

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

**LORENA OLIVEIRA BARBOSA**

**EFEITO DA COMPETIÇÃO NO INCREMENTO EM ÁREA TRANSVERSAL DE  
*Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze EM FLORESTA OMBRÓFILA MISTA, NO  
SUL DO BRASIL**

Santa Maria, RS  
2018

**Lorena Oliveira Barbosa**

**EFEITO DA COMPETIÇÃO NO INCREMENTO EM ÁREA TRANSVERSAL DE  
*Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze EM FLORESTA OMBRÓFILA MISTA, NO  
SUL DO BRASIL**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Florestal**.

Orientador: Prof. Dr. César Augusto Guimarães Finger

Santa Maria, RS  
2018

Barbosa, Lorena Oliveira

EFEITO DA COMPETIÇÃO NO INCREMENTO EM ÁREA  
TRANSVERSAL DE *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze  
EM FLORESTA OMBRÓFILA MISTA, NO SUL DO BRASIL / Lorena  
Oliveira Barbosa.- 2018.

91 p.; 30 cm

Orientador: César Augusto Guimarães Finge

Coorientador: Frederico Dimas Fleig

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Santa  
Maria, Centro de Ciências Rurais, Programa de Pós  
Graduação em Engenharia Florestal, RS, 2018

1. Modelagem 2. Crescimento 3. *Araucaria* I. Finger,  
César Augusto Guimarães II. Fleig, Frederico Dimas III.  
Título.

**Lorena Oliveira Barbosa**

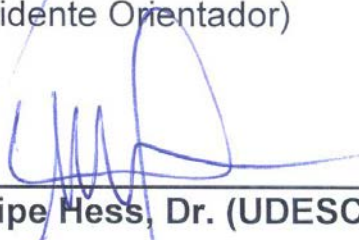
**EFEITO DA COMPETIÇÃO NO INCREMENTO EM ÁREA TRANSVERSAL DE  
*Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze EM FLORESTA OMBRÓFILA MISTA, NO  
SUL DO BRASIL**

Dissertação apresentada ao curso de Pós-graduação em Engenharia Florestal, da Universidade Federal de Santa Maria (UFSM, RS), como requisito parcial para obtenção do título de **Mestre em Engenharia Florestal**.

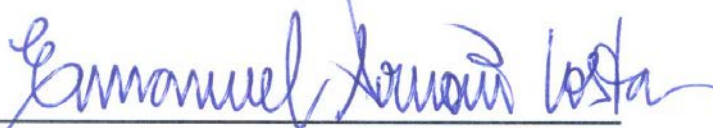
Aprovada em 19 de fevereiro de 2018.



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



**André Felipe Hess, Dr. (UDESC)**



**Emanuel Arnoni Costa, Dr. (UFSM)**

Santa Maria, RS  
2018

## DEDICATÓRIA

*A minha mãe Leide, ao meu pai Roberto (in memoriam), ao meu irmão Rodolfo, aos demais familiares e amigos por serem meu porto seguro durante a trajetória.  
A vocês, dedico.*

*Entregue o seu caminho ao Senhor,  
confie Nele e Ele agirá.  
(Salmos 37:5)*

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus que me deu forças e coragem nos momentos mais difíceis, por me conceder o dom da vida, pela inteligência, sabedoria e fé para o enriquecimento e aptidão da minha aprendizagem.

À minha família, em especial a minha mãe pela paciência, educação, pelo exemplo de mulher guerreira e de alegria, muito importante na minha vida, por me incentivar com seu amor e carinho na caminhada acadêmica.

À CAPES, pela concessão da bolsa e ao Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal da UFSM, pela oportunidade concedida e todo o aporte técnico e infraestrutura disponibilizados.

Ao professor Dr. César Augusto Guimarães Finger pela orientação, oportunidade, pelos estímulos, pela confiança e por todos conhecimentos que me foram a base para a construção deste trabalho.

Ao professor Dr. Frederico Dimas Fleig pela coorientação, pelo auxílio em minhas dúvidas, pelos ensinamentos e aos demais professores do programa.

Ao Dr. Emanuel Arnoni pela disponibilidade, sugestões e todas as contribuições dadas ao trabalho.

À FLONA de São Francisco de Paula – RS pela disponibilidade para coleta dos dados e ao PELD – Projeto Ecológico de Longa Duração – “Conservação e Manejo Sustentável de Ecossistemas Florestais – Bioma Araucária e suas Transições”.

Aos amigos Nayara, Chris, Matheus, Bell e Denise pelo apoio, estímulos, pelas contribuições e amizade.

Aos amigos do Laboratório de Manejo Florestal e do PPGEF Lorena, Karen, Anna, Cyro, Victor, Túlio, Karina, Elke, Carline, Verônica, Dani, Pábulo, Junior, Janderson, Iyanassô, Jairo, Cristine, Fernanda, Fábio, Luciana e Anne pela amizade e momentos compartilhados.

## RESUMO

### EFEITO DA COMPETIÇÃO NO INCREMENTO EM ÁREA TRANSVERSAL DE *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze EM FLORESTA OMBRÓFILA MISTA, NO SUL DO BRASIL

AUTORA: Lorena Oliveira Barbosa  
ORIENTADOR: César Augusto Guimarães Finger

A competição é, por vezes, considerada o fator mais importante na variação das taxas de crescimento de árvores em florestas. Diante disso, objetivou-se descrever a competição assimétrica e o incremento periódico anual em área transversal de árvores de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze em Floresta Ombrófila Mista. Os dados utilizados foram provenientes do projeto PELD – “Conservação e Manejo Sustentável de Ecossistemas Florestais” – FLONA de São Francisco de Paula, RS e da FLONA de Irati, para o último, os dados foram utilizados apenas para comparar a distribuição do incremento periódico anual em área transversal (IPAg) com o índice de Johann. Inicialmente, realizou-se uma análise dos dados e, quando necessário para as correções de medições de diâmetro fora do padrão da série, foi aplicada a média ou a regressão linear a partir dos Mínimos Quadrados Ordinários, Regressão Quantílica e Robusta. Foi realizada uma amostragem das dimensões da copa de *A. angustifolia* crescendo no interior da floresta que forneceu informações sobre a forma da copa em projeção horizontal, vertical, da distância entre pseudo-verticilos, porcentagem de folhas verdes, posição sociológica e dimensão da copa. A seleção de árvores competidoras pelo conceito de Bella e pelo Fator de Área Basal (1 e 4) e os índices competição de Hegyi, BAL e Johann com simulações de soma, média e o máximo valor de “A” para competição intra e interespecífica, respectivamente, entre araucárias, latifoliadas e total. Também foram avaliadas três modificações (MOD) no índice de Johann com a inclusão da altura da árvore competidora. A construção do modelo de IPAg empregou variáveis dendrométricas, o índice de Johann e suas transformações ( $1/x$ ,  $\ln x$ ) pelo procedimento “STEPWISE”. Os modelos lineares generalizados (MLG) foram utilizados, já houve a necessidade de transformação logarítmica na variável IPAg (distribuição NORMAL e função de ligação logarítmica). A fim de melhorar as estimativas do modelo foram selecionadas variáveis de copa pela correlação de Pearson e Kendall, análise de componentes principais e agrupamento. A verificação do ajuste e precisão do modelo foi baseada no coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ), no erro padrão da estimativa ( $S_{xy}$ ), nos critérios AIC e BIC e na distribuição gráfica dos resíduos. Os resultados mostraram que na FLONA-SFP, RS as competições intra e interespecíficas avaliadas juntas possuem maior correlação com as taxas de crescimento de *A. angustifolia* e explicam melhor as variações dos incrementos das árvores. Os índices de competição testados, exceto BAL, e MOD1 e MOD2 apresentam mesma distribuição em função do IPAg, a medida que aumenta a competição diminui o IPAg, mas árvores com mesmo valor de competição apresentaram IPAg baixo e alto. A elaboração do modelo de IPAg com o índice de competição de Johann, não conseguiu descrever a variabilidade encontrada na floresta ( $R^2_{aj}=13,7\%$ ,  $S_{xy}=18,4$ , AIC=1.284,4 e BIC=1.295,6), sendo necessária a inclusão das variáveis explicativas de copa FV, PS e FORMA para melhorar o ajuste e precisão do modelo ( $R^2_{aj}=44,0\%$ ,  $S_{xy}=8,18$ , AIC=336,9 e BIC= 348,8). Foi constatado que dois componentes principais são suficientes para explicar a variação total dos dados (68,2%) e utilizados na separação de dois grupos de árvores, o primeiro com as dominantes e codominantes, e o segundo com as dominadas. Constatou-se que a redução na dimensão das copas era sempre mais severa quanto maior e mais próximo localizava-se o competidor e que esta ocorria tanto lateralmente quanto de baixo para cima. Esse fato explica a heterogeneidade dos incrementos encontrados em árvores de mesmo diâmetro, altura e nível de competição quando descritas pelos índices testados. Assim, o IPAg é melhor estimado quando o modelo de regressão contenha variáveis descritoras da copa.

**Palavras-chave:** Modelagem; Crescimento; Araucária.



## ABSTRACT

### COMPETITION EFFECT ON THE INCREMENT OF BASAL AREA OF *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze IN MIXED OMBROPHILA FOREST, AT THE SOUTH OF BRAZIL

Author: Lorena Oliveira Barbosa  
Advisor: César Augusto Guimarães Finger

The competition is considered the most important factor on growing trees in a forest. Hence, we aim to describe asymmetric competition and annual periodic increment in cross-sectional areas of trees of *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze in a mixed tropical rainforest. Data was from the PELD – “ Conservation and Sustainable management of forest ecosystem”-FLONA of Sao Francisco de Paula, RS and FLONA of Irati. For the last one, data was used just to compare annual periodic increment in cross-section area with Johann index. First, data was analyzed, and when it was necessary to correct outlier diameters, the mean was applied, or the linear regression from the ordinary least squared, quadratic and robust regression. Crown measurements were made, what gave information about horizontal vertical and the distance between pseudo whorls, percentage of green-leaves, sociologic position and crown dimension. Competing tree was made by the concept of Bella and Basal area factor (1 and 4) and Hegyi, BAL and Johann competition index with simulations of sum, average and maximum value of “A” for inter and intra competition, respectively, between araucarias, broadleaves and total. It was made 3 modifications on the Johann index to include height of the competing tree. The building of the model IPAg used dendrometric variables, Johann index and transformations by STEPWISE. Generalized linear model (MLG) was used, and was necessary to use logarithmic transformation on the IPAg variable (NORMAL distribution and logarithmic link function). To improve models estimatives, it was selected crown variables by Pearson and Kendall correlations, principles component analysis, and grouping. The assessment was made by the coefficient of determination ( $R^2_{aj}$ ), standard error ( $S_{xy}$ ), AIC and BIC and on the residual charts. Results showed that on FLONA-SFP, RS the intra and interspecies competition had high correlation with growth of *A. Angustifolia* and explain better increment variations of trees. Competition index tested, except BAL and MOD1 and MOD2 presented same distribution in function of IPAg. As competition increase, IPAg drops. However, trees with same competition value presented IPAg low and height. IPAg model building with the competition Johann did not describe variability found on the forest ( $R^2_{aj}=13,7\%$ ,  $S_{xy}=18,4$ ,  $AIC=1.284,4$  e  $BIC=1.295,6$ ), being necessary to include crown variables (FV, PS and shape, to improve the fit and precision ( $R^2_{aj}=44,0\%$ ,  $S_{xy}=8,18$ ,  $AIC=336,9$  and  $BIC= 348,8$ ). It was concluded that 2 principal components are enough to explain the variation of data (68.2%) and used on the discrimination of two groups of trees, the first with dominant and codominant trees and the second with dominated trees. It was noted that reducing crown dimensions was more severe the bigger and closer was the competitor; and it occur in the sides and up-down direction. This fact explain the heterogeneity of the increments found on trees with same diameter, height and level of competition whe described by the index tested. Thus, IPAg is best when estimated the model of regression have variables to describe crown.

**Keywords:** Modeling; Growth; Araucária.

## LISTA DE FIGURAS

- Figura 1 – Distâncias limitadas pelos valores de “A” 4 e 6 do Índice de Johann em experimento de desbaste em abeto misto da Noruega em 1982 .....28
- Figura 2– Localização da Floresta Nacional (FLONA) de São Francisco de Paula, RS .....33
- Figura 3 – Localização da Floresta Nacional (FLONA) de Irati, PR .....34
- Figura 4 – Esquema das unidades amostrais do projeto do PELD na FLONA de São Francisco de Paula, RS.....35
- Figura 5 – Representação das escalas utilizadas para avaliação da forma da copa (FOR) de *Araucaria angustifolia* na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS .....36
- Figura 6 – Representação das escalas utilizadas para avaliação da forma vertical da copa (FORVERT) de *Araucaria angustifolia* na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS.....37
- Figura 7 – Representação das escalas utilizadas para avaliação da distância entre os pseudo-verticilos (DVERTIC) de *Araucaria angustifolia* na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS.....37
- Figura 8 – Representação das escalas utilizadas para avaliação da distância entre as folhas verdes (FV) de *Araucaria angustifolia* na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS.....38
- Figura 9 – Representação das escalas utilizadas para avaliação da posição sociológica (PS) de *Araucaria angustifolia* na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS.....38
- Figura 10 - Influência da zona de projeção da copa sobre a copa de quatro árvores vizinhas .....41
- Figura 11 – Índice de Johann expresso pela relação h/d, distância máxima entre (DISTMAX) as árvores e a média do valo de “A” total (ICJ.MAT) em diferentes posições sociológicas de *Araucaria angustifolia* na FLONA de São Francisco de Paula, RS .....52
- Figura 12 – Relações das variáveis do Índice de Johann, diâmetro da árvore competidora, relação h/d da árvore objetivo, distância e valor de “A” para *Araucaria angustifolia* na FLONA de São Francisco de Paula, RS .....53
- Figura 13 – Incremento periódico anual em área transversal em função do diâmetro de árvores dominantes (a), codominantes (b), dominadas (c) e para as três posições sociológicas (d) para *Araucaria angustifolia* na FLONA-SFP,RS .....54
- Figura 14 – Incremento periódico anual em área transversal em função do valor médio de “A” Total (ICJ.MAT) de árvores dominantes (a), codominantes (b),

dominadas (c) e para as três posições sociológicas (d) para <i>Araucaria angustifolia</i> na FLONA-SFP, RS .....	56
Figura 15 – Índice de competição de Hegyi (a), BAL (b), distribuição do valor de “A” total (ICJ.MAT) para seleção de árvores competidoras pelo Fator de Área Basal, FAB=1 (c) e FAB=4 (d), em três posições sociológicas de <i>Araucaria angustifolia</i> na FLONA-SFP, RS .....	57
Figura 16 – Modificações propostas no índice de Johann em função do incremento periódico anual em área transversal de <i>Araucaria angustifolia</i> em Floresta Ombrófila Mista da FLONA-SFP, RS .....	59
Figura 17 – Distribuição incremento periódico anual em área transversal (IPAg) em função do valor médio de “A” total (ICJ.MAT) para <i>Araucaria angustifolia</i> na FLONA de Irati, PR.....	60
Figura 18 - Correlação de Pearson do incremento periódico anual em área transversal de <i>Araucaria angustifolia</i> com variáveis dendrométricas e índices de competição na FLONA de São Francisco de Paula, RS .....	62
Figura 19 – Análise de Box-Cox do com o valor do Lambda adequado para descrever o incremento periódico anual em área transversal (IPAg) de <i>Araucaria angustifolia</i> na FLONA de São Francisco de Paula, RS.....	63
Figura 20 – Incremento periódico anual em área transversal observado (IPAg obs.) e estimado (IPAg est.) em função do diâmetro (a) e distribuição dos resíduos em função incremento estimado (b) para <i>Araucaria angustifolia</i> na FLONA-SFP, RS .....	64
Figura 21 - Dispersão do comprimento de copa em função do incremento periódico anual em área transversal (IPAg) (a), do diâmetro (b) e do valor médio de “A” total (ICJ.MAT) (c) para <i>Araucaria angustifolia</i> (Bertol) Kuntze na FLONA de São Francisco de Paula, RS.....	65
Figura 22 – Análise de componentes principais com <i>scree-plot</i> e os valores acumulados e estimados das variações.....	66
Figura 23 – Dendrograma - método de Ward para seleção dos grupos da amostragem de pde <i>Araucaria angustifolia</i> na FLONA de São Francisco de Paula, RS .....	68
Figura 24 – Distribuição dos valores observados (IPAg obs.) e estimados (IPAg est.) do incremento periódico anual em área transversal do Modelo 6 para <i>Araucaria angustifolia</i> na FLONA-SFP, RS .....	72

## LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Critérios para correção dos dados de diâmetro na série temporal de 2000 a 2009 de parcelas permanentes na FLONA de São Francisco de Paula, RS .....	39
Tabela 2 – Critérios estatísticos para seleção do método de regressão .....	40
Tabela 3 – Modificações propostas no índice de Johann para Floresta Ombrófila Mista .....	43
Tabela 4 – Modelos utilizados na modelagem do incremento periódico anual em área transversal de <i>Araucaria angustifolia</i> na FLONA de São Francisco de Paula, RS .....	47
Tabela 5 – Estatísticas de Qui-quadrado ( $X^2$ ), Viés e RMSE para as regressões nos métodos MQO (Mínimos Quadrados Ordinários), RQ (Regressão Quantílica: 0,4; 0,5; 0,6) e RR (Regressão Robusta) e <i>Araucaria angustifolia</i> na FLONA-SFP, RS .....	49
Tabela 6 – Estatísticas descritivas das variáveis dendrométricas e índices de competição de <i>Araucaria angustifolia</i> na FLONA de São Francisco de Paula, RS .....	51
Tabela 7 - Autovalores da matriz de correlação e os autovetores.....	67
Tabela 8 – Tabela com média, mínimo, máximo e desvio padrão das variáveis dendrométricas e porcentagem de distribuição nas variáveis de copa de <i>Araucaria angustifolia</i> para os grupos selecionados no método de agrupamento da amostragem realizada na FLONA de São Francisco de Paula, RS .....	69
Tabela 9 - Análise de correlação de Pearson e Kendall entre o incremento periódico anual em área transversal, variáveis dendrométricas e de copa para <i>Araucaria angustifolia</i> na FLONA de São Francisco de Paula, RS .....	70
Tabela 10 – Parâmetros estimados e estatísticas de precisão dos ajustes dos modelos utilizados para o incremento periódico anual em área transversal de <i>Araucaria angustifolia</i> na FLONA de São Francisco de Paula, RS .....	71

## LISTA DE ABREVIATURAS E SIGLAS

BAL	Basal Area Larger
d	diâmetro a altura 1,3 m do nível do solo
dc	diâmetro de copa
DIM	Dimensão da copa
dist.	Distância
DVERTIC	Distância entre pseudo-verticilos
FAB	Fator de Área Basal
FLONA	Floresta Nacional
FOM	Floresta Ombrófila Mista
FOR	Forma da copa
FORVERT	Forma Vertical da copa
FV	Folhas Verdes
IC <sub>H</sub>	Índice de competição Hegyi
IPAg	Incremento Periódico Anual em área transversal
ICJ.MA	Média de "A" entre <i>Araucaria angustifolia</i>
ICJ.MAF	Média de "A" entre <i>Araucaria angustifolia</i> e folhosas
ICJ.MAT	Média de "A" total de <i>Araucaria angustifolia</i> e folhosas
MOD1	Modificação 1 do Índice de Johann
MOD2	Modificação 2 do Índice de Johann
MOD3	Modificação 3 do Índice de Johann
MQO	Mínimos Quadrados Ordinários
ICJ.MXA	Máximo A entre <i>Araucaria angustifolia</i>
ICJ.MXF	Máximo A entre <i>Araucaria angustifolia</i> e folhosas
ICJ.MXAT	Máximo total de <i>Araucaria angustifolia</i> e folhosas
NF	Número de folhosas competidoras
NA	Número de competidoras entre <i>Araucaria angustifolia</i>
NT	Número total de competidoras <i>Araucaria angustifolia</i> e folhosas
PELD	Projeto Ecológico de Longa Duração
PS	Posição Sociológica
RQ	Regressão Quantílica
RR	Regressão Robusta
ICJ.SA	Soma de "A" entre <i>Araucaria angustifolia</i>
ICJ.SF	Soma de "A" total de <i>Araucaria angustifolia</i> e folhosas
ICJ.SAF	Soma de "A" entre <i>Araucaria angustifolia</i> e folhosas
SFP	São Francisco de Paula

## SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO .....	16
1.2 OBJETIVOS .....	18
1.2.1 Objetivo geral .....	18
1.2.2 Objetivos específicos .....	18
2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA .....	19
2.1. FLORESTA OMBRÓFILA MISTA .....	19
2.1.1 <i>Araucaria angustifolia</i> .....	19
2.1.2 Floresta Nacional .....	21
2.2 FATORES QUE INFLUENCIAM NO CRESCIMENTO .....	21
2.2.4 Competição .....	22
2.3 ÍNDICES DE COMPETIÇÃO .....	24
2.3.1 Índice de Johann .....	26
2.4 PREPARAÇÃO E UTILIZAÇÃO DE REGRESSÃO PARA CORREÇÃO DE DADOS DE MEDIDAS DE CRESCIMENTO .....	28
2.4.1 Mínimos Quadrados Ordinários, Regressão Quantílica e Regressão Robusta .....	29
2.4.2 Modelos Generalizados .....	30
3 MATERIAIS E MÉTODOS .....	32
3.1 ÁREA DE ESTUDO .....	32
3.2 LEVANTAMENTO DE DADOS .....	34
3.2.1 Levantamentos de variáveis qualitativas de copas na FLONA de São Francisco de Paula, RS .....	36
3.3 EXPLORAÇÃO DOS DADOS E CORREÇÕES .....	39
3.4 QUANTIFICAÇÃO DA COMPETIÇÃO .....	40
3.4.1 Critérios de seleção de árvores competidoras .....	40
3.4.2 Índices de Competição Testados .....	42
3.5 MODELAGEM DO INCREMENTO PERIÓDICO ANUAL EM ÁREA TRANSVERSAL DE <i>Araucaria angustifolia</i> NA FLONA DE SÃO FRANCISCO DE PAULA, RS .....	44
3.5.1 Modelagem com variáveis dendrométricas, índices de competição no procedimento “Stepwise” .....	44
3.5.2 Modelagem com variáveis dendrométricas e índices de competição utilizando a abordagem de Modelos Lineares Generalizados (MLG) .....	45

