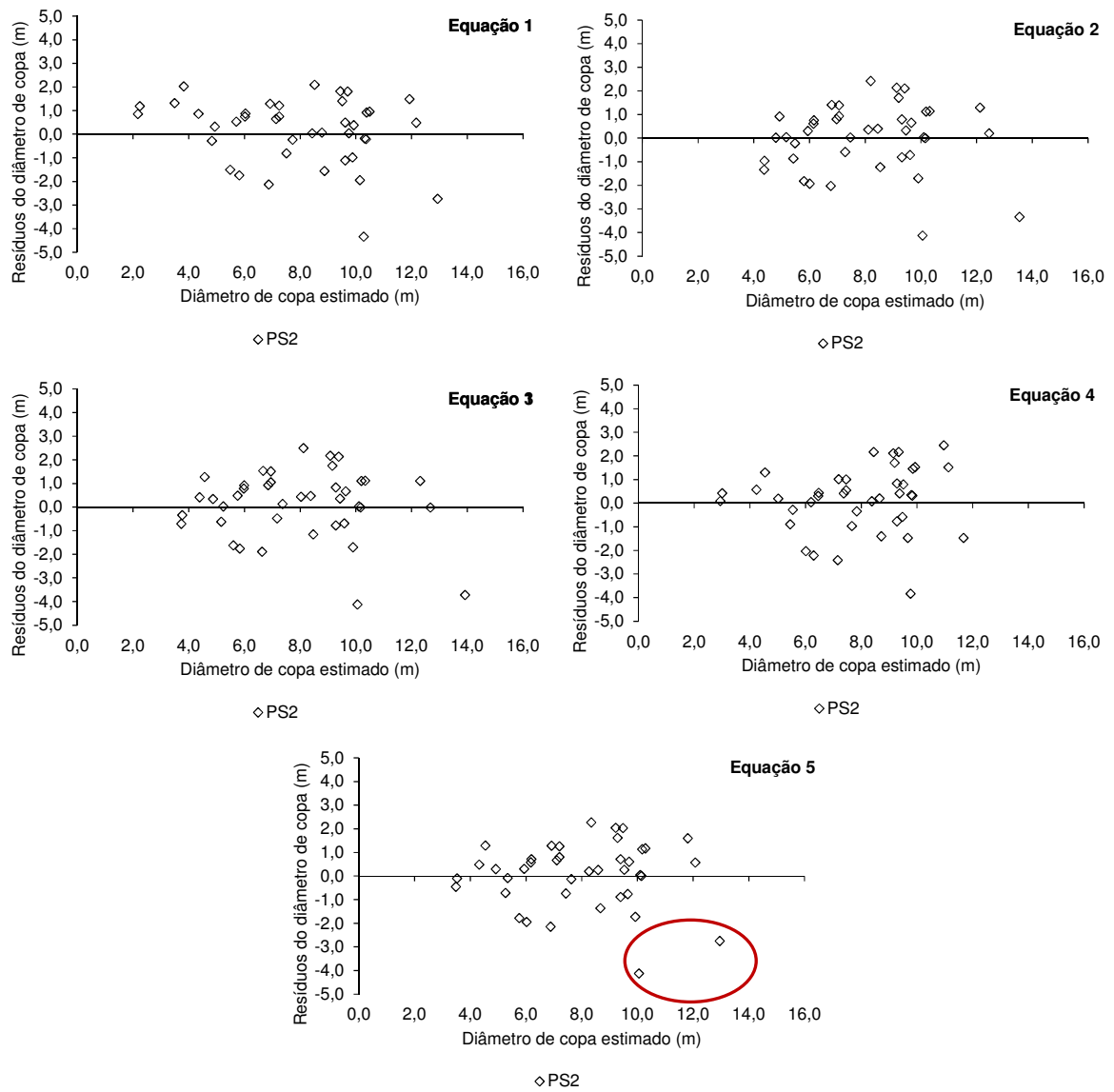


Figura 30 – Gráficos de resíduos dos modelos ajustados para a variável diâmetro de copa em árvores codominante de *Araucaria angustifolia*.