3.5.3 Modelagem com variáveis dendrométricas, índices de competição e variáveis qualitativas de copa utilizando a abordagem de Modelos Lineares Generalizados (MLG) .....	46
3.5.4 Estatísticas para avaliação do modelo .....	47
4 RESULTADOS E DISCUSSÕES .....	49
4.1 EXPLORAÇÃO DOS DADOS E CORREÇÕES .....	49
4.2 DESCRIÇÃO DA COMPETIÇÃO PELO ÍNDICE DE JOHANN .....	50
4.3 INCREMENTO PERIÓDICO ANUAL EM ÁREA TRANSVERSAL E ÍNDICES DE COMPETIÇÃO DE JOHANN, HEGYI, BAL e FAB DE BITTERLICH NA FLONA DE SÃO FRANCISCO DE PAULA, RS .....	53
4.3.1 Modificações na estrutura o índice de Johann na FLONA de São Francisco de Paula, Rs.....	59
4.3.2 Análise das relações de competição expressas com o índice de Johann para dados amostrados na FLONA de Irati, RS .....	60
4.4 MODELAGEM DO INCREMENTO PERIÓDICO ANUAL EM ÁREA TRANSVERSAL DE <i>Araucaria angustifolia</i> NA FLONA DE SÃO FRANCISCO DE PAULA, RS.....	61
4.4.1 Modelagem com variáveis dendrométricas, índices de competição no procedimento “Stepwise” .....	61
4.4.2 Modelagem com variáveis dendrométricas, índices de competição e variáveis qualitativas de copa utilizando a abordagem de Modelos Lineares Generalizados (MLG) na FLONA-SFP, RS .....	65
4.4.2.1 Análise de Componentes Principais e Agrupamentos.....	66
4.4.2.2 Modelagem do incremento com a inclusão de variáveis qualitativas de copa de <i>Araucaria angustifolia</i> na FLONA de São Francisco de Paula, RS .....	70
5 CONCLUSÕES .....	74
REFERÊNCIAS .....	75
APÊNDICE A – DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DE ÁRVORES EM CLASSES DE QUI-QUADRADO VIES E Syx.....	86
APÊNDICE B – DESCRIÇÃO DOS ESTIMADORES DE REGRESSÃO DO MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS ORDINÁRIOS, REGRESSÃO QUANTÍLICA E REGRESSÃO ROBUSTA. ....	87
APÊNDICE C – COPA DE <i>Araucaria angustifolia</i> COM DISTÂNCIA IRREGULAR DOS PSEUDO VERTICÍLOS E COPA EM FORMA DE UMBELA NA FLONA DE SÃO FRANCISCO DE PAULA, RS.....	90
APÊNDICE D – ALGUNS GRAMAS UTILIZADOS .....	91

## 1 INTRODUÇÃO

Nas florestas naturais ou em povoamentos, o crescimento das árvores está atrelado às condições ambientais a que estão submetidas, tais como competição, luminosidade, sítio e clima. Conhecer essas interações é importante para a interpretação do desenvolvimento da árvore ao longo do tempo e para as decisões sobre o manejo florestal.

O crescimento da Floresta Ombrófila Mista - FOM, além dos fatores citados, está associado à estrutura do dossel, à formação de clareiras e à composição de espécies nos estratos verticais. A FOM foi intensamente explorada, desde a segunda metade do século XIX, principalmente pela presença da *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze, matéria-prima que abastecia as indústrias madeireiras do planalto sul brasileiro.

Diante da ameaça à extinção da espécie, em 2001, uma resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente (CONAMA) suspendeu o corte e a exploração da espécie (FIGUEIREDO FILHO et al., 2010). Porém, a experiência tem demonstrado que aumentar o rigor da lei revela inconsistência ou ineficácia para a conservação da espécie, ocasionando a desvalorização e a perda do interesse em sua manutenção na paisagem.

Atualmente, as práticas de manejo autorizadas, cortes seletivos de baixa magnitude em trechos pequenos de floresta não favorecem a regeneração natural da *A. angustifolia* e deixam a floresta com alta densidade, ou seja, com alta competição. Certamente, é necessário o manejo adequado dessas florestas a fim de garantir a biodiversidade, a sustentabilidade e o ganho econômico na exploração.

A competição é um fator biológico importante no manejo florestal, já que está relacionada ao espaço para o desenvolvimento da árvore. A sua quantificação é por meio de índices, que associam as variáveis dendrométricas e/ou espaciais da árvore com as árvores consideradas no método de seleção.

A variável diâmetro e a área transversal sofrem grande influência da densidade em qualquer estrato da floresta, portanto o seu estudo é necessário para prever as taxas crescimento e a produção de florestas manejadas ou não, além de ajudar na confiabilidade do plano de manejo. Mas na modelagem, utilizar o incremento em área transversal é mais adequado que o diâmetro, já que o incremento em área transversal



supostamente seria mais correlacionado com o crescimento em volume (VANCLAY, 1994).

A grande variabilidade e dinâmica das florestas mistas e inequiduais fazem com que na modelagem seja necessário considerar os atributos individuais de cada árvore, além das características médias da população, chamados assim de modelos de árvore individual. São modelos mais complexos que permitem o controle por árvore e melhor acurácia na predição.

A copa é um atributo responsável pela assimilação de luz solar no processo de fotossíntese, uma vez, submetida à competição pela ocupação do dossel, pode sofrer alterações em sua dimensão, forma, superfície e vitalidade.

A regulação da densidade por meio de cortes de liberação aumenta o espaço entre árvores, permitindo o crescimento da copa e, por consequência, o aumento do incremento diamétrico. Contudo, é necessário especificar as características e o número de árvores que serão retiradas, bem como o ciclo de corte que permita a sustentabilidade da produção e a manutenção da diversidade genética da população.

Neste sentido, a competição expressa por índices numéricos e a sua influência sobre o crescimento de *Araucaria angustifolia* permitem analisar a concorrência e desenvolver modelos para estimar o incremento periódico anual em área transversal, como forma de fornecer subsídios ao manejo de florestas naturais.

## 1.2 OBJETIVOS

### 1.2.1 Objetivo geral

Descrever a competição assimétrica e o incremento periódico anual em área transversal de árvores de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze em Floresta Ombrófila Mista.

### 1.2.2 Objetivos específicos

- Caracterizar a competição intraespecífica e interespecífica;
- Avaliar a competição entre as árvores com intuito de determinar uma distância limite para estabelecer uma intensidade de desbaste seletivo;
- Identificar variáveis descritoras da competição que relacionam-se com o incremento periódico anual em área transversal;
- Modelar o incremento periódico anual em área transversal.

## 2 REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

### 2.1. FLORESTA OMBRÓFILA MISTA

A Floresta Ombrófila Mista - FOM, também conhecida como Florestas de Araucária ou pinheiral, está inserida no domínio do bioma Mata Atlântica, Lei 11.428/2006, ocorrendo nos estados do Paraná (40% de sua superfície), Santa Catarina (31%) e Rio Grande do Sul (25%) e em manchas esparsas no sul de São Paulo (3%), inter-nando-se até o sul de Minas Gerais e Rio de Janeiro (1%) (BRASIL, 2006; CARVALHO, 2003).

A composição florística deste tipo de vegetação é dominada por gêneros primitivos como *Araucaria* e *Drymis* (australásicos) e *Podocarpus* (afro-asiático) (IBGE, 2012). Essa formação florestal apresenta estrutura bastante variável podendo ser uni ou multiestratificada e variar de coetânea a multietânea, apresentando agrupamentos densos e abundância da família Lauraceae ou agrupamentos pouco desenvolvidos com predominância de *Podocarpus*, *Drymis* e família Aquifoliceae (LEITE, KLEIN, 1990).

A denominação Floresta de Araucária está associada a dominância das *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze em relação às angiospermas. Segundo Souza (2007) essa dominância pode ser indício da ocorrência de Modelo de Lozenge ou estrutura *cohort* (EBLING; PÉLLICO NETO, 2015), onde as gimnospermas (*A. angustifolia*) iniciaram o processo de sucessão florestal e as angiospermas (folhosas) se estabeleceram em um estrato inferior impedindo a regeneração das coníferas, sendo que, no futuro, tenderiam a sucumbir após a morte das espécies emergentes do estrato inferior.

A formação de *cohort* é favorecida em espécies com ciclo de vida longo, como as *A. angustifolia*, aumentando as probabilidades de ocorrência de distúrbios como incêndios florestais, severas condições climáticas, tempestades, entre outros, que proporcionam o autodesbaste (OGDEN; STEWART, 1995). Esses eventos contribuem para o aumento da incidência solar no interior da floresta favorecendo a regeneração natural.

#### 2.1.1 *Araucaria angustifolia*

*Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze é uma espécie conhecida popularmente como pinheiro-brasileiro ou pinheiro-do-paraná que pertence à família Araucariaceae, com altura atingindo de 20 a 50 m e diâmetro variando de 90 a 180 cm (LORENZI, 2009). Sua maior área de distribuição geográfica está associada aos locais de elevada altitude e com baixas temperaturas médias anuais, ocorrendo, de forma associada aos campos naturais, predominantemente na região do planalto meridional (HIGUCHI et al., 2012).

A espécie é dioica, mas podem ser encontradas plantas monoicas devido a traumas ou doenças, com estruturas reprodutoras em estróbilos masculinos e femininos (CARVALHO, 2003). A árvore é perenifólia, heliófila pioneira com folhas simples, alternas, espiraladas, lineares a lanceoladas, coriáceas, com até 6 cm de comprimento por 10 mm de largura (CARVALHO, 2002).

Geralmente a *A. angustifolia* é encontrada em agrupamentos quase homogêneos, dominando completamente o dossel, com diferentes formas de copas ao longo do crescimento. Árvores adultas possuem copa com forma de candelabro ou umbela, já as de fase jovem, formato cônico (LORENZI, 2008; REITZ et al., 1978). O crescimento inicial é lento, mas em sítios apropriados o incremento anual em altura é de 1 m e, em diâmetro de 1,5 a 2,0 cm, a partir do quinto ano (CARVALHO, 2003).

Um produto de destaque dessa espécie é a madeira de alta qualidade, com ampla aplicabilidade, cor clara e cerne indistinto do alburno, leve e com coeficiente de retratilidade médio de 52% (SANQUETTA et al., 2002; PAULA; ALVES, 2007). A madeira pode ser utilizada nas construções em geral, em caixotaria, móveis laminados entre outros. Outro produto dessa conífera é o pinhão sendo o primeiro da Região Sul do país a fazer parte da PGPM-Bio - Política de Garantia do Preço Mínimo para a Sociobiodiversidade (CONAB, 2014).

A espécie possui baixa capacidade de regeneração natural principalmente quanto ao número de regenerantes, sendo a fase crítica do desenvolvimento até 50 m de altura, mas considerando a dinâmica da regeneração ao longo dos anos o estoque pode ser suficiente para manter a estrutura demográfica da espécie (PALUDO et al., 2011; SILVA et al. 2010). Devido a característica ecológica de pioneira de vida longa, o seu acesso ao dossel superior ocorre com a formação de alguma clareira na floresta, distúrbio natural ou intervenção antrópica (LONGHI, 2016).

A exploração da madeira do pinheiro, a expansão das cidades, agricultura e monocultivos de *Pinus* sp. combinados com os poucos estudos sobre o manejo da

espécie e a legislação restritiva contribuem com a redução e estagnação dos remanescentes destas florestas (HESS et al., 2010). Segundo Orellana (2014) em áreas que sofreram interferência de cortes ou distúrbios naturais, taxas de regeneração são mais evidentes, sugerindo que o corte seletivo possibilita a regeneração natural dessa espécie, pelo aumento da incidência de luz.

De acordo com Mello et al. (2003) estudos técnicos e científicos são necessários para que as Florestas de Araucária sejam exploradas de maneira sustentável mantendo a biodiversidade, com definição de ciclo de corte, número de árvores que evoluem ao longo do tempo através da distribuição do diâmetro, sendo esses importantes pontos a serem considerados para implantação de plano de manejo.

### **2.1.2 Floresta Nacional**

A Lei Nº 3.782, de 22 de julho de 1960, incluiu o Instituto Nacional do Pinho (INP) na jurisdição do Ministério da Indústria e Comércio e posteriormente, em 1967 foi extinto, passando suas reservas para o Instituto Brasileiro de Desenvolvimento Florestal (IBDF). Um processo de reflorestamento com *A. angustifolia* em diferentes áreas foi realizado pelo IBDF, que pela Portaria IBDF N.º 561, de 25 de outubro de 1968, adequou a denominação das áreas dos Parques Florestais do INP denominando por Florestas Nacionais (FLONA).

De acordo com o Art. 17 da Lei nº. 9.985, de 18 de julho de 2000 (SNUC, 2000) as FLONAs são áreas de domínio público, providas de cobertura nativa ou plantada e tem como objetivo permitir o uso múltiplo sustentável dos recursos florestais renováveis e a pesquisa científica, com ênfase em métodos para exploração sustentável de florestas nativas. Em contrapartida, o custo de administração, monitoramento e fiscalização dessas florestas é reduzido.

## **2.2 FATORES QUE INFLUENCIAM NO CRESCIMENTO**

O crescimento, de acordo com Prodan et al. (1997) é o aumento em dimensão de uma ou mais árvores na floresta em um determinado período de tempo, o qual é influenciado pelas características do ambiente. Tais influências se devem aos fatores genéticos da espécie, climáticos, edáficos e competição com outros vegetais e animais (FINGER, 1992).

O crescimento diamétrico da *Araucaria angustifolia*, como de outras espécies vegetais, depende de diversos fatores. No entanto, o clima e as condições do sítio, além da idade e posição sociológica, se sobressaem como mais influentes no desenvolvimento da espécie (MACHADO et al., 2014; MARTINKOSKI et al., 2015). O fator climático pode afetar as características estruturais da árvore, como estruturas dos anéis de crescimento, e os processos fisiológicos de desenvolvimento da planta (LAUW, 2011). Entre os fatores climáticos a precipitação e temperatura se destacam, como observado por Stepka et al. 2012), que verificou correlação significativa entre a precipitação e o incremento de *A. angustifolia* em floresta madura localizada em São Francisco de Paula-RS. Em estudo Zanon e Finger (2010) descrevem o comportamento positivo da temperatura e da precipitação no incremento e a ocorrência de precipitação acompanhada de temperaturas baixas reduz o crescimento em diâmetro.

Outro fator importante para o crescimento das árvores é a qualidade do sítio florestal ou capacidade produtiva, considerada como o potencial produtivo da terra ou de madeira, geralmente obtida através de medições que integram influências biológicas e ambientais (CAMPOS, LEITE, 2009; SCOLFORO, 1997). De acordo com Skovsgaard e Vanclay, (2008), a produtividade do sítio depende tanto dos fatores naturais inerentes ao sítio quanto dos fatores relacionados à gestão. Nos sítios com alta capacidade produtiva, o crescimento é mais concentrado na parte da copa, enquanto nos sítios menos produtivos, o crescimento tende a ser uniformemente distribuído no tronco (FIGUEIREDO FILHO et al., 2014).

A profundidade dos solos é um dos fatores mais importantes para o bom desenvolvimento da *A. angustifolia*, pois a espécie apresenta raiz pivotante e baixa adaptabilidade a solos rasos (VLIET, 1958). A geologia, geomorfologia e topografia também podem contribuir para a diferença de incremento entre árvores de áreas diferentes (OLIVEIRA et al., 2017).

As maiores árvores dessa espécie ocorrerem em locais com solos bem drenados, com baixa densidade, menor competição entre árvores e maior taxa de radiação incidente. Esse fato, de acordo com Oliveira et al. (2016) comprova que as árvores se distribuem e desenvolvem conforme os fatores edáficos do local.

#### **2.2.4 Competição**

O crescimento de árvores em uma floresta é influenciado, entre outros fatores, pela competição por luz. Segundo Silva et al. (2003) as árvores que atingiram as posições superiores no dossel apresentam os maiores diâmetros e maiores taxas de incremento, em um período analisado.

No contexto ecológico a competição influencia a composição de espécies nas florestas com papel importante na evolução e especiação. Dentro do povoamento é conhecida por afetar a produtividade florestal, onde os preceitos sobre espaçamento e época do desbaste são vistos como resposta aos efeitos da concorrência entre as árvores (SABATIA; BURKHART, 2012; SILVA et al., 2012).

A distribuição espacial uniforme da floresta ajuda na maximização da utilização do espaço pelas raízes e copas, resultando em menor competição entre árvores (SCHNEIDER; SCHNEIDER, 2008). Segundo Durlo (2001) a diferenciação de classes sociológicas se inicia com o aumento da concorrência entre as árvores, devido ao fechamento do dossel onde algumas árvores se destacam com maior crescimento.

Algumas variáveis da copa são estudadas com o objetivo de inferir sobre o crescimento das árvores, fazendo-se relações com o diâmetro, altura, área transversal, entre outros aspectos biológicos do desenvolvimento. O diâmetro de copa é uma variável básica para a dedução de outras características das árvores e corresponde à distância entre as linhas de projeção dos pontos mais externos da copa (DURLO; DENARDI, 1998).

O tamanho e a área de projeção de copa correlacionam-se com o espaço ocupado e as funções fisiológicas realizadas por uma árvore. Quando associados a dados do incremento, essas características da copa permitem obter a produção da espécie estudada (MITSCHERLICH, 1978; PRETZSCH et al., 2015).

Segundo Ricken (2014) ao se verificar árvores sob competição a tendência é existir maior crescimento em altura e menor incremento em diâmetro a medida que aumenta o grau de competição. Cunha (2009) descreveu esta relação demonstrando a correlação negativa entre índices de competição e incremento periódico anual em área transversal para *Cedrela odorata* L., *Amburana cearenses* A. C. Smith, *Copaifera paupera* (Herzog) Dwyer e *Swietenia macrophylla* King na Floresta Amazônica.

Quando a concorrência é alta, a relação entre altura e diâmetro ( $h/d$ ) é maior que com concorrência moderada. O maior incremento anual em altura é verificado na fase jovem, diminuindo na adulta, além disso, a variável diâmetro é bastante afetada pela concorrência em qualquer estrato (SCOLFORO, 2005).

Na modelagem do crescimento, é aceito que condições ótimas de crescimento são experimentadas pelas árvores que não foram influenciadas pela competição das vizinhas. Dessa maneira, árvores livres de concorrência (solitárias) apresentam o incremento máximo e têm sido usadas na em modelos de crescimento e competição (HASENAUER, 1997).

Finger (2010), em notas da disciplina de crescimento e produção florestal, declara que árvores isoladas crescem segundo seu potencial genético e a capacidade de suporte do sítio, atingindo a máxima dimensão de todos seus componentes aéreos e de raízes. Estas dimensões são indispensáveis na descrição e caracterização do crescimento servindo como parâmetros nos estudos de crescimento e produção.

Dessa forma, a morfometria das plantas pode sofrer mudanças ao longo do crescimento, sob a influência de fatores como espaçamento de plantio, condições edafoclimáticas, competição entre copas e tratamentos silviculturais (desbaste, desrama, etc. (CONDÉ et al., 2013).

### 2.3 ÍNDICES DE COMPETIÇÃO

Índices de competição utilizam como suporte as características das árvores, são propostos e utilizados para inferir sobre o nível de concorrência sofrida pelas árvores que se destacam com maior incremento dentro da floresta. De acordo com Vanclay (2006) um índice de competição permite quantificar em equações simples, o efeito de plantas vizinhas sobre o crescimento de uma árvore.

Estes índices são comumente utilizados como variáveis em modelos que preveem o crescimento de árvores e avaliados como estimativa do crescimento da árvore através de correlações com alguma característica de crescimento da árvore, como diâmetro, área transversal e incremento (RADTKE et al., 2003). Dessa forma, os índices de competição são componentes importantes dos modelos de crescimento e produção florestal e também ajudam a orientar as decisões no manejo silvicultural. Quando um índice de competição é usado para descrever o status social de uma árvore e quantificar o ambiente circundante, ele é rotulado como competição unilateral (WEISKITTEL et al., 2011).

Os índices são descritos na literatura em três classes. A primeira classe é independente da distância, se caracteriza por utilizar apenas informações sobre o ta-



manho da árvore, relacionados com um fator de densidade do povoamento. Já a segunda agrupa os índices dependentes da distância e incorpora a localização relativa de árvores vizinhas (LEDERMANN, 2010). O índice semi-independente da distância compõe a terceira classe, foi proposto por Stage e Ledermann (2008) e desenvolvido para parcelas circulares, em que é possível utilizar o fator de área basal da amostragem por Bitterlich restritos a um conjunto de árvores vizinhas, ao invés de todas da unidade amostral.

Em alguns casos os índices dependentes da distância levam em consideração a evolução da copa, mas de acordo com Prodan et al, 1997 as copas precisam ser estudadas quando não existe competição para analisar as interações com o restante do povoamento.

As pesquisas e o desenvolvimento de índices de competição têm sido aplicadas, sobretudo, na prognose do crescimento em plantios florestais ou grupos de espécies em florestas naturais (SCHNEIDER; SCHNEIDER, 2008). Correlações fortes entre vários índices de concorrência e crescimento das árvores foram encontradas, sendo que diversos índices dependentes da distância foram mais fortemente correlacionados com o crescimento do que os independentes, com 64%, 56% respectivamente (CONTRERAS, 2011).

Algumas variáveis utilizadas nos índices independentes da distância são área transversal do povoamento ou área transversal de árvores maiores do que a árvore objetivo (BAL -Basal Area if Larger), bem como proporção copa. Índices dependente da distância podem ser calculados de várias maneiras, como o índice de tamanho de relação de Hegyi (1974) e suas modificações, os índices de densidade de pontos (Spurr, 1962), e a sobreposição de áreas de crescimento circulares (BELLA, 1971). Informações dendrométricas como diâmetro do tronco, a altura, a proporção de copa e/ou o diâmetro da copa, além, das coordenadas que especificam a localização da árvore dentro da área também são necessárias para o cálculo (BIGING; DOBBERTIN, 1995; WEISKITTEL et al., 2011).