ANEXO K – Estatísticas das equações ajustadas do diâmetro de copa em função do diâmetro a altura do peito de *Araucaria angustifolia* para árvores dominadas em Lages, SC.

Eq.	Condicionantes da Regressão							
	Coeficientes		Estatísticas			White's Test	Shapiro-Wilk	Durbin Watson
	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$R^2_{aj.}$	IF	$\chi^2$	Prob. $X^2$	Prob.	Prob. < DW
<b>1</b>	-	0,2496	0,9619	2,4441	18,9502	0,1770	0,0751	0,1570
2	3,70205	0,00375	0,6863	2,6335	22,6633	0,4304	0,4448	0,2115
3	0,83050	0,03646	0,6184	3,1264	24,3629	0,5631	<0,0001	0,4766
4	-1,41843	1,00328	0,6549	2,9735	19,6335	0,4201	<0,0001	0,2912
<b>5</b>	1,31950	0,04548	0,6988	2,5776	20,5491	0,7720	0,0058	0,2986

Em que: Eq.= número da equação;  $\hat{\beta}_0$ ,  $\hat{\beta}_1$  = são coeficientes;  $R^2_{aj.}$ = coeficiente de determinação ajustado; IF= índice de Furnival;  $\chi^2$  = estatística Qui-quadrado; F= valor de F calculado; Prob.  $X^2$  = probabilidade do teste White's; Prob. = probabilidade do teste de Shapiro-Wilk; Prob.<DW = probabilidade do teste de Durbin-Watson.