Nos índices que levam em consideração a evolução da copa são incluídos a área de copa (TABOADA et al., 2003) e a influência da área de sobreposição de copa (BELLA, 1971). No índice de Bella a zona de influência é a área de projeção horizontal da copa de uma árvore solitária com igual diâmetro, determinando a área de sobreposição das zonas de influência das árvores centrais sobre cada uma das árvores vizinhas.

No desenvolvimento dos índices com influência de área de copa, as variáveis independentes raio de copa de árvores isoladas, são obtidas por análise de regressão em função do diâmetro à altura do peito (d). Afinal, os índices admitem como um mensurador da competição o somatório da sobreposição entre a copa da árvore objetivo e das suas vizinhas, utilizando-se a sobreposição potencial da copa ao invés de uma sobreposição real (VANCLAY, 1994; WIMBERLY; BARE, 1996).

As variáveis dos índices de competição relacionadas com o diâmetro de copa refletem o efeito da competição ocorrida no passado. As dimensões apresentadas pelas copas no momento atual foram moldadas pela competição à qual a árvore foi submetida no passado, ocasionando mudanças nas dimensões das árvores e, portanto, variações na captação de recursos para o crescimento (CLARK; CLARK, 2001).

Atributos da copa permitem auxiliar o manejador a averiguar o potencial da árvore de permanecer até o final da rotação (árvore futuro) (ALBETZ; OHNEMUS, 1994), sendo as relações morfométricas importantes para descrever a competição existente em povoamentos florestais, sustentando futuras decisões sobre desbaste (PADOIN; FINGER, 2010). O conhecimento da relação entre diâmetro da copa (dc) e o d permite o cálculo do número de árvores por hectare, para um diâmetro ou distribuição de diâmetros desejada (TONINI; ARCO-VERDE, 2005).

### **2.3.1 Índice de Johann**

Expressar os parâmetros de concorrência pelos atributos da copa é caro, incerto e de difícil operacionalidade, como na medição da altura base da copa, área de cobertura e diâmetro da copa. Johann (1982) propôs como alternativa uma modificação do índice de competição de Hegyi (1974) no estudo de um experimento de desbaste em abeto misto na Noruega pela Associação Alemã de Estações de Pesquisa Florestal.

O índice proposto por Johann era expresso na relação entre o diâmetro à altura do peito da árvore vizinha e o da árvore objetivo, multiplicado pela razão entre a altura da árvore objetivo e distância considerada, o qual expressa o grau de desbaste, denominando-o como "A". Embora o valor-"A" tenha sido realmente desenvolvido como um elemento de controle no sistema experimental e não visasse a praticabilidade, ainda é apropriado para entender melhor as interações competitivas e, assim, possibilitar operações de desbaste mais eficazes (KRISTÖFEL, 2009).

No desenvolvimento do valor "A", Johann partiu das considerações:

1 - O espaço de crescimento de um tronco de uma árvore objetivo (Z) é o mais alto, quanto maior ele é. Uma árvore vizinha torna-se competidora (K), penetrando no espaço de crescimento da árvore objetivo. Se a altura do competidor é a mesma da altura ( $h_i$ ) da árvore Z, ou seja, da mesma posição social, a pressão da competição aumenta com o aumento da altura das árvores e a diminuição da distância ( $dist_{ij}$ ) entre os dois:  $h_i/dist_{ij}$ .

2 - Uma árvore competidora mais baixa ou (sociologicamente) mais fraca terá uma pressão comparativamente menor sobre a árvore objetivo do que uma mais forte. Esta situação também pode ser expressa como a razão entre o diâmetro do competidor ( $d_j$ ) e o diâmetro da Z ( $d_i$ ):  $d_j/d_i$ .

O estudo realizado por Johann (1982) partiu da definição de que o peso do desbaste seletivo deve considerar todas as árvores ao redor da árvore futuro, sendo todas retiradas formando um círculo de raio calculado de acordo com a altura da árvore objetivo. Segundo autor, o valor "A" define a intensidade da concorrência exercida por uma árvore central em relação a uma vizinha, por meio da distância das árvores, altura e diâmetro. Esse valor é um fator de proporcionalidade que fixa a intensidade de desbaste.

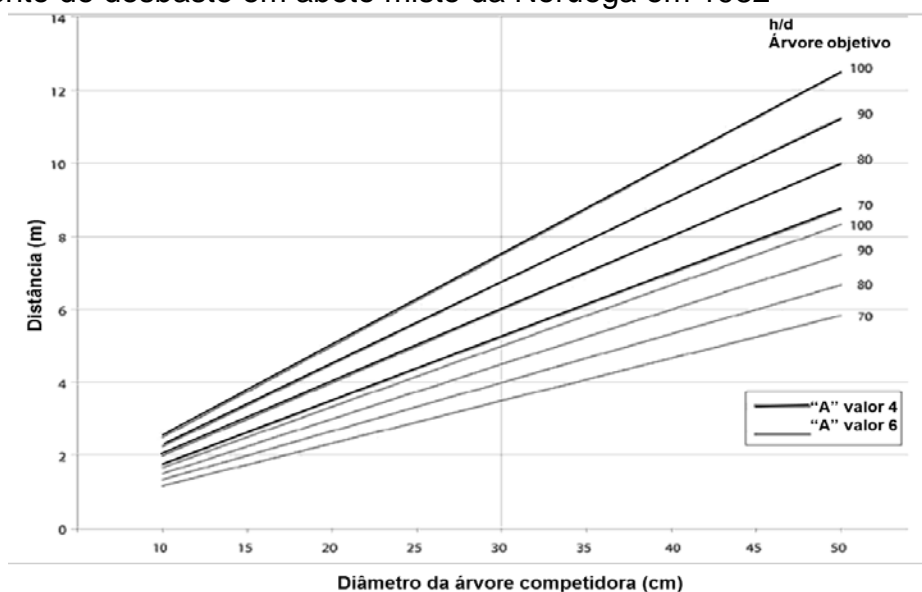
O índice de Johann é também chamado de numeração de desbaste seletivo onde as árvores com distância menor que a relação altura e diâmetro, são cortadas, em decorrência da competição entre elas. Quanto menor o valor de "A", mais intensivo é o desbaste e mais espaço para crescer vai ser dado para árvores futuro selecionadas (HANEWINKEL; PRETZSCH, 2000).

De acordo Kristöfel (2009) a Figura 1 mostra a relação entre o valor  $h_i/d_{ij}$  da árvore objetivo, o  $d_j$  do concorrente e a distância limite. Por exemplo, para uma árvore objetivo com  $h_i/d_i$  80 e um valor fixo "A" de 4 e 6, respectivamente, a distância limite de um competidor com 30 cm de diâmetro é 6 m ou 4 m; a um valor  $h_i/d_i$  de 100, as distâncias limite são 7,5 m e 5 m, respectivamente.

Isso significa que, por um lado, com um valor "A" de 4, uma liberação muito maior é obtida do que com um valor "A" de 6. Por outro lado, o grau de isenção de uma árvore objetivo também depende de seu próprio valor  $h_i/d_i$ . Árvore objetivo com maiores valores de  $h_i/d_i$  precisam que ser liberadas mais fortemente do que árvores objeto com valores mais favoráveis de  $h_i/d_i$ , a fim de obter o mesmo efeito. Se, por

alguma razão, árvores de baixo diâmetro com um valor alto de  $h_i/d_i$  forem selecionadas como a árvore objetivo, deve-se fornecer rapidamente mais espaço para o crescimento. Se, por outro lado, a árvore objetivo já se estiver estabelecida através do crescimento de diâmetro acima da média, então apenas intervenções mais fracas são necessárias (JOHANN, 1982).

Figura 1 – Distâncias limitadas pelos valores de “A” 4 e 6 do Índice de Johann em experimento de desbaste em abeto misto da Noruega em 1982



Fonte: Modificado de Kristöfel (2009).

Os desbastes quando são corretamente aplicados melhoram o vigor das árvores remanescentes em função da remoção de competidores, pois os recursos disponíveis se concentrarão no desenvolvimento das árvores de interesse, com rotações mais longas e reduzindo o tempo para à obtenção de produtos com maiores dimensões (SPURR et al. 1957). A definição da intensidade e idade da intervenção depende da espécie, densidade inicial e qualidade do sítio. Desbastes muito pesados podem afetar a floresta remanescente de maneira que não seja possível reutilizar os recursos disponíveis no sítio durante a rotação (SENA, 2011), principalmente se foram aplicados mais tarde.

#### 2.4 PREPARAÇÃO E UTILIZAÇÃO DE REGRESSÃO PARA CORREÇÃO DE DADOS DE MEDIDAS DE CRESCIMENTO

A medição repetida de dados de crescimento em árvores na floresta, ainda está sujeita a erros, embora seja precedida de planejamentos, supervisão e sob condições

como: mesmo procedimento, observador, instrumento, condições e local (SANQUETTA et al. 2014). Outros fatores como o tipo de casca da espécie, se lisa ou rugosa, que se desprende ou não, atmosféricas, como ar seco ou húmido e da ocorrência de precipitação, afetarão a dimensão da casca e, por conseguinte, a mensuração, dificultando a análise e a acurácia das estimativas, sendo necessário introduzir correções nestas medidas.

A correção de dados em série é comum em estudos meteorológicos onde algumas vezes, mesmo em medições automáticas, podem apresentar ausências ou falsas de informações (BIER; FERRAZ, 2017). Bertoni e Tucci (2001) indicam a utilização de ponderação regional, regressão linear ou múltipla e redes neurais artificiais como métodos para correção e homogeneização (preenchimento de falhas) de dados pluviométricos.

Baba et al. (2014) também abordam uma solução do problema utilizando regressão linear e geoestatísticas, em que ambas apresentaram desempenho semelhante na identificação de dados inconsistentes e na estimativa de dados a serem corrigidos ou preenchidos. Assim, a análise dos dados medidos em uma série permite verificar a existência de anomalias ou erros e assim corrigi-los.

#### **2.4.1 Mínimos Quadrados Ordinários, Regressão Quantílica e Regressão Robusta.**

O método dos mínimos quadrados (MQO) possui ampla aplicabilidade na análise de dados na área florestal. A sua origem tem início no século XIX com o trabalho de Legendre, que propõe a minimização dos erros das medidas realizadas (STIGLER, 1986). Deste modo adota estimadores que minimizam a soma dos quadrados dos desvios entre valores estimados e valores observados na amostra.

Na existência de pontos influentes (anomalias) o emprego da Regressão Quantílica (RQ) pode trazer estabilidade nas estimativas pois, esta não é muito sensível a pequenas variações, enquanto o estimador do MQO é influenciado por erros, onde até uma única observação ruim (*outlier*) pode arruinar completamente o estimador (MARONNA, 2006). A regressão quantílica, introduzida por Koenker e Gilbert (1978), estima modelos cujos quantis da distribuição condicional da variável resposta são definidos como funções das covariadas observadas.

Na Ciência Florestal a Regressão Quantílica foi empregada em estudos de sucessão ecológica (DAHLGREN et al., 2006), crescimento de árvores (COOMES; ALLEN, 2007a), mortalidade (COOMES; ALLEN, 2007b), de crescimento em altura após incêndio (MEYER et al., 2005), interação genótipo x ambiente (VAZ et al., 2008), na predição da distribuição de diâmetros (MEHTÄTALO et al., 2008), no ajuste de funções de afilamento (CAO; WANG, 2015) e na geração de curvas de índice de sítio (ARAÚJO JUNIOR et al., 2016).

A Regressão Robusta (RR) é uma técnica de estimação importante para a análise de dados contaminados com valores influentes ou onde a distribuição dos dados não é normal (AYINDE et al., 2015). Seus estimadores são frequentemente utilizados para estimação de parâmetros com objetivo de fornecer estabilidade na presença de *outliers* com excessiva influência sobre o resultado e em modelos com grande número de variáveis, onde é difícil a identificação de pontos influentes (ROUSSEEUW, 1984; YOHAI, 1987).

Na aplicação do método, Cunha et al. 2002) utiliza em dados contaminados com *outliers* a regressão robusta para modelar o crescimento em diâmetro e área transversal de espécies comerciais da Amazônia. Os autores conseguiram melhores estimativas do modelo com o estimador da regressão robusta do que pelo método dos mínimos quadrados ordinários. Muitos métodos foram devolvidos para esses casos, no entanto os mais utilizados são fornecidos pelos estimadores robustos que incluem o M, MM, *Least Trimmed Square* (LTS) e estimadores S fornecidos pela PROC ROBUSTREG do sistema SAS (CHEN, 2002).

#### **2.4.2 Modelos Generalizados**

Nas florestas naturais os dados de crescimento e variáveis dendrométricas das árvores não seguem um padrão de distribuição normal. Nesses casos, distribuições mais flexíveis para a variável resposta permitem obter ganho na performance preditiva do modelo, tornando modelos lineares generalizados (MLG) uma ferramenta estatística de grande potencialidade de aplicação (WEBER et al., 2018).

Nelder & Wedderburn (1972) propuseram os modelos lineares generalizados (MLGs) a partir da ideia de abrir o leque das opções para a distribuição da variável resposta, permitindo que a mesma pertença à família exponencial de distribuições, bem como dar maior flexibilidade com o uso de uma função de ligação para a relação funcional entre a média da variável resposta e o preditor linear  $\eta$ . (PAULA, 2013). Para

Dobson (2002) o MLG é definido em termos de um conjunto de variáveis independentes aleatórias, cada uma com distribuição para a família exponencial.

Segundo Hess a utilização de modelos lineares generalizados é justificável para gerar estimativas com acurácia, principalmente porque não necessitaram de transformação nas variáveis. O emprego de técnicas de ajuste de equações, como MLG, para gerar estimativas dendrométricas com precisão é importante para o desenvolvimento do manejo florestal sustentável

### 3 MATERIAIS E MÉTODOS

#### 3.1 ÁREA DE ESTUDO

O trabalho foi realizado em área de Floresta Ombrófila Mista localizada na unidade de conservação do ICMBio Floresta Nacional de São Francisco de Paula (FLONA-SFP). Circunscrita a coordenada 29°25'22,4" S e 50°e 23'11,2" W, a altitude de 930 m do nível do mar, a FLONA-SFP está localizada no nordeste do estado do Rio Grande do Sul (Figura 2), na microrregião dos Campos de Cima da Serra, no município de São Francisco de Paula.

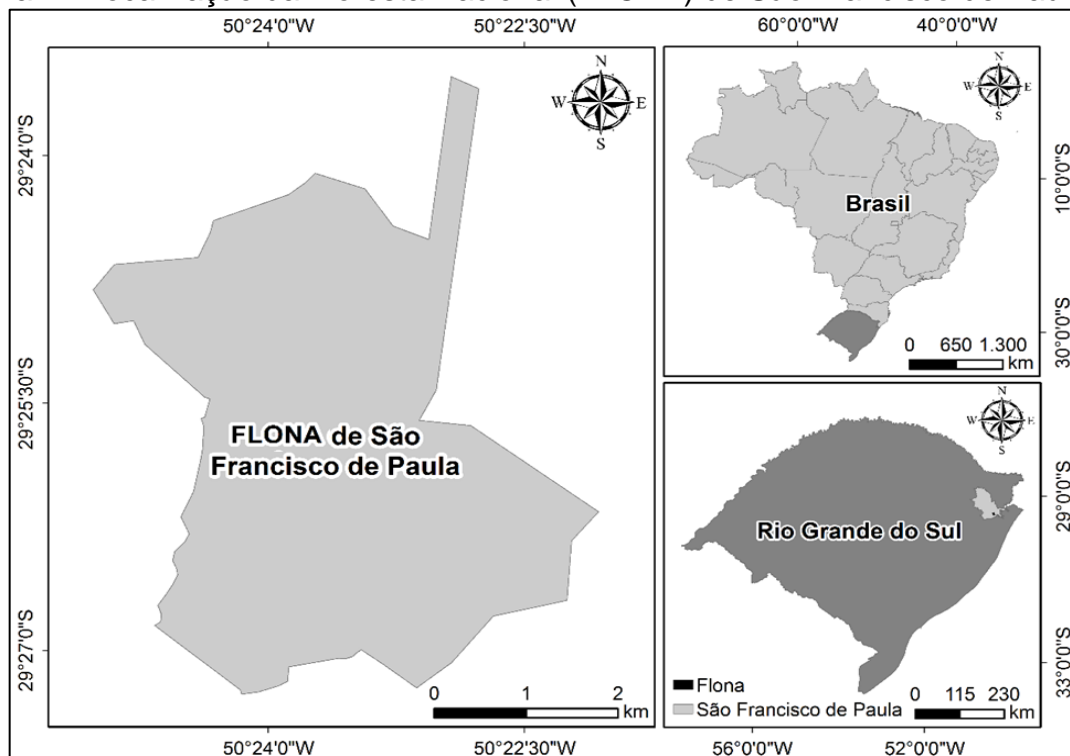
O clima de acordo com a classificação de Köppen é do tipo “Cfb”, mesotérmico médio, isto é, clima temperado constantemente úmido, com verão e sem a estação de seca. A temperatura média é de 14,5 °C com pluviosidade superior a 2.000 mm o que caracteriza a região como uma das mais úmidas do estado (ALVARES et al., 2014).

Os solos da FLONA-SFP são do tipo CAMBISSOLO HÚMICO Alumínico, CHERNOSSOLO ARGILÚVICO Férrico e NEOSSOLO LITÓLICO Eutrófico (EMBRAPA, 2006). São predominantemente profundos – de coloração escura e com fertilidade elevada, relevo movimentado – que permitem as redes de drenagem bom escoamento das águas, mesmo em situações de chuvas fortes (ICMBio, 1989).

A Floresta de Araucária na FLONA ocupa 901,9 ha, de uma área total de 1.606,69 ha. Segundo o estudo de Watzlawick et al. (2013), o local apresenta alta diversidade florística, índice de diversidade de Shannon de 3,71 e dominância ecológica de poucas espécies comprovado pelo valor de 0,79 do índice de equabilidade de Pielou. Os resultados dos autores supracitados na FLONA-SFP mostram que *Araucaria angustifolia*, *Ilex brevicuspis* Reissek, *Blepharocalyx salicifolius* (Kunth) O.Berg, *Casearia decandra* Jacq., *Sebastiania commersoniana* (Baill.) L.B. Sm. & Downs, *Ilex paraguariensis* A. St.-Hil. e *Sebastiania brasiliensis* Spreng constituem 42,03% do total de espécies levantadas na pesquisa.



Figura 2– Localização da Floresta Nacional (FLONA) de São Francisco de Paula, RS



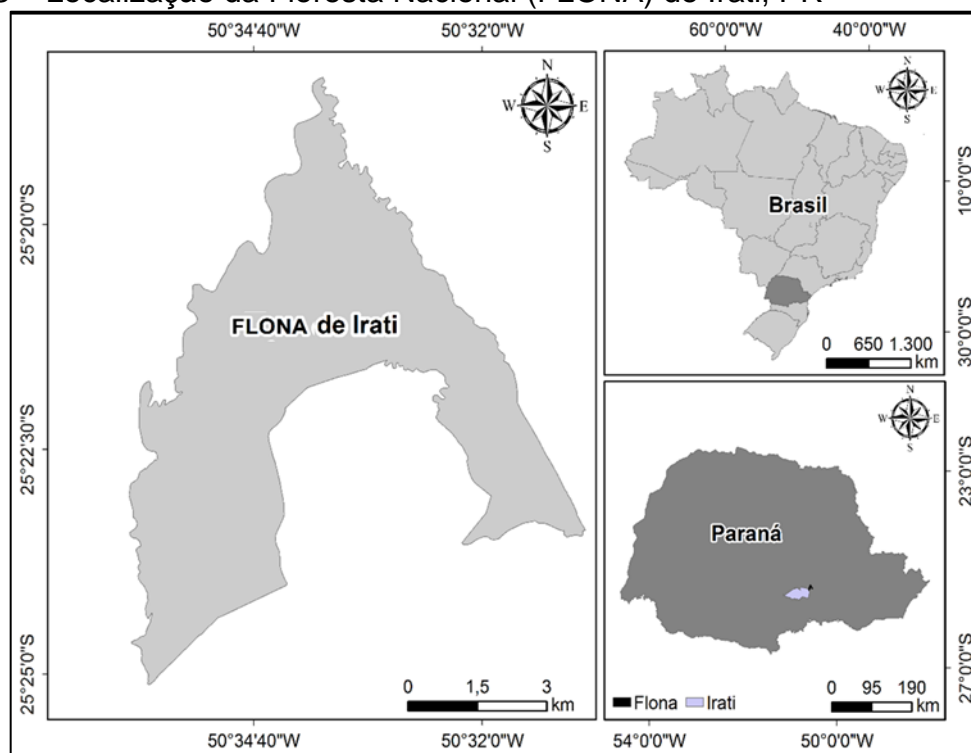
Fonte: Autora (2018).

### 3.1.1 FLONA de Irati

Um segundo conjunto de dados, medidos em Projeto PELD na Floresta Nacional de Irati – FLONA de Irati, no estado do Paraná (Figura 3) também foi objeto de estudo. A Floresta Nacional de Irati está circunscrita na interseção do paralelo  $25^{\circ}27'56''$  latitude Sul e o meridiano  $50^{\circ}37'51''$  de longitude Oeste (MAZZA, 2006). A FLONA fica localizada na região centro-sul do estado do Paraná, a 150 km da capital Curitiba, limítrofe com Irati, Fernandes Pinheiro, Imbituva e Teixeira Soares (ICMbio, 2013).

O clima característico é do tipo Cfb, assim como na FLONA de São Francisco de Paula com chuvas bem distribuídas durante todos os meses do ano e com temperatura média abaixo de  $18^{\circ}\text{C}$ . Os meses mais quentes do ano são dezembro e janeiro, os mais frios de junho a agosto, com ocorrência de geadas (ORELLANA, 2014).

Figura 3 – Localização da Floresta Nacional (FLONA) de Irati, PR



Fonte: Autora (2018).

Segundo Mazza (2006) o solo encontrado na FLONA de Irati é distribuído em três grupos: LATOSSOLO VERMELHO Distrófico, CAMBISSOLO HÁPLICO Distrófico e ARGISSOLO VERMELHO-AMARELO Distrófico (MAZZA, 2006). Apresenta relevo suavemente ondulado distribuído por toda a área da unidade de conservação.

A FLONA de Irati possui área total de 3.495 ha, onde 57,6% são ocupados por florestas nativas com predominâncias *Araucaria angustifolia* e espécies folhosas associadas a diferentes famílias, tais como canelas e imbuías (Lauraceae) e angicos (Fabaceae). O restante da área é ocupado por plantações florestais de *A. angustifolia*, *Pinus elliottii* Engelm. e *Pinus taeda* L., dentre outras (FIGUEIREDO FILHO et al., 2010).

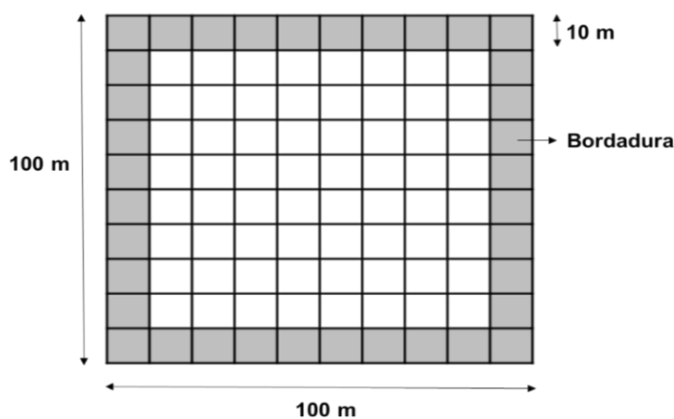
### 3.2 LEVANTAMENTO DE DADOS

Os dados empregados na pesquisa foram medidos na parcela 1546 do projeto PELD – “Conservação e Manejo Sustentável de Ecossistemas Florestais” – Subprojeto Floresta Nacional de São Francisco de Paula, concebido com o objetivo de caracterizar os processos, mecanismos e fatores que regulam a dinâmica dos ecossistemas florestais. Na FLONA-SPF o projeto iniciou no ano de 2000 e foi concluído em 2009.

As informações para esse estudo foram provenientes de medições de cap, altura, altura comercial e posição sociológica levantadas nos anos de 2003 e 2005 na FLONA de São Francisco de Paula, RS.

A parcela amostral do projeto PELD da FLONA-SFP possuiu forma quadrada, com 100m x 100m de lado (10.000m<sup>2</sup>), dividida em 100 subunidades de 10m x 10m (100m<sup>2</sup>) (Figura 4), onde todas as árvores com circunferência a altura 1,3m do nível do solo (cap) igual ou maior a 31,4 cm foram identificadas, medidas e posicionadas em um sistema cartesiano (XY).

Figura 4 – Esquema das unidades amostrais do projeto do PELD na FLONA de São Francisco de Paula, RS



Fonte: Autora (2018).

Dados da FLONA de Irati, provenientes de uma área de 25 ha do projeto PELD, medidos entre os anos de 2011 e 2014, foram empregados na comparação de resultados da influência do Índice de Johann sobre o incremento periódico anual em área transversal (IPAg) da FLONA-SFP e não foram utilizados na modelagem.

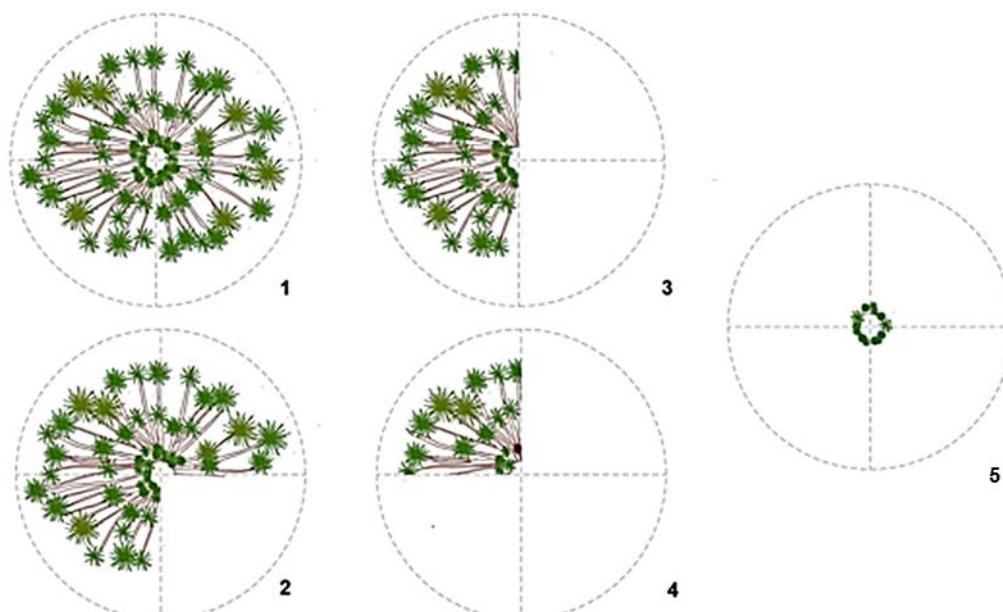
As parcelas também possuíam 1 ha (100 m x 100 m), subdivididas em quatro parcelas de 0,25 ha (50 m x 50 m) cada. Essa parcela permanente foi medida em 2002, 2005, 2008, 2011 e 2014, todas as árvores com diâmetros igual ou maior a 10 cm foram medidos, identificadas quanto à espécie e posicionadas em um sistema cartesiano (XY) (FIGUEIREDO FILHO et al., 2010).

### 3.2.1 Levantamentos de variáveis qualitativas de copas na FLONA de São Francisco de Paula, RS

Uma amostragem das dimensões da copa de 79 árvores de *A. angustifolia* crescendo no interior da floresta da FLONA-SFP, forneceu informações sobre a forma da copa em projeção horizontal (FOR), forma vertical da copa (FORVERT), distância entre pseudo-verticilos (DVERTIC), porcentagem de folhas verdes (FV), posição sociológica (PS) e dimensão da copa (DIM). Estas informações descrevem o estado atual das árvores na floresta e tiveram por objetivo incluir variáveis de copa na descrição da competição. As informações foram atribuídas após a avaliação visual de acordo com as escalas:

- a) Forma da copa (FOR): (1) circular ou 100% - copa nos quatro quadrantes; (2) semicircular ou 75% - copa em 3/4 dos quadrantes; (3) copa lateral ou 35% - copa em 2/4 dos quadrantes; (4) copa semi-unilateral ou 25% - copa em 1/4 dos quadrantes e (5) sem copa ou morta (Figura 5).

Figura 5 – Representação das escalas utilizadas para avaliação da forma da copa (FOR) de *Araucaria angustifolia* na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS



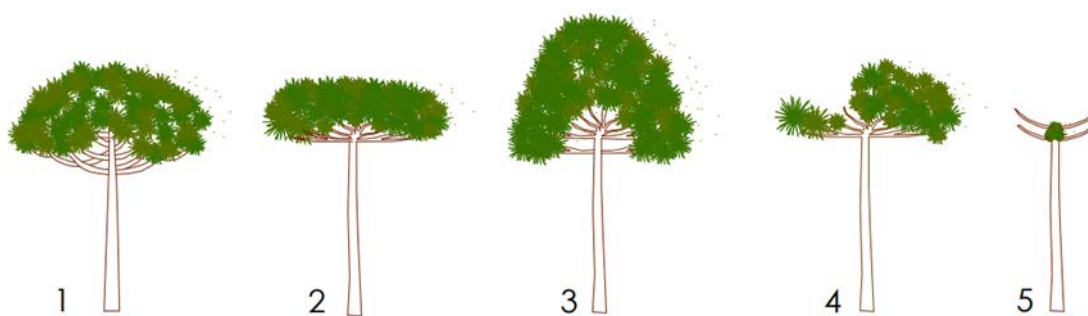
Onde: (1) circular ou 100% - copa nos quatro quadrantes; (2) semicircular ou 75% - copa em 3/4 dos quadrantes; (3) copa lateral ou 50% - copa em 2/4 dos quadrantes; (4) copa semi-unilateral ou 25% - copa em 1/4 dos quadrantes e (5) sem copa ou morta.

Fonte: Autora (2018).

- b) Forma vertical (FORVERT): (1) copa convexa – verticilos voltados para cima; (2) copa plana – verticilos horizontais; (3) copa cônica; (4) copa sem forma –

não foi possível definir a forma vertical e (5) copa quebrada ou morta (Figura 6).

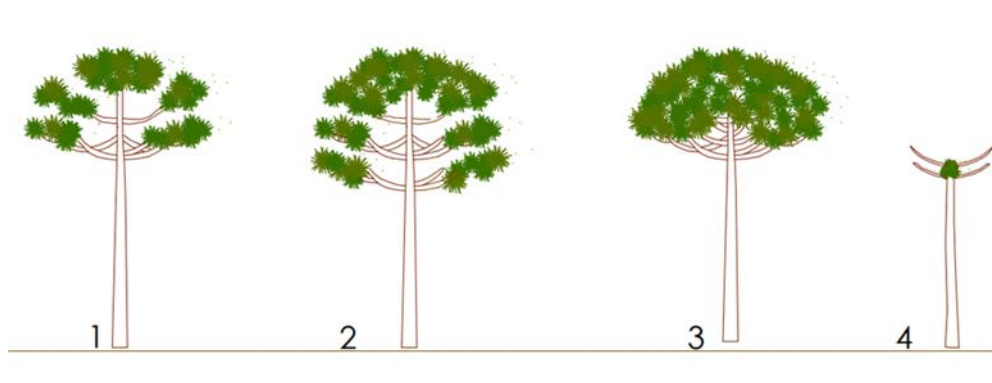
Figura 6 – Representação das escalas utilizadas para avaliação da forma vertical da copa (FORVERT) de *Araucaria angustifolia* na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS



Onde: (1) copa convexa – verticilos voltados para cima; (2) copa plana – verticilos horizontais; (3) copa cônica; (4) copa sem forma – não foi possível definir a forma vertical e (5) copa quebrada ou morta.  
Fonte: Autora (2018).

c) Distância entre pseudo-verticilos (DVERTIC): (1) espaçados; (2) irregular; (3) concentrados e (4) copa quebrada ou morta (Figura 7).

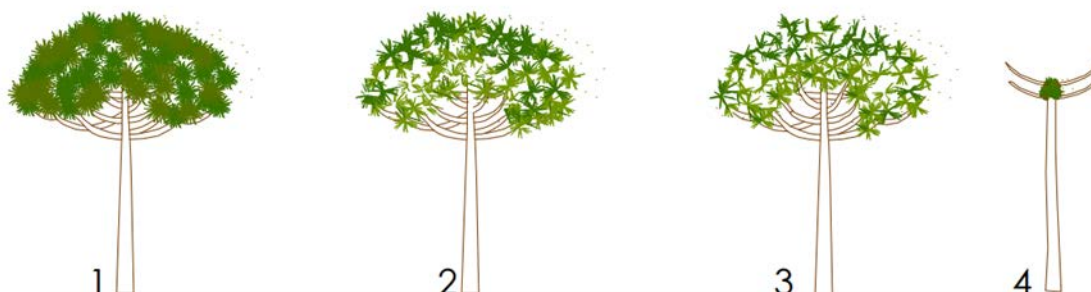
Figura 7 – Representação das escalas utilizadas para avaliação da distância entre os pseudo-verticilos (DVERTIC) de *Araucaria angustifolia* na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS



Onde: (1) espaçados; (2) irregular; (3) concentrados e (4) copa quebrada ou morta.  
Fonte: Autora (2018).

d) Folhas verdes (FV): (1) copa com até 66% de folhas verdes; (2) copa entre 60% e 30% de folhas verdes (3); copa com menos de 30% de folhas verdes e (4) copa quebrada ou morta (Figura 8).

Figura 8 – Representação das escalas utilizadas para avaliação da distância entre as folhas verdes (FV) de *Araucaria angustifolia* na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS

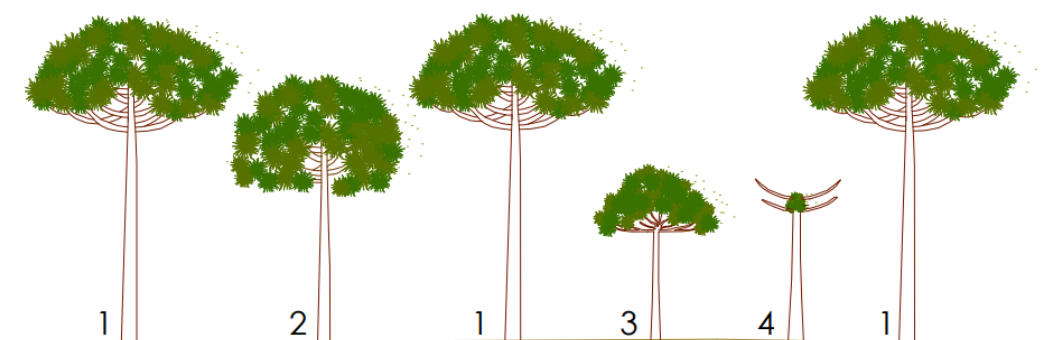


Onde: (1) copa com até 66% de folhas verdes; (2) copa entre 60% e 30% de folhas verdes (3); copa com menos de 33% de folhas verdes e (4) copa quebrada ou morta.

Fonte: Autora (2018).

- e) Posição sociológica (PS): (1) árvores dominantes – ocupava o estrato superior do dossel com alta exposição a luz; (2) árvores codominantes – ocupava o estrato intermediário do dossel com parcial exposição a luz; (3) árvore dominada – ocupava o estrato inferior do dossel com baixa exposição a luz; (4) copa quebrada ou morta (Figura 9).

Figura 9 – Representação das escalas utilizadas para avaliação da posição sociológica (PS) de *Araucaria angustifolia* na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, RS



Onde: (1) árvores dominantes – ocupava o estrato superior do dossel com alta exposição a luz; (2) árvores codominantes – ocupava o estrato intermediário do dossel com parcial exposição a luz; (3) árvore dominada – ocupava o estrato inferior do dossel com baixa exposição a luz; (4) copa quebrada ou morta.

Fonte: Autora (2018).

- f) Dimensão da copa (DIM): (1) grande; (2) média; (3) pequena e (4) quebrada ou morta.

### 3.3 EXPLORAÇÃO DOS DADOS E CORREÇÕES

Os dados de cada árvore amostrada na parcela 1546 da FLONA-SFP foram analisados de forma exploratória para aferir a tendência das variáveis, detectar possíveis erros de medições, e se possível, corrigi-los por meio da média de medições sucessivas, interpolação ou regressão, conforme o caso. Quando justificada, a correção dos dados nos anos de interesse do estudo, 2007 e 2009, seguiu os critérios descritos na Tabela 1.

Tabela 1 – Critérios para correção dos dados de diâmetro na série temporal de 2000 a 2009 de parcelas permanentes na FLONA de São Francisco de Paula, RS

CRITÉRIO	PROCEDIMENTO	CARACTERIZAÇÃO DO PROCEDIMENTO
1	Dados observados	Conservar o máximo possível dos dados observados de diâmetro.
2	Interpolação entre o diâmetro anterior e o subsequente	Um ou dois valores da série temporária de diâmetro fora do padrão de crescimento, ou seja, possíveis erros ou <i>outliers</i> , que não estavam em sequência e não eram o primeiro e nem o último valor da série temporal.
3	Estimar pelo modelo	Três ou mais dados observados de diâmetro estavam fora do padrão.

Fonte: Autora (2018).

Os métodos de regressão utilizados foram Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), Regressão Quantílica (RQ) e Regressão Robusta (RR). As medições de diâmetro (calculadas a partir das medidas da circunferência) foram as únicas a serem corrigidas, pois deram origem a variável de interesse no estudo, o incremento periódico anual em área transversal. A análise gráfica das medidas anuais do *d* de cada árvore (2000 a 2009) mostraram tendência linear justificando o ajuste de uma equação do *d* em função dos anos de medições (1), nos três métodos de regressão.

$$dap = f(\text{ano}) \quad (1)$$

Onde: *d* = diâmetro a altura de 1,3 m do nível do solo; ano=período de realização da medição.

Inicialmente, nos ajustes da equação acima foram considerados dados de toda série temporal de diâmetro, 2000 a 2009, excluindo árvores com menos de cinco medições e as que morreram no período. Desse modo, foram geradas 882 regressões com cada método (MQO, Quantílica e Robusta), para 366 *A. angustifolia* e 516 folhosas (angiospermas).

Os ajustes foram realizados no *SAS-Statistical Analysis System* (SAS Institute Inc., 2009), com o procedimento PROC REG, PROC QUANTREG com os quantis 0,4; 0,5; 0,6 e PROC ROBUSTREG.

A seleção do melhor método de regressão foi baseada nas estatísticas de Qui-Quadrado ( $X^2$ ), Viés e erro padrão da estimativa (Syx), conforme a Tabela 2, e na análise da distribuição de frequência destas estatísticas para o conjunto de dados de cada árvore.

Tabela 2 – Critérios estatísticos para seleção do método de regressão

CRITÉRIO	EQUAÇÃO
Qui-quadrado ( $X^2$ )	$X^2 = \sum_{i=1}^n \frac{(Y - \hat{Y})^2}{\hat{Y}}$
Viés	$VIES = \sum_{i=1}^n \frac{ \hat{Y} - Y }{n}$
Erro padrão da estimativa (Syx)	$RQME = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y - \hat{Y})^2}{n - p}}$

Onde: Y= valores observados;  $\hat{Y}$ = valores estimados e n=número de observações.  
Fonte: Autora (2018).

### 3.4 QUANTIFICAÇÃO DA COMPETIÇÃO

#### 3.4.1 Critérios de seleção de árvores competidoras

As definições do número de árvores competidoras tiveram como referência a árvore objetivo, neste caso a *Araucaria angustifolia*. Na competição intraespecífica foi simulado o comportamento de cada *A. angustifolia* como árvore objetivo e, posteriormente como árvore competidora. Já na competição interespecífica as folhosas (gimnospermas) também foram definidas como árvores competidoras.



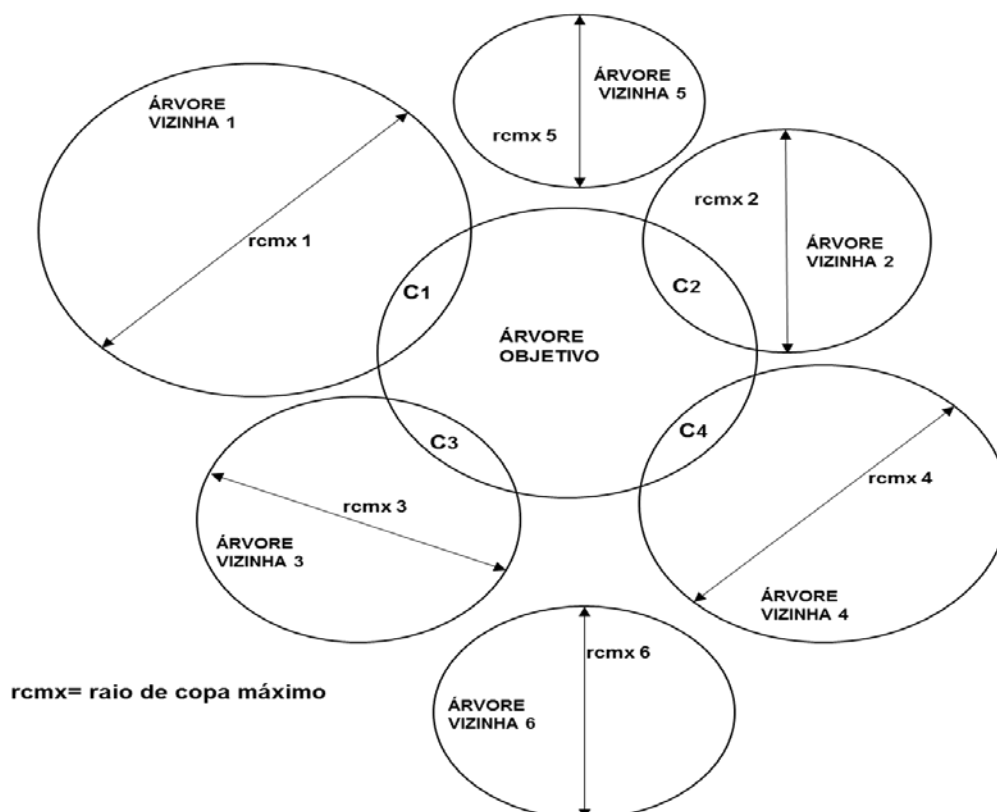
A determinação do número de árvores competidoras para a árvore objetivo considerou o conceito da área de projeção de copa da árvore crescendo sem competição ou zona de influência de copa proposto por Bella (1971). Em outra simulação, dois fatores de área basal (FAB) de Bitterlich foram considerados.

O conceito de área de projeção de copa estabeleceu como árvores competidoras aquelas em que a copa esteja em contato com a copa da árvore objetivo como ilustrado na Figura 10. Esse é um critério de seleção baseado na dimensão da copa, na capacidade de competir por luz e por espaço de crescimento sendo o diâmetro de copa estimado pela equação (2) de Costa et al. (2016), baseado em um modelo linear simples, em função do diâmetro a altura de 1,3m do solo de árvores crescendo sem competição.

$$dc = 4,8601 + 0,2038 \cdot dap \quad (2)$$

Onde: dc= diâmetro de copa e d (diâmetro à 1,3m do solo).

Figura 10 - Influência da zona de projeção da copa sobre a copa de quatro árvores vizinhas



Onde:  $C_i$  = zona de influência da copa da árvore objetivo.  
Fonte: Adaptado de Contreras (2011).