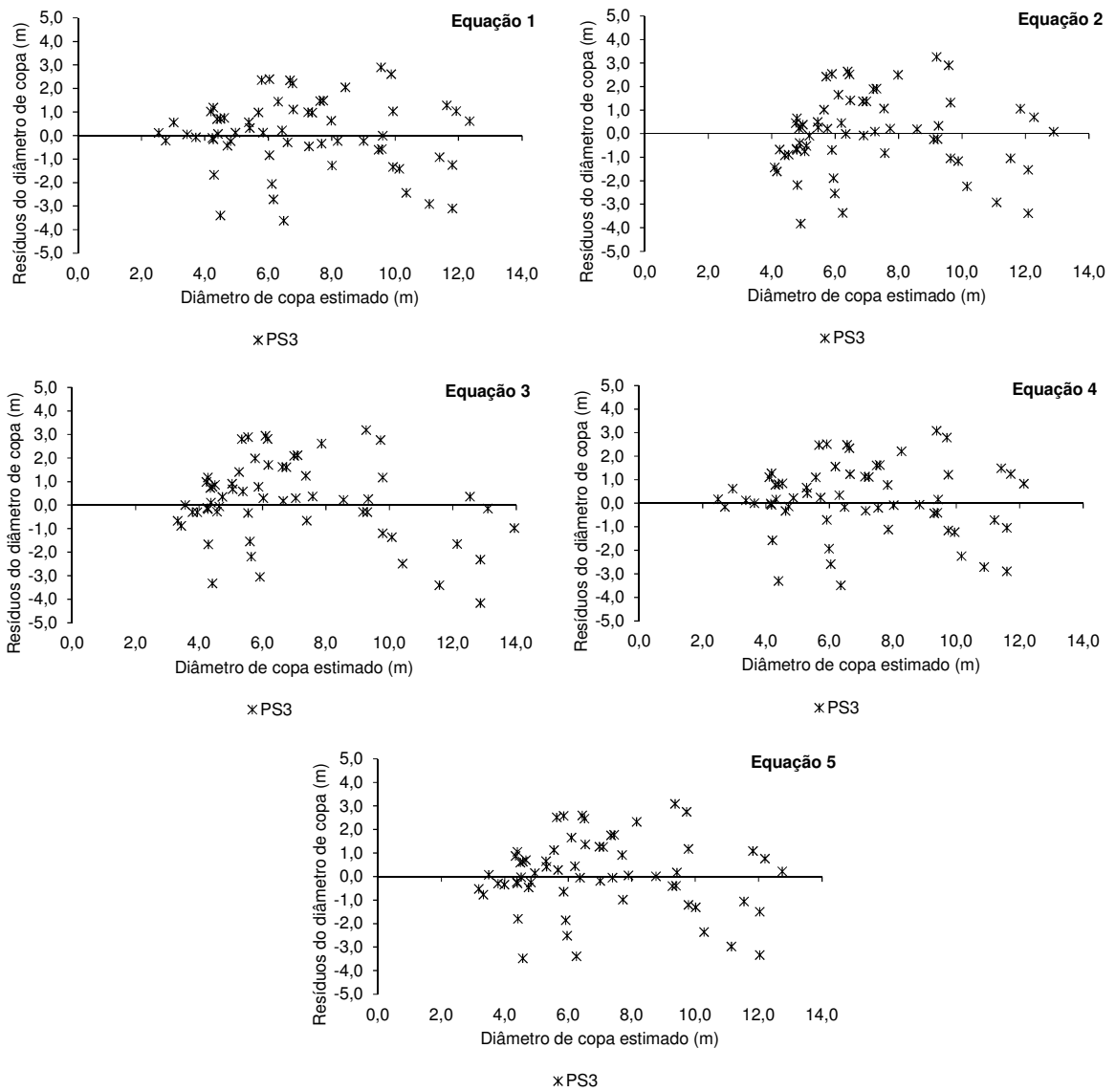


Figura 31 – Gráficos de resíduos dos modelos ajustados para a variável diâmetro de copa em árvores dominada de *Araucaria angustifolia*.

ANEXO L – Estatísticas das equações ajustadas do diâmetro de copa em função do diâmetro a altura do peito de *Araucaria angustifolia* desconsiderando posição sociológica em Lages, SC.

Eq.	Condicionantes da Regressão							
	Coeficientes		Estatísticas			White's Test	Shapiro-Wilk	Durbin Watson
	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$R^2_{aj.}$	IF	$\chi^2$	Prob. $X^2$	Prob.	Prob. < DW
<b>1</b>	0,76243	0,21378	0,8385	2,4972	69,0668	0,0023	0,8713	0,1153
<b>2</b>	5,04067	0,00232	0,8029	2,7586	86,4666	<0,0001	0,4948	0,2473
<b>3</b>	1,19259	0,02377	0,7758	3,0513	89,9349	0,0037	<0,0001	0,4431
<b>4</b>	-1,10957	0,90375	0,8116	2,7972	71,1788	0,0274	<0,0001	0,1006
<b>5</b>	1,59102	0,03495	0,8291	2,5294	73,1087	0,6580	0,0715	0,3369

Em que: Eq.= número da equação;  $\hat{\beta}_0$ ,  $\hat{\beta}_1$  = são coeficientes;  $R^2_{aj.}$ = coeficiente de determinação ajustado; IF= índice de Furnival;  $\chi^2$  = estatística Qui-quadrado; F= valor de F calculado; Prob.  $X^2$  = probabilidade do teste White's; Prob. = probabilidade do teste de Shapiro-Wilk; Prob.<DW = probabilidade do teste de Durbin-Watson.