Para representar a área da competição entre as copas foi considerado a distância entre as árvores e os raios de copa. Nesse caso a denominação de competidora incluía as árvores com contato entre as copas e as que não se tocavam, mas que estivessem na mesma área de projeção da copa, seja acima ou abaixo da altura da árvore objetivo (3).

$$\text{competidora} = \text{dist}_{ij} < (rc_i + rc_j) \quad (3)$$

Onde:  $\text{dist}_{ij}$  = distância entre a árvore objetivo e sua circunvizinha;  $rc_i$  = raio de copa da árvore objetivo e  $rc_j$  = raio de copa da árvore competidora.

Assim, de 336 árvores foram selecionadas 220 árvores objetivos, considerando as árvores de bordadura apenas como árvores competidoras. Classifica-se como competidora as árvores com contato entre as copas, independente se as árvores possuem altura acima ou abaixo da árvore da árvore objetivo.

A inclusão da árvore como competidora quando considerado o FAB de Bitterlich foi baseada na distância crítica da banda de numeração (1 e 4) e na distância da árvore objetivo em relação as árvores circunvizinhas (4), sendo considerada competidora a árvore que se encontrava no terreno a uma distância menor que a distância crítica da banda considerada na simulação.

$$L = \frac{0,5 \cdot \text{dap}}{\sqrt{\text{FAB}}} \quad (4)$$

Onde: L = distância radial da árvore objetivo em relação a possível respectiva competidora (m); d = diâmetro à altura do peito (cm); FAB = fator de área basal.

### 3.4.2 Índices de Competição Testados

#### a) Índice de Johann

O índice de Johann (5) foi calculado obtendo o valor de "A" (6), que descreve o grau de desbaste, multiplicando a razão da altura e diâmetro da árvore objetivo pela razão do diâmetro da competidora com a distância entre as árvores. Quando a distância entre a árvore objetivo e a vizinha for menor que a expressão, essa é considerada competidora, devendo ser removida no desbaste.

$$\text{dist}_{i,j} \leq \frac{h_j}{d_j} \times \frac{d_i}{A} \quad (5)$$

$$A = \frac{h_j}{d_j} \times \frac{d_i}{dist_{ij}} \quad (6)$$

Onde:  $dist_{ij}$  = distância entre a árvore objetivo e árvore competidora;  $h_j$  = altura da árvore objetivo;  $d_j$  = diâmetro da árvore objetivo;  $d_i$  = diâmetro da árvore competidora e A = intensidade de competição.

Portanto cada valor de “A” representava o nível de competição que a árvore exerce sobre a árvore objetivo. A fim de quantificar numericamente a competição absoluta sofrida por cada árvore objetivo foram estabelecidas simulações com a soma, a média e o máximo valor de “A” para competição intra e interespecífica e total.

As simulações intraespecíficas correspondem aos valores de “A” calculados entre as *A. angustifolia*, representados pela soma do valor de “A” das *A. angustifolia* (ICJ.SA), média (ICJ.MA) e máximo (ICJ.MXA). O mesmo foi empregado na competição interespecífica (valores de “A” calculados entre *A. angustifolia* como árvore objetivo e folhosas), com soma (ICJ.SAF), média (ICJ.MAF) e máximo do valor de “A” das folhosas (ICJ.MXF). Por fim, para representar a competição total foi utilizada uma somatória dos valores de “A” de *A. angustifolia* e folhosas, atribuídas também a soma (ICJ.SAT), média (ICJ.MAT) e máximo (ICJ.MXT) na competição total.

Além disso, foram propostas modificações no índice de Johann para a inclusão da altura da árvore competidora ( $h_i$ ), apresentadas na Tabela 3.

Tabela 3 – Modificações propostas no índice de Johann para Floresta Ombrófila Mista

MODIFICAÇÃO	VARIÁVEIS	EXPRESSÃO
MOD1	$h_j d_j h_i E_{ij}$	$A = (h_j/d_j * h_i/dist_{ij})$
MOD2	$h_j d_j h_i d_i E_{ij}$	$A = (h_j/d_j * h_i/d_i)/dist_{ij}$
MOD3	$d_j h_i d_i E_{ij}$	$A = (d_j/dist_{i,j} * h_i/d_i)$

Onde:  $dist_{ij}$  = distância entre a árvore objetivo e árvore competidora;  $h_j$  = altura da árvore objetivo;  $d_j$  = diâmetro da árvore objetivo;  $d_i$  = diâmetro da árvore competidora  $h_i$  = altura da árvore competidora e A = intensidade de competição.

#### b) Índice de Hegyi (ICH)

O índice de Hegyi proposto por Sabatia e Burkhart (2012), assim como o índice de Johann é dependente da distância ( $1/dist_{ij}$ ), mas considera uma proporção de tamanho da árvore objetivo ( $d_i$ ) e suas competidoras ( $d_j$ ), conforme a expressão:

$$ICH = \sum_{j=1}^n \left[ \frac{d_j}{d_i \cdot dist_{ij}} \right] \quad (7)$$

Onde:: ICH= Índice de Hegyi;  $dist_{ij}$  = distância entre a árvore objetivo e árvore competidora;  $d_j$  = diâmetro da árvore competidora e  $d_i$  = diâmetro da árvore objetivo.

c) Índice de BAL – Basal Area Larger (ICB)

O índice de BAL não inclui a distância entre as árvores, portanto é independente da distância. Esse índice considera como competidora a árvore que possui o d maior que a árvore objetivo, assumindo que são competidoras as árvores que possuem área transversal (g) maior que a árvore objetivo.

$$ICB = \sum_{i=j}^n (g_i) \quad (8)$$

Onde: ICB= índice de competição de BAL;  $g_i$ =árvores com diâmetro maior que o diâmetro da árvore objetivo por hectare.

### 3.5 MODELAGEM DO INCREMENTO PERIÓDICO ANUAL EM ÁREA TRANSVERSAL DE *Araucaria angustifolia* NA FLONA DE SÃO FRANCISCO DE PAULA, RS

O incremento periódico anual em área transversal das árvores objetivo (IPAg) foi calculado entre os anos de 2007 e 2009 pela expressão:

$$IPAg = \left[ \frac{\pi}{4} * (dap_t^2 - dap_{t-2}^2) \right] / 2 \quad (9)$$

Onde:  $IPAg$ = incremento periódico anual em área transversal (cm<sup>2</sup>/ano);  $dap_t$ = diâmetro à altura do peito no final do período (cm);  $dap_{t-2}$  = diâmetro à altura do peito no início do período (cm).  $t$  = período em anos.

#### 3.5.1 Modelagem com variáveis dendrométricas, índices de competição no procedimento “Stepwise”

O incremento periódico anual em área transversal foi relacionado com as variáveis dendrométricas (d, h) e as expressões de simulação de competição calculadas com o índice de Johann (ICJ.MA, ICJ.MA, ICJ.MXA) correlação de Pearson (10). Na correlação de Kendall (11) as variáveis utilizadas foram analisadas as variáveis discretas (FOR, FORVERT, DVERTIC, FV, PS e DIM). O intuito da análise constituiu em estudar os efeitos nas variações do incremento periódico anual em área transversal,

baseado nas relações e tendências apresentadas entre a variável dependente e as independentes.

$$r(x, y) = \frac{\Sigma(x-\bar{x})(y-\bar{y})}{\sqrt{(\Sigma(x-\bar{x})^2)(\Sigma(y-\bar{y})^2)}} \quad (10)$$

$$\tau = \frac{2(n_c - n_d)}{n(n-1)} \quad (11)$$

Onde::  $r(x, y)$  = correlação de Pearson entre as variáveis  $x$  e  $y$ ;  $\tau$  = correlação de Kendall.

O método Box-Cox foi utilizado para estabilizar a variância por meio de uma potência lambda ( $\lambda$ ) estimada por máxima verossimilhança, conforme o modelo abaixo (SCHNEIDER et al., 2009).

$$\lambda = x \xrightarrow{\text{potência}} IPAg' = IPAg^x \quad (12)$$

Onde::  $\lambda$  = lambda a ser determinado;  $IPAg^x$  = incremento periódico anual em área transversal transformado.

Também foram realizadas análises exploratórias por meio de gráficos de dispersão entre o  $IPAg$  e as variáveis correlacionadas. As análises foram realizadas utilizando os procedimentos PROC CORR e PROC SCATTERPLOT no sistema estatístico SAS (SAS Institute Inc., 2009) e no pacote MS Office Excel.

A construção do modelo ocorreu pelo procedimento PROC STEPWISE no sistema SAS com as variáveis dendrométricas e simulações com o índice de Johann e suas transformações ( $1/x$ ,  $\ln x$ ).

### **3.5.2 Modelagem com variáveis dendrométricas e índices de competição utilizando a abordagem de Modelos Lineares Generalizados (MLG)**

No ajuste do modelo de incremento periódico anual em área transversal utilizou-se a técnica dos modelos lineares generalizados (MLG), no campo aleatório, Normal, com a função de logarítmica. O MLG foi utilizado uma vez que os resíduos do modelo com regressão utilizando o procedimento Stepwise apresentam violação das condicionantes de normalidade e homogeneidade da variância.

O modelo foi determinado conforme equação (13) e ajustado pelo procedimento PROC GENMOD no sistema SAS.

$$[Y]_{dist.=Normal}^{link=log} = \beta_0 + \beta_1 \cdot x_1 + \beta_2 \cdot x_2 + \beta_n \cdot x_n \quad (13)$$

Onde: Y= variável dependente; x= variável independente; link= função de ligação; dist.= distribuição;  $\beta$ = parâmetro a ser estimado.

### **3.5.3 Modelagem com variáveis dendrométricas, índices de competição e variáveis qualitativas de copa utilizando a abordagem de Modelos Lineares Generalizados (MLG)**

A modelagem com a inclusão de variáveis qualitativas de copa teve como objetivo descrever a amplitude de variação do IPAg com as variáveis dendrométricas e o índice de Johann medidos no ano de 2007. Normalmente de acordo com Costa (2015) e Orelanna (2014) para esse tipo de modelagem, quando se agrega variáveis de copa, utiliza-se o incremento periódico igual ou menor aos últimos cinco anos.

Devido à falta de dados de copa na época do levantamento dos dados do PELD Subprojeto São Francisco de Paula, considerou-se as dimensões de copa atuais para avaliar de maneira investigativa a influência sobre o crescimento. Estas relações só podem ser avaliadas devido a tendência e a descrição dos dados, já que os valores de incrementos ao longo dos nove anos de observações do projeto PELD-SFP (2000 – 2009) são baixos e não sofreram grandes variações, permitindo considerar o mesmo para a floresta que não sofreu interferência nesses últimos dez anos. Certamente ocorreram modificações nas copas nesse período, porém utilizou-se as características atuais considerando as poucas oscilações dos diâmetros.

Posteriormente em uma subamostra na floresta foi realizada análises multivariadas com o intuito de obter variáveis de qualidade da copa e posição sociológica social para uma nova modelagem com melhores estimativas do incremento periódico anual em área transversal. A Análise de Componentes Principais foi aplicada com o objetivo de reduzir o número de variáveis e verificar a influência das variáveis morfo-métricas qualitativas na variância total dos dados de IPAg.

Com os componentes principais selecionados foi realizado a análise de agrupamento em Cluster hierárquico, utilizando a distância Euclidiana como medida de similaridade entre os agrupamentos e o método de ligação de Ward para elaboração

do dendrograma. O método de Ward é um procedimento no qual a medida de similaridade usada para unir agrupamentos é calculada como a soma de quadrados entre os dois agrupamentos que apresentarem menor aumento na soma global de quadrados dentro dos agrupamentos (FIELD, 2009; HOLANDA et al., 2010).

A análise de componentes principais também foi realizada no sistema estatístico SAS, pelo procedimento PROC COMP, já para o agrupamento foi utilizando o software © Copyright IBM Corporation, versão 20 (IBM SPSS, 2011).

Os dados obtidos na amostragem de 85 árvores e os métodos da análise multivariada foram utilizados em uma nova modelagem do incremento periódico anual em área transversal. As variáveis para compor o modelo foram selecionadas manualmente, primeiro as variáveis de dimensão e competição (d, h, ln(ICJ.MAT)) e, depois as variáveis discretas de copa, de acordo com a Tabela 4. Conforme a significância (prob. 0,05) dos parâmetros as variáveis mais correlacionadas foram incluídas ou retiradas, como proposto por Cunha (2013). Os modelos foram ajustados pela MLG.

Tabela 4 – Modelos utilizados na modelagem do incremento periódico anual em área transversal de *Araucaria angustifolia* na FLONA de São Francisco de Paula, RS

Modelo	Variáveis da equação
1	$IPAg = f(\exp(d))$
2	$IPAg = f(\exp(d, \ln(ICJ.MAT)))$
3	$IPAg = f(\exp(d, \ln(ICJ.MAT)h/d))$
4	$IPAg = f(\exp(d, \ln(ICJ.MAT), PS))$
5	$IPAg = f(\exp(d, \ln(ICJ.MAT), PS, FV))$
6	$IPAg = f(\exp(d, \ln(ICJ.MAT), PS, FV, FORMA))$

Onde: IPAg = incremento periódico anual em área transversal; d= diâmetro; h/d= relação altura/diâmetro; FORMA= forma da copa; PS= posição sociológica; FV= porcentagem de folhas verdes.

Fonte: autora (2018)

### 3.5.4 Estatísticas para avaliação do modelo

A verificação do ajuste e precisão do modelo foi baseada no coeficiente de determinação ajustado ( $R^2_{aj}$ ), erro padrão da estimativa (Syx) e na distribuição gráfica dos resíduos. Os resíduos foram ainda avaliados no procedimento PROC REG com a opção WHITE para averiguar a homogeneidade e na PROC UNIVARIATE, com opção NORMAL para o teste de normalidade por Shapiro-Wilk (SAS Institute Inc., 2009).

$$R^2_{aj.} = \left[ 1 - \left( \frac{(n-1)}{(n-p)} \cdot \frac{SQR}{SQT} \right) \right] \quad (14)$$

Onde::  $R^2_{aj.}$  = coeficiente de determinação ajustado;  $n$  = número de observações;  $p$  = número de c;  $SQR$  = soma de quadrados dos resíduos e  $SQT$  = soma de quadrados total.

$$S_{yx} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n - p}} \quad (15)$$

$S_{yx}$  = erro padr;  $\hat{Y}_i$  = valor estimado;  $Y_i$  = valor observado;  $n$  = número de observações e  $p$  = número de coeficientes do modelo.

Para a seleção do melhor modelo linear generalizado também foi considerado os critérios de informação de Akaike (AIC), Bayesiano (BIC).



## 4 RESULTADOS E DISCUSSÕES

### 4.1 EXPLORAÇÃO DOS DADOS E CORREÇÕES

As estatísticas utilizadas para comparar a precisão das regressões a serem aplicadas na correção de dados de diâmetro, quando necessário, encontram-se na Tabela 5. O método MQO alcançou a menor soma dos escores tomando como referência os valores médios e com exceção ao Viés na RQ 0,4 e 0,5, as demais estatísticas apresentaram valores semelhantes para mínimos, máximos, médias e desvios.

A distribuição de frequência do número de árvores em relação à classe dos valores das estatísticas (Qui-quadrado, Viés e Syx) para métodos MQO, Regressão Quantílica e Regressão Robusta encontra-se no APÊNDICE A.

Tabela 5 – Estatísticas de Qui-quadrado ( $\chi^2$ ), Viés e RMSE para as regressões nos métodos MQO (Mínimos Quadrados Ordinários), RQ (Regressão Quantílica: 0,4; 0,5; 0,6) e RR (Regressão Robusta) e *Araucaria angustifolia* na FLONA-SFP, RS

ESTATÍSTICAS		MQO	RQ			RR
			0.4	0.5	0.6	
$\chi^2$	Mínimo	0,0002	0,0003	0,0003	0,0003	0,0002
	Máximo	51,451	68,841	76,752	77,002	58,522
	Média	0,0554	0,0717	0,0711	0,0735	0,0659
	Desvio	0,2870	0,3938	0,4125	0,4194	0,3544
Escore		1	5	3	4	2
VIÉS	Mínimo	0,0006	0,0003	0,0006	0,0006	0,0006
	Máximo	183,793	81,418	125,237	183,793	184,544
	Média	0,1493	0,1126	0,1460	0,1493	0,1550
	Desvio	0,8599	0,1360	0,7242	0,8599	0,8745
Escore		3	1	2	3	4
Syx	Mínimo	0,024	0,024	0,024	0,024	0,024
	Máximo	4,296	3,539	4,287	4,296	4,296
	Média	0,260	0,259	0,253	0,260	0,260
	Desvio	0,296	0,281	0,292	0,296	0,296
Escore		2	1	3	2	2
<b>Soma</b>	<b>Escore</b>	<b>6</b>	<b>7</b>	<b>8</b>	<b>9</b>	<b>8</b>

Fonte: Autora (2018).

Os valores dos escores de cada regressão calculada por árvore nos métodos de regressão agruparam-se na primeira classe dos valores das estatísticas para a maioria das árvores. Na estatística de Qui-quadrado, 98,6% das árvores alcançaram valores menores que 0,49, não apresentando diferença significativa entre os valores observados e estimados a uma probabilidade de 95% de significância.

No cálculo do Viés, 98,1% das árvores apresentaram valores estatísticos menores que 1,0. O erro (Syx) foi menor que 0,20 em 93% das árvores estudadas.

O método de Mínimos Quadrados Ordinários foi selecionado para a preparação dos dados, pois apresentou a menor soma de escores, além de ser um método mais tradicional e de simplicidade no ajuste. Os demais métodos também podem ser utilizados na correção de dados em parcelas permanentes de florestas naturais, já que apresentaram boa qualidade de ajuste, baixa ou nenhuma tendência e precisão, em dados contaminados por *outliers*.

A correção dos diâmetros foi realizada de acordo com os critérios pré-estabelecidos, mas, após o ajuste da equação (1) –  $dap = f(ano)$  –, foi observado que outros critérios deveriam ser considerados, pois, em algumas árvores, os modelos estimaram diâmetros decrescentes ao longo dos anos, com inclinação negativa. Neste caso, quando o modelo apresentou o parâmetro b1 negativo, indicando decréscimo no crescimento em diâmetro, um novo modelo foi ajustado para estimar os diâmetros com erros de medição, mas apenas com os dados que seguiam uma tendência de crescimento. Entretanto, nos dados onde não foi possível observar a tendência de crescimento, utilizou-se a média dos diâmetros observados.

#### 4.2 DESCRIÇÃO DA COMPETIÇÃO PELO ÍNDICE DE JOHANN

As árvores de *Araucaria angustifolia* apresentaram amplitude de distribuição, entre 10,10 a 78,9 cm, com desvio de 18,26 cm (Tabela 6). A floresta apresentava árvores com incrementos zeros e com máximo de 78,9 cm<sup>2</sup>/ano, para competição média pelo ICJ.MAT de 5,84, ICB de 9,14 e ICH 4,33, sendo que quanto maior esses valores maior a competição.

O padrão de variação da relação altura/diâmetro (h/d), distância máxima (DISTMAX) e valor médio de “A” total (ICJ.MAT) de forma tridimensional (Figura 11) permitiu avaliar a contribuição dessas variáveis na quantificação da competição. A distância máxima para uma árvore ser definida como competidora diminuiu com o valor da média de “A” total (ICJ.MAT) nas três posições sociológicas estudadas.

Dessa forma, a competição é mais evidente quanto maior for o valor de ICJ.MAT. A competição é menor em árvores dominantes, seguida das árvores codominantes e dominadas, já que ocorreu acréscimo no valor de ICJ.MAT com a piora da posição social da árvore.

Tabela 6 – Estatísticas descritivas das variáveis dendrométricas e índices de competição de *Araucaria angustifolia* na FLONA de São Francisco de Paula, RS

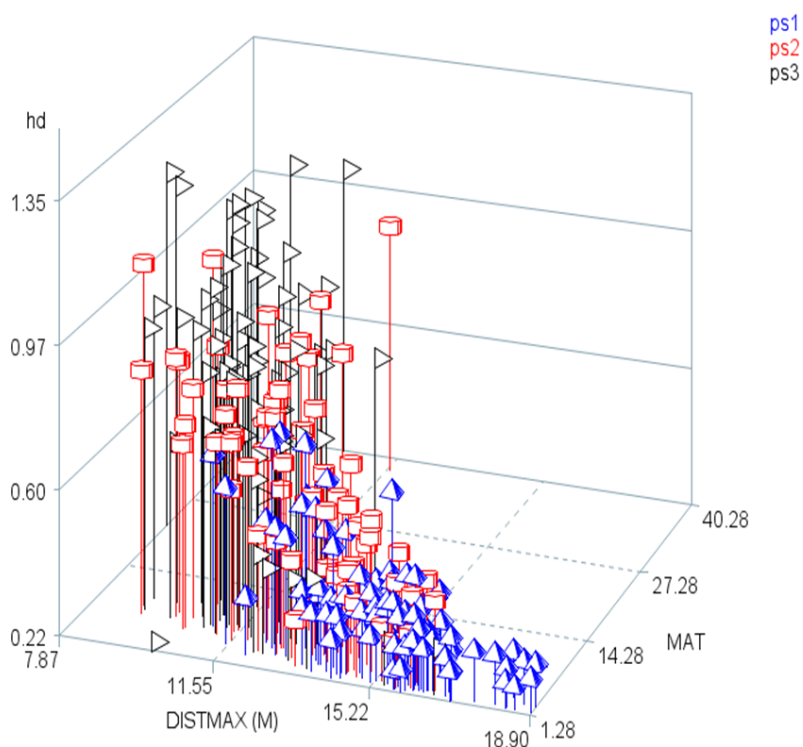
Variável	Média	Mínimo	Máximo	Desvio
IPAg	6,37	0	63,4	9,95
d	34,95	10,1	78,9	18,26
h	18,1	4,0	25,3	4,32
ICJ.SA	65,87	18,99	387,44	47,83
ICJ.MA	4,32	1,01	38,74	3,47
ICJ.MAXA	16,38	1,69	350,74	27,92
ICJ.NA	17,25	5,00	36,0	7,05
ICJ.SAF	33,49	0,1	102,26	15,53
ICJ.MAF	1,52	0,1	5,44	0,91
ICJ.MXAF	6,0	0,1	55,16	5,89
ICJ.NF	25,92	8,0	71,0	11,04
ICJ.SAT	99,37	34,4	416,3	53,44
ICJ.MAT	5,84	1,5	40,5	4,06
ICJ.MXAT	22,49	3,	354,4	28,9
ICJ.NT	43,17	14,0	90,0	14,48
ICB	9,14	0,33	794,0	75,49
ICH	4,33	0,1	27,62	4,54

Onde: IPAg= incremento periódico anual em área basal (cm<sup>2</sup>/ano); d= diâmetro (cm); h= altura total (m); ICJ.SA= soma de "A" entre *A. angustifolia*, ICJ.MA= média de "A" entre *A. angustifolia*; ICJ.MXA= máximo A entre *A. angustifolia*; NA= número de competidoras entre *A. angustifolia*; ICJ.SAF= soma de "A" entre *A. angustifolia* e folhosas; ICJ.MAF= média de "A" entre *A. angustifolia* e folhosas; ICJ.MXF= máximo A entre *A. angustifolia* e folhosas; NF= número de folhosas competidoras; SAT= soma de "A" total de *A. angustifolia* e folhosas; ICJ.MAT= média de "A" total de *A. angustifolia* e folhosas; ICJ.MXAT= máximo total de *A. angustifolia* e folhosas; NT= número total de competidoras *A. angustifolia* e folhosas; ICH = índice de competição Hegyi; ICB = índice de competição de BAL.

A relação altura/diâmetro das árvores dominantes variou de 0,22 a 0,60, já árvores codominantes e dominadas mostraram relação h/d de 0,50 a 1,35. As árvores com menor relação h/d apresentaram menores valores de ICJ.MAT, com nível de competição menor, independente da posição social.

A relação h/d influi sobre a forma do fuste das árvores e responde a competição existente na floresta. Segundo Assmann (1968), a posição sociológica também influencia a forma do fuste. Nesse contexto, árvores dominadas, devido à alta competição a que estão sujeitas, apresentam maior ICJ.MAT, e os altos valores da relação h/d apresentam fuste com menor conicidade, enquanto as dominantes e codominantes possuem o fuste mais afilado quando comparados aos primeiros. Portanto, árvores com diâmetros grandes incrementam mais em área transversal que as árvores altas e finas.

Figura 11 – Índice de Johann expresso pela relação  $h/d$ , distância máxima entre (DISTMAX) as árvores e a média do valo de “A” total (ICJ.MAT) em diferentes posições sociológicas de *Araucaria angustifolia* na FLONA de São Francisco de Paula, RS



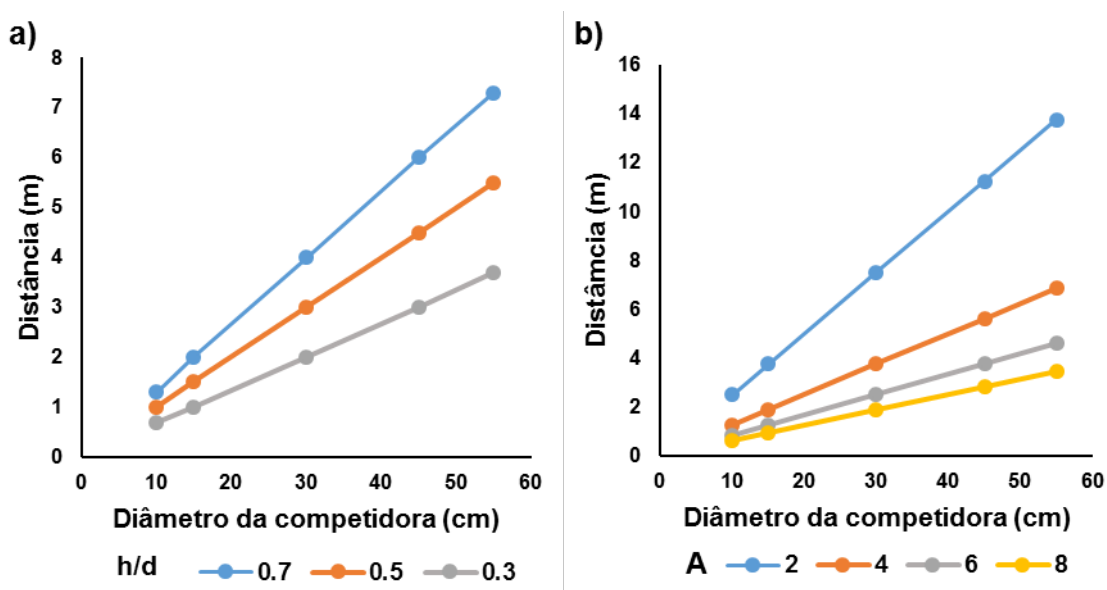
Onde: Pirâmide = posição sociológica 1 (PS1); Cilindro: posição sociológica 2 (PS2); Triângulo: posição sociológica 3 (PS3).  
Fonte: Autora (2018).

A diferença na forma do fuste da árvore acontece pela competição assimétrica, concorrência por luz. Essa competição reflete na dimensão das variáveis biométricas. Árvores com baixo nível de competição possuem maior incidência de luz nas copas, apresentam maior incremento em diâmetro que o incremento em altura, tornando o fuste menos afilado (ANDRADE et al., 2007; CAMPOS; LEITE, 2009).

Uma árvore objetivo possui diferentes valores de ICJ.MAT, um para cada competidora, o que o torna muito dinâmico. Para uma determinada relação  $h/d$  o valor de “A” aumenta conforme diminui a distância entre as árvores e aumenta o diâmetro da competidora (Figura 12.a).

Uma árvore competidora com 10 cm de diâmetro proporciona aumento no valor de “A” à medida que reduz a distância com a árvore objetivo (Figura 12.b). Portanto, com a proximidade entre as árvores, independente do diâmetro da árvore competidora, a competição é mais evidente (maior valor de “A”).

Figura 12 – Relações das variáveis do Índice de Johann, diâmetro da árvore competidora, relação h/d da árvore objetivo, distância e valor de “A” para *Araucaria angustifolia* na FLONA de São Francisco de Paula, RS



Onde: a) relações das variáveis distância (m) e diâmetro da árvore competidora (cm) para diferentes relações h/d; b) relações das variáveis distância (m) e diâmetro da árvore competidora (cm) para diferentes valores de “A”.

Fonte: Autora (2018).

O índice de Johann representa a competição de acordo com o espaço que uma árvore está das suas circunvizinhas, definindo a distância que a árvore objetivo precisa estar das suas competidoras para que alcance o seu crescimento potencial. O valor de “A” como grau do desbaste estabelece a área de corte das árvores, em que quanto menor o seu valor, maior será o raio de desbaste a ser implantado, maior a distância entre as árvores. O presente estudo em Floresta Ombrófila apresentou as mesmas tendências proposta por Johann (1982).

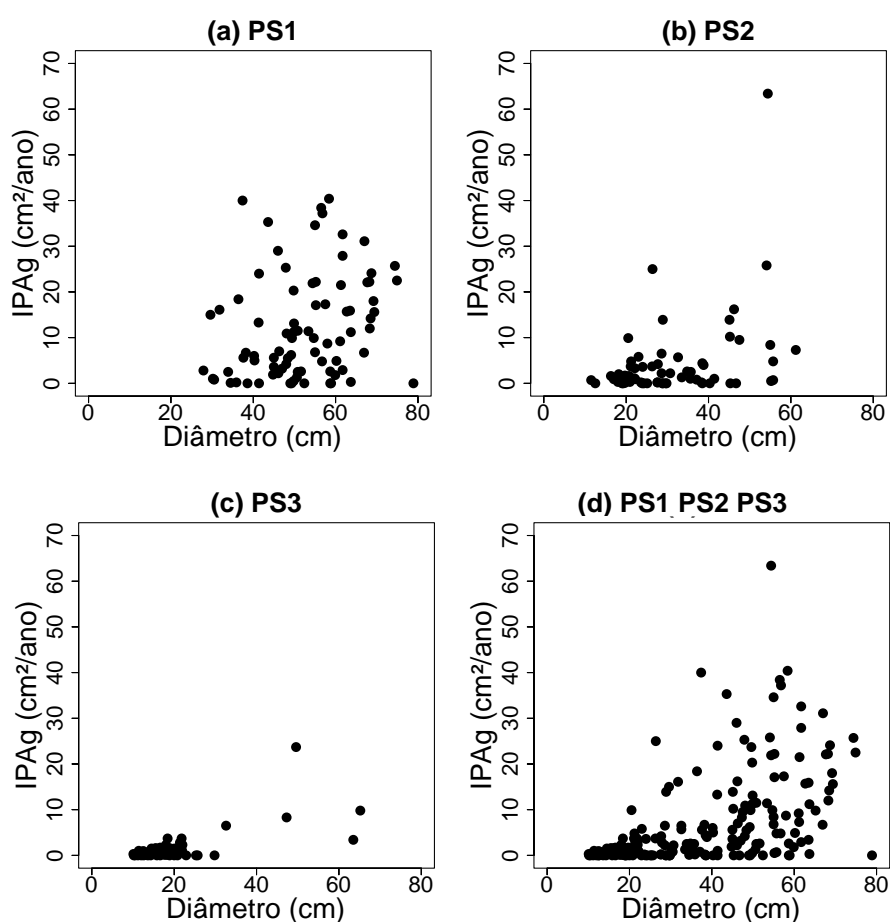
#### 4.3 INCREMENTO PERIÓDICO ANUAL EM ÁREA TRANSVERSAL E ÍNDICES DE COMPETIÇÃO DE JOHANN, HEGYI, BAL e FAB DE BITTERLICH NA FLONA DE SÃO FRANCISCO DE PAULA, RS

A distribuição do incremento periódico anual em área transversal aumenta com o aumento do diâmetro, eles são diretamente proporcionais (Figura 13). Essa característica foi observada nas diferentes posições sociológicas (PS) em que as árvores dominantes (PS1) alcançaram os maiores diâmetros. Árvores codominantes (PS2) apresentaram diâmetros intermediários e as dominadas (PS3), os menores diâmetros. Resultado semelhante foi encontrado por Chassot et al. (2011) e Costa et al. (2015),

indicando que as árvores de *A. angustifolia* apresentam dinâmica de crescimento diferente de acordo com posição sociológica.

Algumas árvores PS1 e PS2 apresentaram incremento em área transversal muito baixo ou mesmo zero, embora sejam árvores de grande porte. O ritmo de crescimento dessas árvores era lento ou estagnado, o que remete a dificuldades ambientais, com menor disponibilidade de recursos, solo pedregoso e características da copa.

Figura 13 – Incremento periódico anual em área transversal em função do diâmetro de árvores dominantes (a), codominantes (b), dominadas (c) e para as três posições sociológicas (d) para *Araucaria angustifolia* na FLONA-SFP,RS



Onde: PS1= árvores dominantes; PS2= árvores codominantes; PS3= árvores dominadas, IPAg= Incremento em área transversal (cm²/ano).

Fonte: Autora (2018).

O IPAg decresceu exponencialmente a medida que aumenta a competição expressa em Índice de Johann (Figura 14) com tendência próxima a J-invertido. Grande

número de árvores apresentou menores valores para a média de “A” total (ICJ.MAT), mas manteve incrementos reduzidos.

Na PS1, observaram-se árvores com grande variação de diâmetros e incrementos igualmente variáveis, para o mesmo valor de ICJ.MAT. Além disso, árvores em posições sociológicas diferentes apresentam níveis de competição próximos, medidos pelo ICJ.MAT.

A tendência da distribuição dos incrementos periódicos anuais em área transversal em função do ICJ.MAT está associada com a classificação da competição. No estudo, as árvores competidoras poderiam estar acima ou abaixo da copa da árvore objetivo, diferentemente de algumas metodologias que consideram competidoras apenas árvores em que as copas se tocam. As árvores abaixo da árvore objetivo não conseguem atingir o dossel e competem pela água pelos nutrientes do solo.

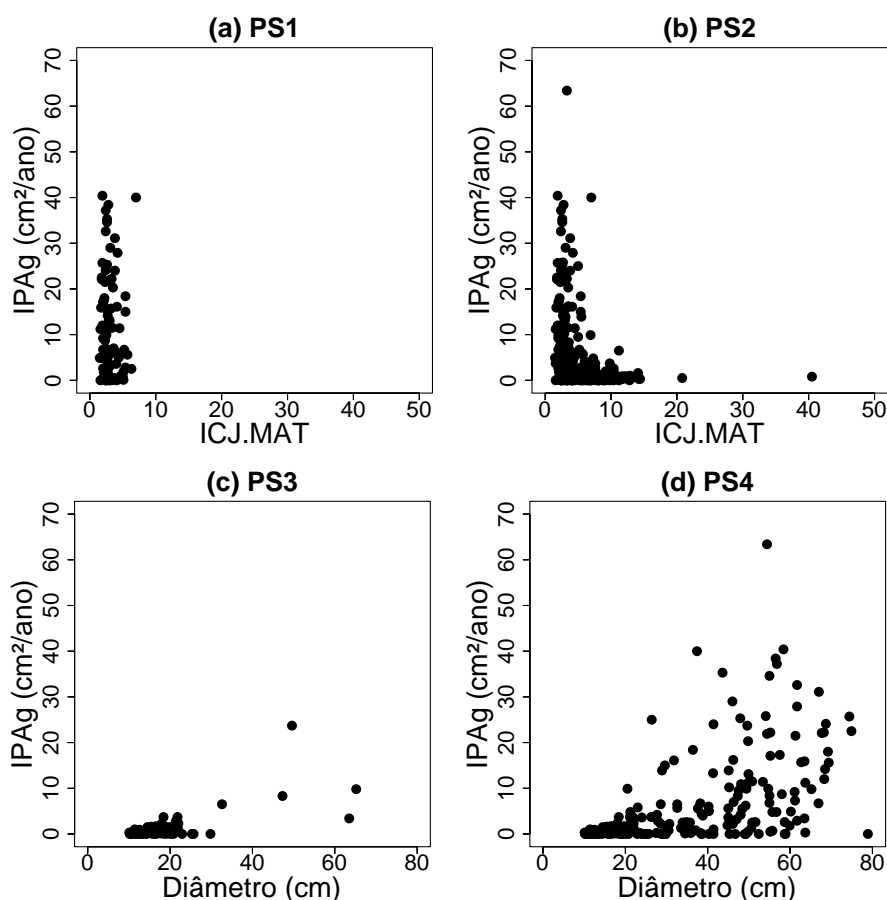
Nesse contexto, o valor da ICJ.MAT pode ser igual para duas árvores objetivo com diferentes IPAg. A primeira apresentando-se com apenas uma competidora muito próxima e a segunda, com um número maior de árvores competidoras, estando estas distantes da árvore objetivo.

A diferença entre os incrementos pode estar relacionada com as características das copas das árvores objetivo, tendo em vista que copas mais saudáveis possuem maior absorção de luz, contribuindo para o aumento da eficiência dos processos fotossintéticos que acarretam o aumento do crescimento da árvore (TAIZ; ZEIGER, 2009). Nesta direção, Thorpe et al. (2010) descreveram que a competição exercida pela árvore vizinha dependia do tamanho, da espécie e da distância das árvores, em que cada dimensão de copa apresentava variação nas respostas do índice de competição, o que destaca a complexidade das interações competitivas da floresta.

O’Neal et al. (1994) assinalaram que o grau de competição entre árvores de um determinado nível de estoque depende das características das copas, pois duas árvores podem ter o mesmo  $d$  e estarem a uma mesma distância em relação a uma árvore objetivo, mas possuírem copas muito diferentes, exercendo influências diferenciadas na copa da árvore objetivo.

A distância a ser mantida entre as árvores nos cortes seletivos de liberação, tomando como referência o incremento periódico anual em área basal, não pode ser definido pelo valor de “A” do índice de Johann. Isso ocorreu em decorrência da característica de *A. angustifolia* de redução do incremento, mas sem que a árvore morra, e da dinâmica do índice de Johann apresentada.

Figura 14 – Incremento periódico anual em área transversal em função do valor médio de “A” Total (ICJ.MAT) de árvores dominantes (a), codominantes (b), dominadas (c) e para as três posições sociológicas (d) para *Araucaria angustifolia* na FLONA-SFP, RS



Onde: PS1= árvores dominantes; PS2= árvores codominantes; PS3= árvores dominadas, IPAg= Incremento anual em área transversal (cm²/ano); ICJ.MAT= valor médio de “A” Total.

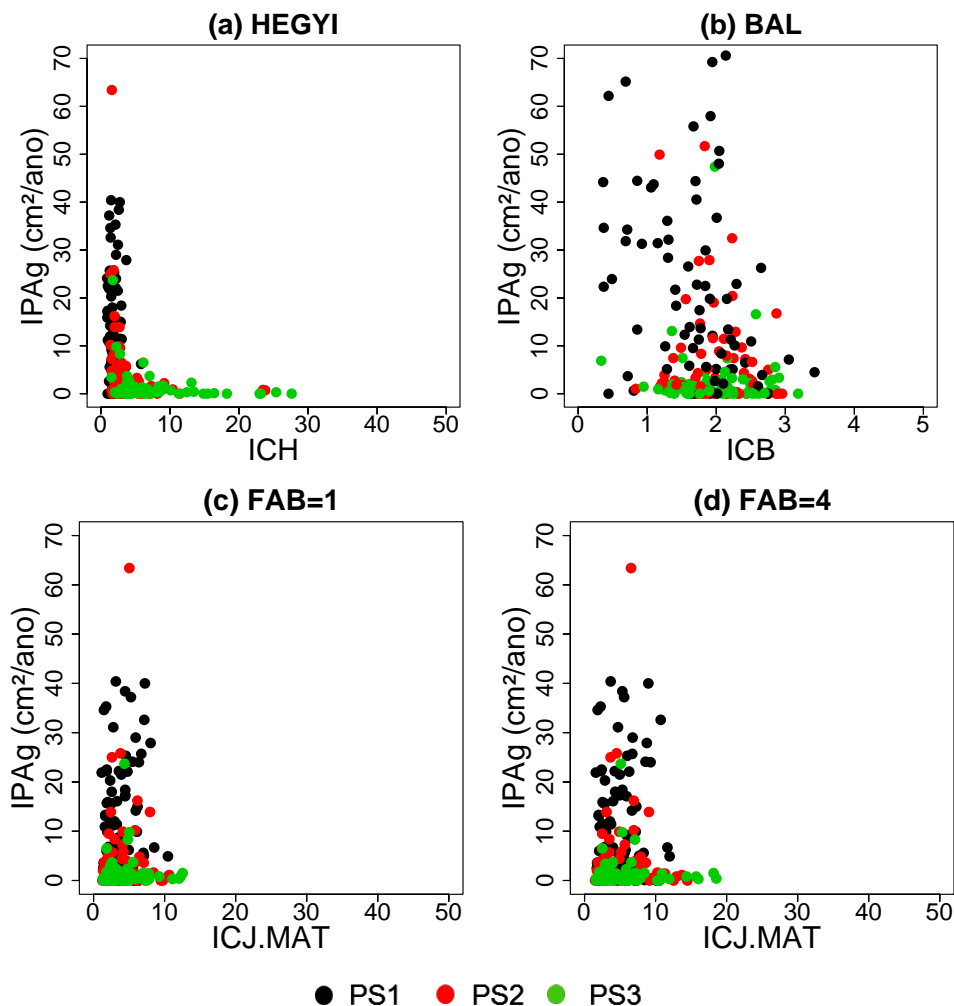
Fonte: Autora (2018).

Mattos (2007), utilizando o índice de Johann, optou por testar a concorrência exercida em *Cabralea canjerana* (Vell.) Mart., *Cedrela fissilis* Vell. e *Cordia trichotoma* (Vell.) Arrab. ex Steud. pelo A-máx o grau de concorrência da maior concorrente, o A-2 das duas maiores e o A-3 das três maiores concorrentes. Neste estudo, mesmo com número menor de árvores competidoras, não foi observada relação do índice com o IPAg, visto que as correlações não foram significativas.

O índice de Hegyi (ICH) apresentou a mesma distribuição de valores mostrados no índice de Johann, ocorrendo a diminuição do incremento periódico anual em área transversal com o aumento da competição (Figura 15.a.), havendo também árvores com incremento zero ou próximos de zero em níveis baixos de competição. Como no índice de Johann, foram observadas árvores de posições sociológicas diferentes que apresentavam o mesmo incremento e mesmo valor de Índice de competição.



Figura 15 – Índice de competição de Hegyi (a), BAL (b), distribuição do valor de “A” total (ICJ.MAT) para seleção de árvores competidoras pelo Fator de Área Basal, FAB=1 (c) e FAB=4 (d), em três posições sociológicas de *Aracuaria angustifolia* na FLONA-SFP, RS



Onde: FAB= fator de área basal; ICH= índice de competição de Hegyi; ICB= índice de competição de BAL; IPAg= Incremento periódico anual em área transversal (cm<sup>2</sup>/ano); ICJ.MAT= valor médio de “A” Total; PS1= árvores dominantes; PS2= árvores codominantes; PS3= árvores dominadas.  
Fonte: Autora (2018).

No estudo conduzido com o índice de Hegyi, árvores que encontravam-se na PS2 e estavam submetidas a menor competição que as árvores da PS1, demonstrando que a magnitude expressa pelo índice de competição sobre o crescimento das árvores tem efeito distinto nas posições sociológicas. Árvores PS2 podem ser mais jovens e estarem com ritmo de crescimento acelerado mesmo sofrendo competição das árvores maiores.

O IPAg quando relacionado ao índice de BAL (Figura 15.b), apresentou distribuição aleatória, sem tendência definida. Esse resultado pode estar associado ao critério utilizado para a seleção das árvores competidoras, definidas em relação ao raio de copa de árvores de mesmo diâmetro, crescendo sem competição e também com a caracterização da competição que considera competidoras apenas as árvores maiores que a árvore objetivo.