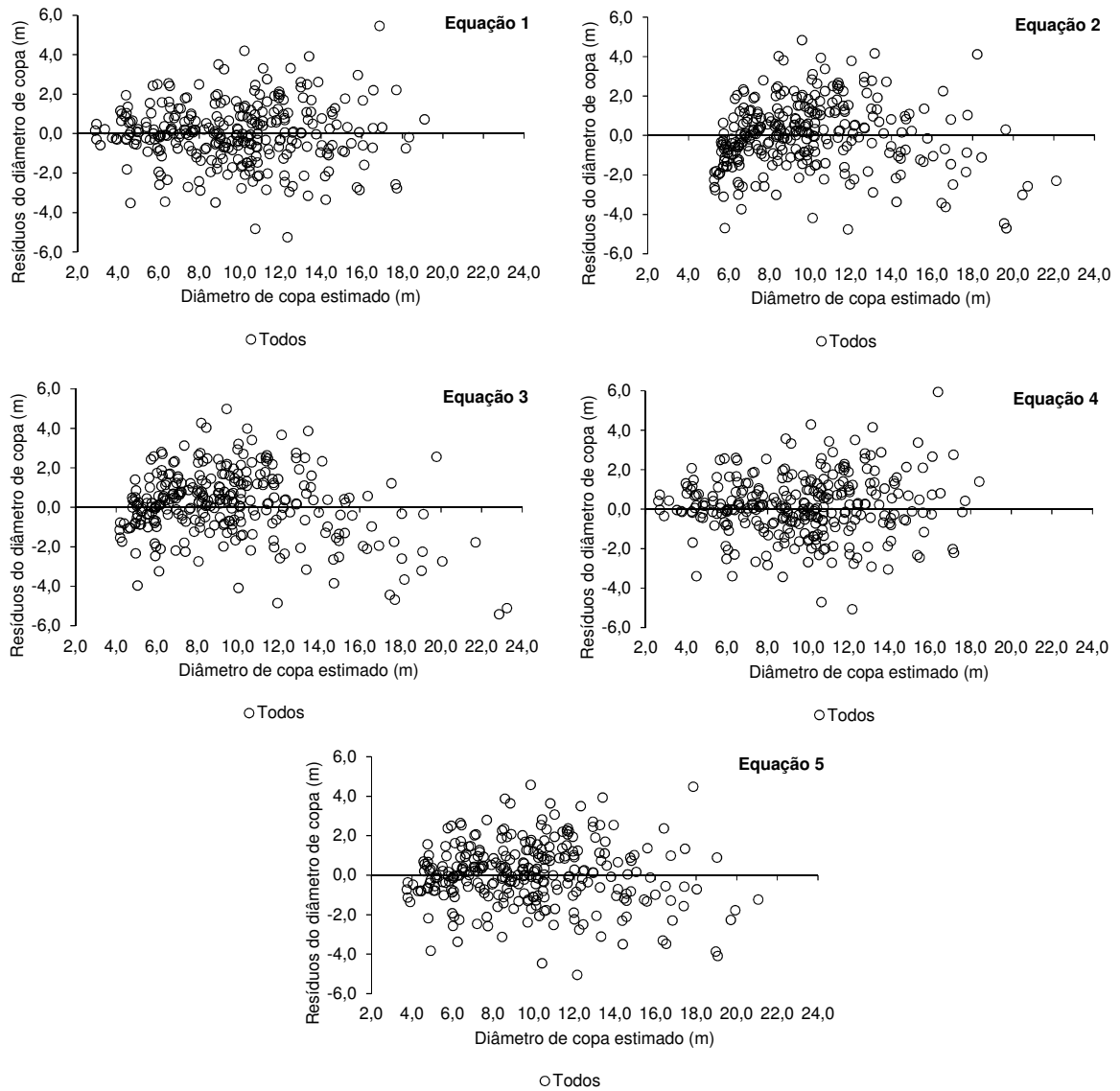


Figura 32 – Gráficos de resíduos dos modelos ajustados para a variável diâmetro de copa para todo conjunto de dados desconsiderando a posição social em árvores de *Araucaria angustifolia*.

ANEXO M – Correlação de Pearson e a probabilidade entre o incremento periódico em área basal relativo LN(IPg%) entre os anos de 2005 e 2010 para as variáveis dendrométricas e morfométricas de *Araucaria angustifolia* em Lages, SC.

$i\bar{j}$	LN(IPg%) (cm <sup>2</sup> )
d (cm)	-0,681 <0,0001
h (m)	-0,631 <0,0001
hf (m)	-0,733 <0,0001
dc8 (m)	-0,617 <0,0001
ACC8 (m <sup>2</sup> )	-0,598 <0,0001
cc (m)	0,3356 <0,0004
Pc	0,6655 <0,0001
Fc	-0,747 <0,0001
Ge	0,4792 <0,0001
IA	0,0831 0,3970
IS	-0,427 <0,0001

Em que: d= diâmetro a altura do peito; h= altura total; hf=altura do fuste; dc8=diâmetro de copa obtido pela medição de oito raios de copa; ACC8= área de copa calculado pela medição de oito raios de copa; cc= comprimento de copa; Pc=proporção de copa; Fc= formal de copa; Ge= grau de esbeltez ou relação h/d; IA= índice de abrangência; IS= índice de saliência.