Os índices dependentes da distância (Johann e Hegyi) apresentaram melhor desempenho em descrever o comportamento exponencial do incremento periódico anual em área transversal que o índice independente da distância (BAL) para a floresta em estudo. Comparando a capacidade de descrição da competição com índices independente e dependente da distância, Mailly et al. (2003) verificaram maior correlação com os que levam em consideração a espacialidade das árvores.

A utilização dos fatores de área basal (FAB=1; FAB=4) na definição das árvores competidoras mostrou comportamento semelhante à classificação obtida pela zona de influência das copas, com o incremento periódico anual em área transversal diminuindo, quase que exponencialmente, com o aumento da média total do valor de "A" (ICJ.MAT).

Os fatores utilizados não apresentam diferença quanto à distribuição dos dados, ocorrendo apenas mudança de escala nos valores de ICJ.MAT, em que, no FAB=1 (Figura 15.c), o valor máximo ficou em torno de 10,0 e, no FAB=4 (Figura 15.d), cerca de 20,0. O ângulo crítico do fator de área basal 4 é maior, classificando como competidoras menor número de árvores. Já o fator de área basal 1 com ângulo crítico menor inclui mais árvores como competidoras, o que justifica a diferença nos valores de ICJ.MAT.

A variação no raio amostral usado na seleção de árvores competidoras é dependente do  $d$  das árvores e faz com que o raio seja maior para as árvores de maior  $d$ . Assim, árvores de maior diâmetro possuem número maior de competidores e, conseqüentemente, um índice de competição maior. Essa relação pode não ser real e indicar somente que o crescimento observado é positivamente correlacionado com o tamanho da árvore objetivo (CURTO, 2015).

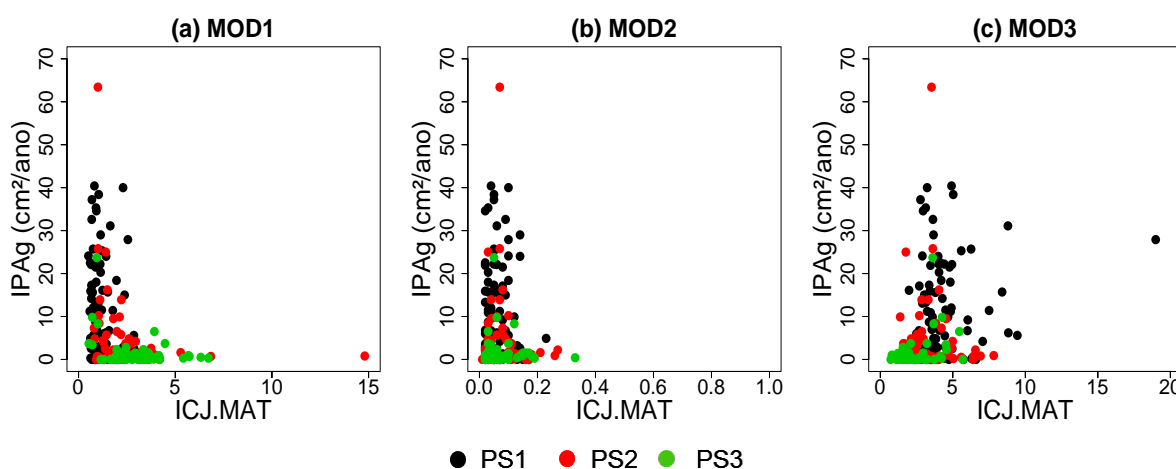
### 4.3.1 Modificações na estrutura o índice de Johann na FLONA de São Francisco de Paula, Rs

Modificações no índice de Johann com a inclusão da altura da árvore competidora mostram diferentes tendências em relação ao incremento periódico anual em área transversal (Figura 16).

A modificação 1 (MOD 1),  $A = (h_j/d_j \cdot h_i/dist_{ij})$  apresentou tendência semelhante ao demonstrado pelo índice de Johann original. Substituir a variável diâmetro da competidora pela altura implica reduzir o valor máximo de ICJ.MAT de 40,0 para 15,0. Apenas a escala foi alterada. A distribuição dos dados foi mantida. Nesse contexto, utilizar altura ou diâmetro da competidora no índice de Johann manteve igual a quantificação da competição, uma vez que a correlação entre altura e diâmetro é alta.

Na modificação 2 (MOD 2)  $A = (h_j/d_j \cdot h_i/d_i)/dist_{ij}$ , que inclui a relação h/d da competidora, os valores da média de “A” total foram drasticamente reduzidos para valores menores que 0,3. A distribuição dos dados de incremento não apresentou mudança na tendência anterior, assim como ocorreu com a modificação 3 (MOD 3), que introduziu a relação hd da competidora no lugar da relação hd da árvore objeto, passando a expressar A pela relação  $A = (d_j/dist_{ij} \cdot h_i/d_i)$ .

Figura 16 – Modificações propostas no índice de Johann em função do incremento periódico anual em área transversal de *Araucaria angustifolia* em Floresta Ombrófila Mista da FLONA-SFP, RS



Onde: (a) Modificação 1 – MOD1; (b) Modificação 2 – MOD2 e (c) Modificação 3 – MOD3; IPAg= Incremento periódico anual em área transversal (cm<sup>2</sup>/ano); ICJ.MAT= valor médio de “A” Total; PS1= árvores dominantes; PS2= árvores codominantes; PS3= árvores dominadas.

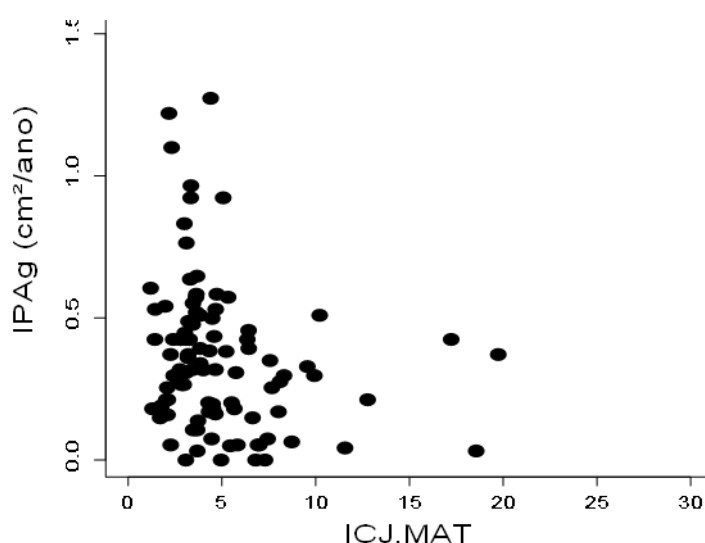
Fonte: Autora (2018).

Nas populações com dossel dividido em camadas, a altura relativa da árvore objetivo expressa a sua posição sociológica atual em comparação com os vizinhos (HOLMES; REED, 1991), podendo a altura melhorar o desempenho dos índices de competição (CASTAGNERI et al., 2008). Neste estudo realizado em floresta com alta densidade, utilizar a altura ou o diâmetro na determinação do índice de Johann não alterou o comportamento e o desempenho da descrição da dinâmica de competição dentro da floresta.

#### 4.3.2 Análise das relações de competição expressas com o índice de Johann para dados amostrados na FLONA de Irati, RS

A análise da relação da média dos valores de “A” calculado para as árvores de *A. angustifolia* e demais folhosas (ICJ.MAT) definidas como competidoras pelo critério de dimensão máxima da copa para dados da FLONA de Irati, Paraná, apresentou distribuição com dispersão dos valores de incremento semelhante ao encontrado na Flona de São Francisco de Paula (Figura 17). Árvores com baixo incremento periódico anual em área transversal e árvores com alto incremento apresentaram o mesmo nível de competição (ICJ.MAT) no período analisado.

Figura 17 – Distribuição incremento periódico anual em área transversal (IPAg) em função do valor médio de “A” total (ICJ.MAT) para *Araucaria angustifolia* na FLONA de Irati, PR.



Fonte: Autora (2018).

Os resultados obtidos na FLONA de Irati comprovam que o índice de Johann é muito dinâmico, principalmente em florestas de baixo crescimento e alta densidade, não sendo suficiente para descrever a variação do IPAg, como variável descritora isolada.

#### 4.4 MODELAGEM DO INCREMENTO PERIÓDICO ANUAL EM ÁREA TRANSVERSAL DE *Araucaria angustifolia* NA FLONA DE SÃO FRANCISCO DE PAULA, RS

##### 4.4.1 Modelagem com variáveis dendrométricas, índices de competição no procedimento “Stepwise”

A análise de correlação de Pearson (Tabela 18) comparando o incremento periódico anual em área transversal (IPAg) com as variáveis dendrométricas,  $d$  e  $h$ , e os valores de “A” calculados possibilitou selecionar:  $d$ ,  $h$ , ICJ.MA, ICJ.MAF, ICJ.NF, ICJ.MAT, NT para descrever o incremento, pois apresentou as maiores correlações significativas a 5% de probabilidade.

As correlações dos índices de competição foram fracas, de acordo com Callegari-Jacques, (2003), inferiores a 40%. O valor de correlação fraca ocorre devido à grande variação de incremento observada em árvores do mesmo tamanho ( $d$ ,  $h$ ) e sanidade, como também descrito por Cunha e Finger (2013).

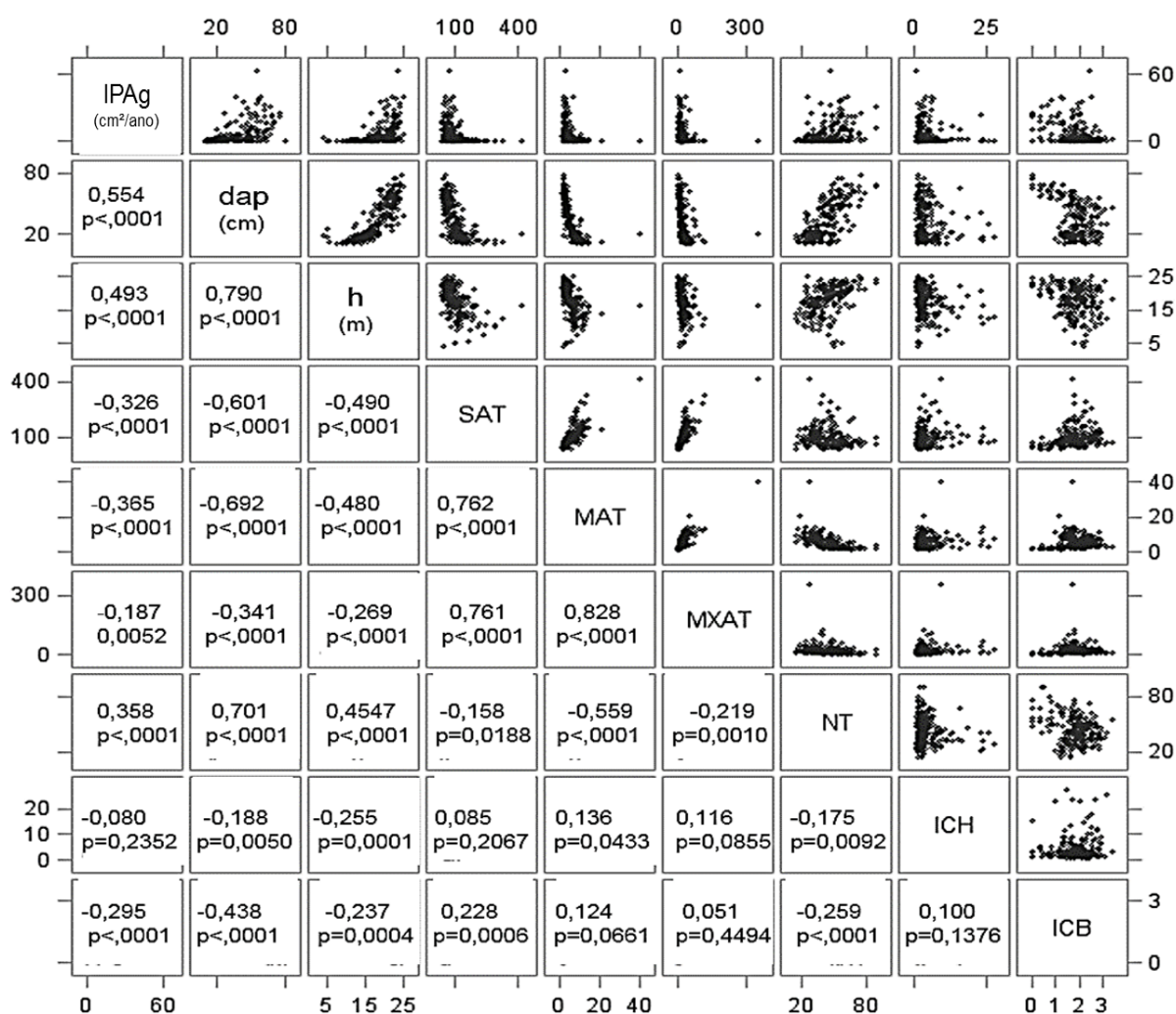
Os índices de competição apresentaram correlação negativa com o IPAg, demonstrando que quanto maior a competição, menor será o incremento da árvore, fato também relatado por Ricken (2014), Costa e Finger (2017) em estudos com *A. angustifolia* e por Silveira et al. (2015) para *Trichilia clausenii*.

A modelagem do IPAg pelo procedimento STEPWISE e das variáveis selecionadas na correlação de Pearson resultou na seleção e ajuste do modelo sem o intercepto, tendo, como variáveis independentes, o diâmetro e a média de “A” total de *A. angustifolia* e folhosas, pois essa foi a simulação que apresentou maior correlação. Nesse caso, a competição intra e interespecífica possui maior relação com o IPAg.

$$IPAg = 0,23226 \cdot \ln(d) - 0,26207 * \ln(ICJ.MAT) \quad (16)$$

Onde: IPAg= incremento periódico anual em área transversal (cm<sup>2</sup>/ano);  $d$ = diâmetro (cm); LNICJ.MAT= logaritmo da média de “A” total de *A.angustifolia* e folhosas.

Figura 18 - Correlação de Pearson do incremento periódico anual em área transversal de *Araucaria angustifolia* com variáveis dendrométricas e índices de competição na FLONA de São Francisco de Paula, RS



Onde: p= probabilidade a 95%; IPAg= incremento periódico anual em área transversal (cm²/ano); d= diâmetro (cm); h= altura total (m); S "A"= soma de "A" entre *A. angustifolia*, MA= média de "A" entre *A. angustifolia*; ICJ.MA= máximo A entre *A. angustifolia*; NA= número de competidoras entre *A. angustifolia*; SAF= soma de "A" entre *A. angustifolia* e folhosas; MAF= média de "A" entre *A. angustifolia* e folhosas; MXF= máximo A entre *A. angustifolia* e folhosas; NF= número de folhosas competidoras; SAT= soma de "A" total de *A. angustifolia* e folhosas; ICJ.MAT= média de "A" total de *A. angustifolia* e folhosas; MXAT= máximo total de *A. angustifolia* e folhosas; NT= número total de competidoras *A. angustifolia* e folhosas; ICH= índice de competição Hegyi; ICB = índice de competição de BAL.  
Fonte: Autora (2018).

Os parâmetros estimados foram significativos a 5%. O coeficiente de determinação ajustado e o erro padrão apresentaram valores de 8,63% e 18,93 cm²/ano, respectivamente. O teste de White e Shapiro-Wilk-W foram significativos, com valores de 17,59 (p=<0,0035) e 0,82 (p=<0,0001), indicando heterogeneidade de variância da variável IPAg, não atendendo a condição de normalidade dos resíduos.

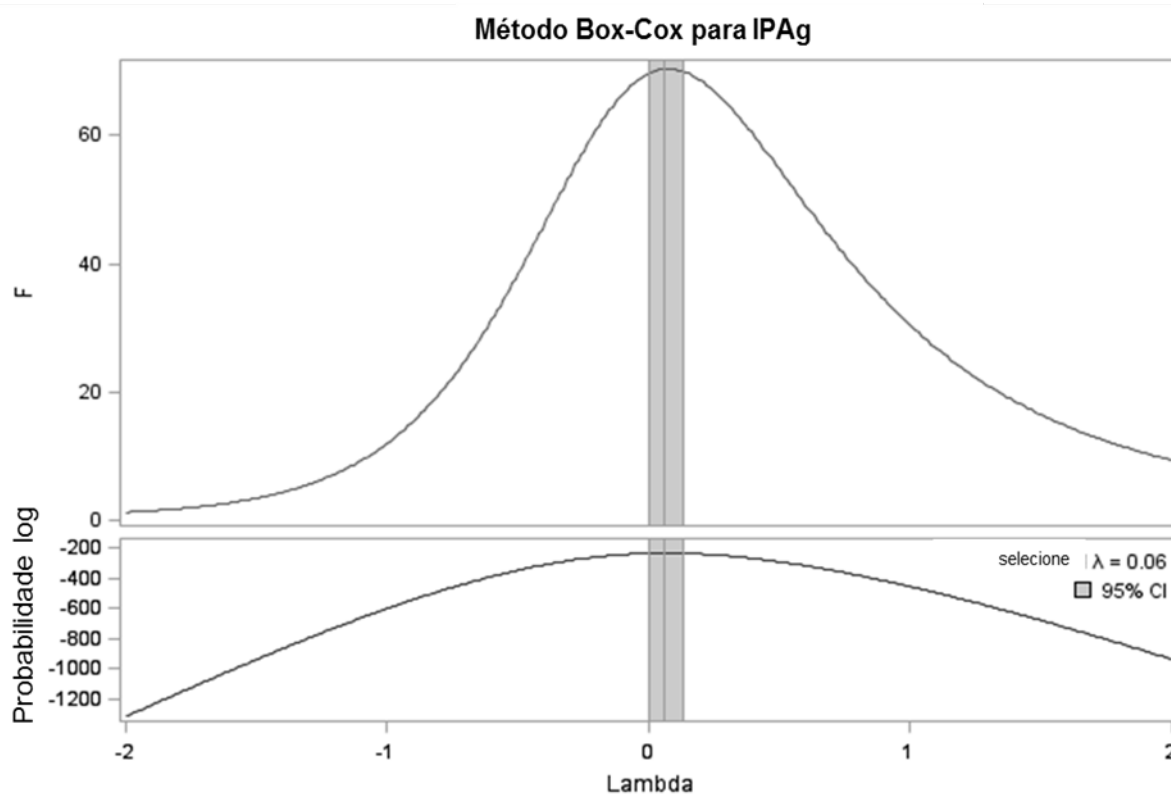
Desse modo, houve necessidade da transformação Box-Cox na variável independente IPAg que apontou um valor lambda de 0,06, com zero contido no intervalo de confiança (Figura 19), definindo a transformação logarítmica na variável IPAg.

O modelo foi ajustado novamente no MLG, família exponencial de distribuições, e apresentou parâmetros estimados significativos a 5%, definido na equação (14). O valor do coeficiente de determinação foi 13,70% e erro padrão de 18,39 cm<sup>2</sup>/ano essas estatísticas foram melhores que no modelo pelo procedimento STEPWISE.

$$IPAg = -8,1855 + 2,4884 \cdot \ln(d) + 0,7063 \cdot \ln(ICJ.MAT) \quad (17)$$

Onde: IPAg= incremento periódico anual em área transversal (cm<sup>2</sup>/ano); d= diâmetro (cm); ln(ICJ.MAT)= logaritmo da média de "A" total de *A.angustifolia* e folhosas; link= função de ligação; dist= distribuição.

Figura 19 – Análise de Box-Cox do com o valor do Lambda adequado para descrever o incremento periódico anual em área transversal (IPAg) de *Araucaria angustifolia* na FLONA de São Francisco de Paula, RS



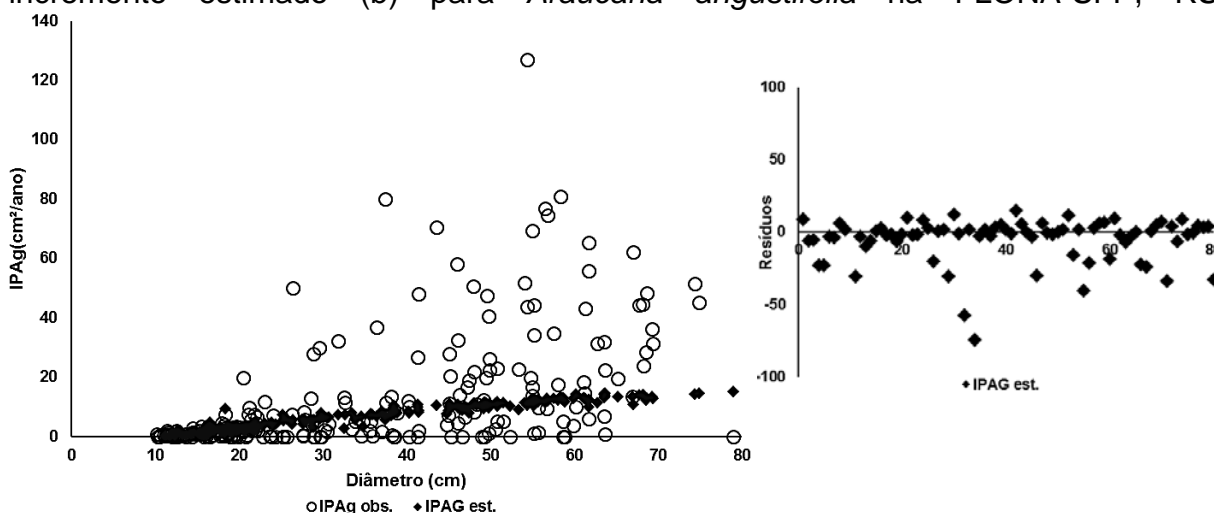
Fonte: Autora (2018).

A análise gráfica dos valores ajustados e os valores observados, Figura 20, mostraram uma linha de regressão com baixa inclinação, explicando o baixo valor do coeficiente de determinação, com distribuição dos resíduos com tendência de subestimativas.

Os dados observados na floresta apresentaram grande concentração de valores próximos de zero, ou seja, IPAg muito baixo, independente do valor do diâmetro. Em crescimento estagnado árvores com valores altos de  $d$  é esperado encontrar maiores valores de incremento, pois seriam árvores bem iluminadas, ocupando o estrato superior da floresta. Entretanto estas árvores tiveram menores incrementos, explicado pela forma da distribuição em leque dos dados observados à medida que aumentou a dimensão do diâmetro.

Esse resultado indicou claramente que o índice de competição de Johann, embora contendo atributos de diâmetro e altura da árvore objetivo, diâmetro da árvore competidora e a distância entre árvores, não conseguiu descrever a variabilidade, sendo necessária a inclusão de uma ou mais variáveis explicativas para melhorar o ajuste e a precisão do modelo. Portanto, uma investigação em uma subamostra da floresta foi realizada com objetivo de avaliar o estado de sanidade das copas das árvores.

Figura 20 – Incremento periódico anual em área transversal observado (IPAg obs.) e estimado (IPAg est.) em função do diâmetro (a) e distribuição dos resíduos em função incremento estimado (b) para *Araucaria angustifolia* na FLONA-SFP, RS



Fonte: Autora (2018).

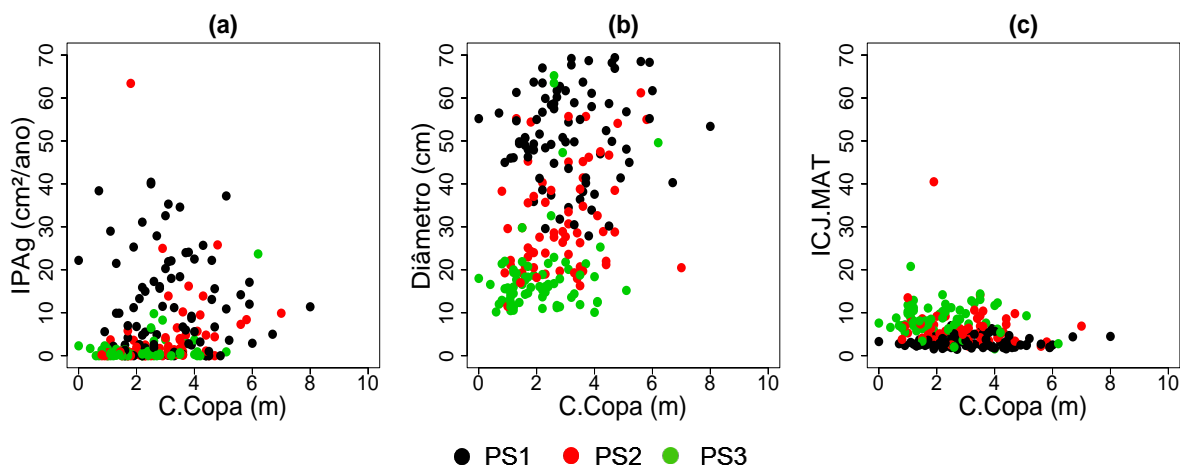


#### 4.4.2 Modelagem com variáveis dendrométricas, índices de competição e variáveis qualitativas de copa utilizando a abordagem de Modelos Lineares Generalizados (MLG) na FLONA-SFP, RS

A diversidade de respostas de incremento observada para valores semelhantes de ICJ.MAT para árvores de mesmo diâmetro evidenciou a necessidade de inclusão de novas variáveis como descritoras do crescimento.

Na floresta, em amostragem específica, foi constatado que, sob alta competição, há redução das dimensões da copa da *Araucaria angustifolia*, mesmo em árvores de grandes diâmetros (Figura 21). A redução das copas era sempre mais severa quanto maior e mais próximo localizava-se o competidor e ocorria tanto lateralmente quanto de baixo para cima e vice-versa. Esse fato explica a heterogeneidade de incremento encontrada em árvores de mesmo diâmetro, altura e competição descritas pelos índices de Johann, Hegyi e FAB.

Figura 21 - Dispersão do comprimento de copa em função do incremento periódico anual em área transversal (IPAg) (a), do diâmetro (b) e do valor médio de "A" total (ICJ.MAT) (c) para *Araucaria angustifolia* (Bertol) Kuntze na FLONA de São Francisco de Paula, RS



Onde: C. Copa = comprimento de copa (m); IPAg= incremento periódico anual em área transversal; ICJ.MAT= valor médio de "A" total; PS1= árvores dominantes; PS2= árvores codominantes; PS3= árvores dominadas.

Fonte: Autora (2018).

Na amostragem, observou-se que as árvores dominantes com baixo incremento em área transversal apresentaram copa de comprimento reduzido, semelhante ao encontrado em árvores dominadas, indicando a possibilidade do índice não carac-

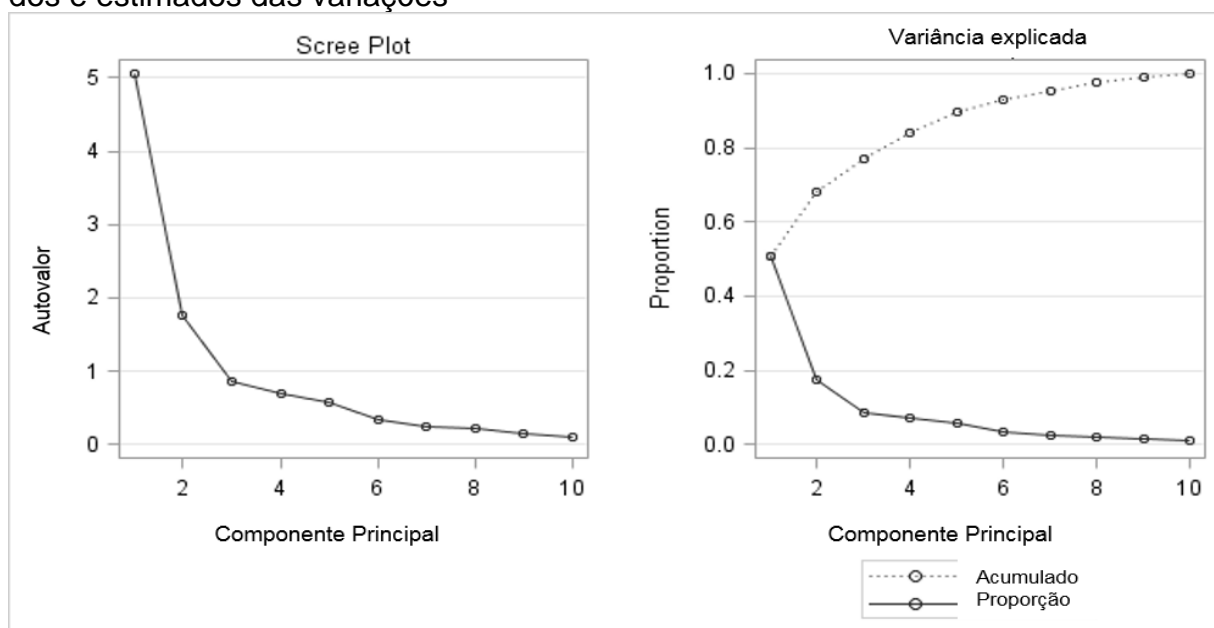
terizar a competição real existente na floresta e que a competição pode descaracterizar o crescimento normal da copa (Figura 21.c). Essa constatação em floresta de *A. angustifolia* justifica a caracterização da copa, a medição de variáveis de dimensão e o seu emprego como variáveis descritoras em modelos de regressão.

#### 4.4.2.1 Análise de Componentes Principais e Agrupamentos

Dados de caracterização do ambiente na floresta, da condição sociológica das árvores, bem como da copa observadas em uma subamostra com 90 árvores de *A. angustifolia*, das quais cinco mortas, sendo 79 árvores tomadas como objetivo. A floresta apresentou elevada quantidade de serrapilheira, em muitos pontos com dossel fechado e com copas de diferentes formas e tamanhos.

A análise de componentes principais (ACP) identificou, pelo *scree-plot* (Figura 22), dois componentes como suficientes para descrever a maior parte da variação dos dados (68,2%). O primeiro componente (CP1) apresentou autovalor de 5,06 contribuindo com 50,6% da variância total explicada, enquanto o segundo componente (CP2) obteve 1,77 no autovalor, ou seja, 17,7%. Os demais componentes possuem a mesma magnitude e são relativamente pequenos (Tabela 7).

Figura 22 – Análise de componentes principais com *scree-plot* e os valores acumulados e estimados das variações



Fonte: Autora (2018).

Tabela 7 - Autovalores da matriz de correlação e os autovetores.

Autovalores da Matrix de Correlação					Autovetores		
	Autovalor	Diferença	Proporção	Acumulado	VAR	CP1	CP2
1	5,056	3,288	0,506	0,506	FOR	0,318	0,368
2	1,767	0,904	0,177	0,682	FORVERT	0,137	0,462
3	0,863	0,161	0,086	0,769	DVERTIC	-0,041	0,596
4	0,702	0,137	0,070	0,839	FV	0,365	0,246
5	0,566	0,235	0,057	0,895	PS	0,384	-0,039
6	0,331	0,082	0,033	0,929	DIM	0,387	0,121
7	0,249	0,035	0,025	0,9	d	-0,367	0,296
8	0,214	0,074	0,021	0,975	h	-0,357	0,117
9	0,139	0,026	0,014	0,989	IPAg	-0,294	0,073
10	0,113		0,011	1,0	ICJ.MAT	0,316	-0,336

Onde: var= variáveis; CP1= primeiro componente principal; CP2= segundo componente principal; CP3= terceiro componente principal; FOR= forma; FORVERT= forma vertical da copa, DVERTIC= distância entre pseudo-verticilos; FV= porcentagem de folhas verdes; PS= posição sociológica; DIM=dimensão da copa; d= diâmetro (cm); h= altura total (m); IPAg= incremento periódico anual em área transversal (cm<sup>2</sup>/ano); ICJ.MAT= média de "A" total de *A. angustifolia* e folhosas.

Fonte: Autora (2018).

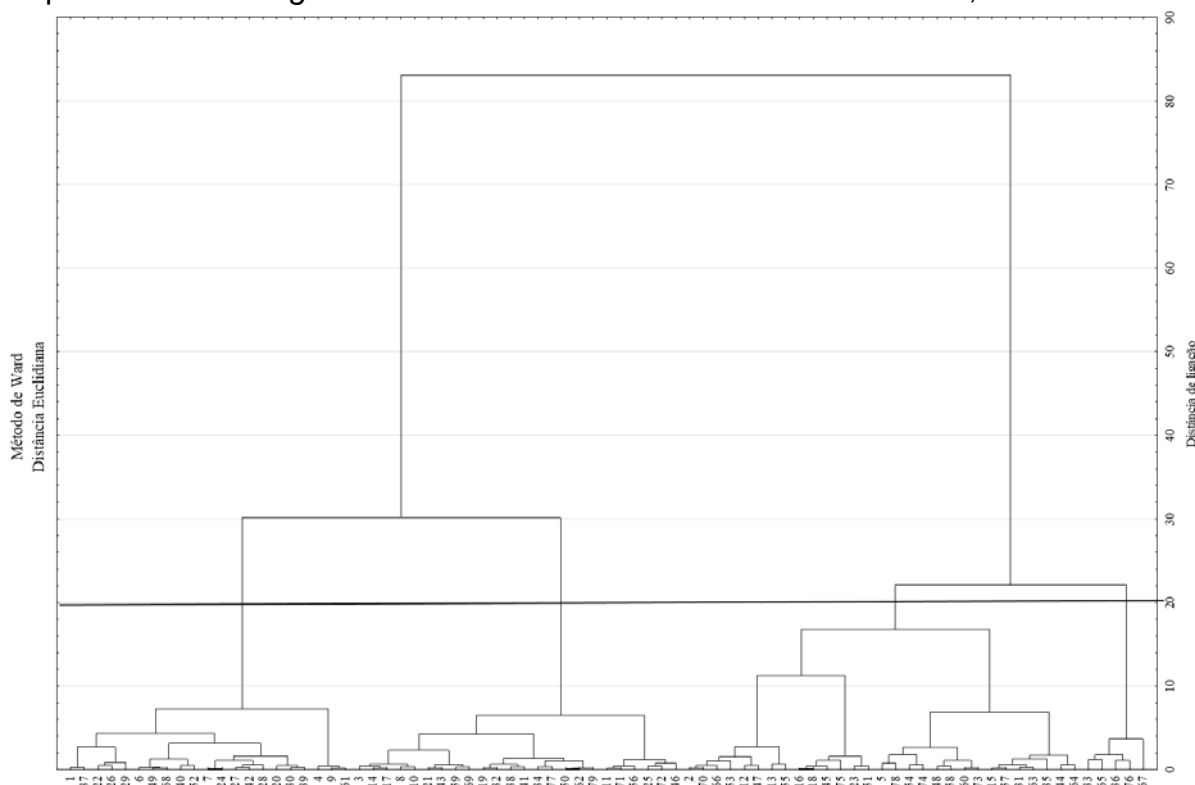
Os componentes gerados na ACP dividiram os dados em agrupamento hierárquico, determinando três grupos apresentados no dendrograma (Figura 23). O grupo 1 incluiu 47 árvores e o grupo 2, 34 árvores.

As árvores do grupo 1 (Tabela 8) apresentaram as maiores médias de incremento periódico anual em área transversal, diâmetro e altura. Essas são árvores que sofrem menos competição, pois apresentam valor médio de 2,4 de ICJ.MAT, chegando ao máximo de 5,8 e mínimo de 1,2, valores menores que os encontrados nos demais grupos. A variação da relação h/d não foi grande entre os grupos. No entanto, ainda foi menor no grupo 2, com 0,5, revelando uma forma mais cônica dos fustes.

Os resultados obtidos induzem a considerar o grupo 1 como grupo de árvores dominantes e codominantes, além disso, 67% das árvores foram classificadas como PS1 e 24%, como PS2. As copas do grupo supracitado se encontram na maioria, acima de 50%, com forma circular (FORMA), com grande dimensão (DIM) e com boas porcentagens de folhas verdes, resultados que indicam boas qualidades de copa.

O grupo 2 agrupou 34 árvores com 94% na PS3, esse é então considerado como árvores dominadas, além de apresentar as menores médias de d, h e IPAg. São as árvores com maior nível competição, ICJ.MAT médio de 4,4, reafirmando o motivo pelo qual as árvores apresentaram crescimento baixo ou estagnado.

Figura 23 – Dendrograma - método de Ward para seleção dos grupos da amostragem de pde *Araucaria angustifolia* na FLONA de São Francisco de Paula, RS



Fonte: Autora (2018).

Árvores nas maiores classes de diâmetro sofrem menos no seu desenvolvimento quando comparadas com as suprimidas, árvores que são eliminadas como consequência da diminuição do crescimento. As características de copa do grupo 2 também corroboram a falta de ritmo de crescimento das árvores com copas, em sua maioria, quebradas e de pouca exposição à luz, caracterizando-se como dominadas de PS3.

As características da copa das árvores dominadas induzem a redução do diâmetro, altura e incremento, pois a competição com árvores maiores faz com que as copas sofram deformações. Assim sendo, justifica-se o enquadramento das árvores do grupo 2 em todas as formas de copa (FOR) e com predominância na forma de copa vertical (FORVERT) irregular (56%).

No estudo de formação dos pseudo-verticilos de *A. angustifolia* em árvores de 7 anos realizado por Koehler (2009), a distância média entre os verticilos aumenta de 0,39 para 0,50 na porção de tronco acima de 1,30 m. O autor justifica os resultados considerando que o ritmo de crescimento aumenta a partir do 3º ano de idade e eles

apontam correlação significativa entre o incremento médio anual e o número de verticilos formados por ano, além da distância média entre os “verticilos”.

Tabela 8 – Tabela com média, mínimo, máximo e desvio padrão das variáveis dendrométricas e porcentagem de distribuição nas variáveis de copa de *Araucaria angustifolia* para os grupos selecionados no método de agrupamento da amostragem realizada na FLONA de São Francisco de Paula, RS

GRUPO	VARIÁVEIS BIOMÉTRICAS					VARIÁVEIS DE COPA (%)						
		MÉD	MIN	MÁX	DV	N	1	2	3	4	5	
1	d	50.8	18	78.9	13.7	47	FOR	56	27	16	2	0
	h	21.9	12	25.3	2.2		FORVERT	2	64	33	0	0
	IPAg	13.1	0	40	11.8		DVERTIC	2	13	84	0	0
	MAT	2.4	1.2	5.8	1.1		FV	31	64	4	0	-
	h/d	0.5	0.3	0.8	0.1		PS	67	24	9	0	-
							DIM	56	38	7	0	-
2	d	29.2	13.6	61.7	12.9	34	FOR	12	12	29	38	15
	h	17.3	10.5	22.8	3.1		FORVERT	3	56	21	9	12
	IPAg	2.2	0.0	27.9	5.2		DVERTIC	18	21	47	15	0
	MAT	4.4	1.6	8.7	2.0		FV	3	12	71	15	-
	h/d	0.7	0.4	1.0	0.2		PS	3	6	94	0	-
							DIM	0	9	59	32	-

Onde: FOR= forma; FORVERT= forma vertical da copa, DVERTIC= distância entre pseudo-verticilos; FV= porcentagem de folhas verdes; PS= posição sociológica; DIM=dimensão da copa; d= diâmetro (cm); h= altura total (m); IPAg= incremento periódico anual em área transversal (cm<sup>2</sup>/ano); MAT= média de “A” total de *A. angustifolia* e folhosas; 1,2,3,4,5= escalas de classificação das copas; DV= desvio, N= número de árvores.

Fonte: Autora (2018).

Os pseudo-verticilos de árvores dominadas são concêntricos em sua maioria (47%), a distância é menor, o que reflete no baixo crescimento da árvore e, consequentemente, no incremento periódico anual em área transversal. A distância entre os “verticilos” é proporcional ao ritmo de crescimento, logo a formação anual deles tende a ser maior (CARVALHO, 1994; KOEHLER, 2009).

Lusk e Le-Quesne (2000) estudaram árvores jovens de *Araucaria araucana* e indicaram que a formação dos pseudo-verticilos, provavelmente, varia ao longo das fases de crescimento, estando relacionada com a quantidade de luz disponível e, consequentemente, com o balanço de carbono da planta.

O nível alto de competição também atrapalha no alargamento lateral das copas, como no grupo 2, tornando-as pequenas (59%) ou quebradas (32%). Segundo Sanquetta et al. (2011), as *A. angustifolia* possuem copas com tamanhos variados em florestas de clareira, mas predominam as grandes copas. Portanto, em florestas de

alta densidade ou com clareiras de *A. angustifolia*, apresentam dimensões diferentes de copa, mesmo em árvores de mesma posição sociológica.

#### 4.4.2.2 Modelagem do incremento com a inclusão de variáveis qualitativas de copa de *Araucaria angustifolia* na FLONA de São Francisco de Paula, RS

A inclusão de variáveis descritoras da copa, levantadas de forma expedita na floresta, melhorou as estimativas do IPAg. A análise de correlação entre as variáveis identificou variáveis dendrométricas e morfométricas que mais relacionaram com o incremento periódico anual em área transversal (IPAg), Tabela 9. A análise da correlação de Pearson mostrou o diâmetro com  $r=0,48$  como de maior correlação, seguida do logaritmo de ICJ.MAT ( $r=-0,33$ ) e da relação  $h/d$  ( $r= -0,38$ ), todas significativas a 0,05% de probabilidade.

Na correlação de Kendall, as variáveis morfométricas qualitativas FORVET e DVERTIC não foram significantes ( $p<0,05$ ). A dimensão da copa e a posição sociológica apresentaram correlação moderada acima de 40%. Já as variáveis forma e quantidade de folhas verdes mostraram baixa relação com o IPAg, com correlação de -0,35 e 0,34, respectivamente, ambas significantes.

Tabela 9 - Análise de correlação de Pearson e Kendall entre o incremento periódico anual em área transversal, variáveis dendrométricas e de copa para *Araucaria angustifolia* na FLONA de São Francisco de Paula, RS

CORRELAÇÃO DE PEARSON						
	D	h	h/d	ln (ICJ.MAT)		
IPAg	0,4805	0,5271	-0,3801	-0,3299		
	<,0001	<,0001	0,0006	0,0030		
CORRELAÇÃO DE KENDALL						
	FORMA	FOVET	DVERTIC	FV	PS	DIM
IPAg	-0,3534	-0,119	0,076	-0,338	-0,4207	-0,46458
	<,0001	0,1874	0,3986	<,0001	<,0001	<,0001

Onde: FORMA= forma da copa; FORVET= forma vertical da copa, DVERTIC= distância entre pseudo-verticilos; FV= porcentagem de folhas verdes; PS= posição sociológica; DIM=dimensão da copa; d= diâmetro (cm); h= altura total (m); IPAg= incremento periódico anual em área transversal (cm<sup>2</sup>); ln (ICJ.ICJ.MAT)= logaritmo da média de "A" total de *A. angustifolia* e folhosas.

Fonte: Autora (2018).

No ajuste das equações da Tabela 4, elaboradas com a inclusão de variáveis dendrométricas e as variáveis de copa, no modelo 6, foi possível alcançar um poder de

explicação da ordem de 55% da variação total do incremento em área transversal, com um erro médio de 10,5 cm<sup>2</sup>/ano (Tabela 10). Os valores estimados e observados, apresentados de forma gráfica na Figura 24, comprovaram a capacidade de descrição do modelo sobre a grande variabilidade inerente nos dados observados, a qual só pode ser obtida com a inclusão de variáveis que descrevem a situação atual da copa. Os resíduos apresentaram tendência de sub- e super estimativas em IPAg<40 cm<sup>2</sup>/ano.

Ao comparar com a Figura 20, do modelo gerado pelo procedimento STEPWISE, as estimativas do modelo 6 apresentam maior ângulo de inclinação, explicando melhor a distribuição dos dados observados.

Tabela 10 – Parâmetros estimados e estatísticas de precisão dos ajustes dos modelos utilizados para o incremento periódico anual em área transversal de *Araucaria angustifolia* na FLONA de São Francisco de Paula, RS

MD	PARÂMETROS ESTIMADOS							R <sup>2</sup> <sub>aj.</sub>	Δ R <sup>2</sup> <sub>aj.</sub>	Syx	Δ Syx
	β <sub>0</sub>	β 1	β 2	β 3	β 4	β 5	β 6				
		D	ln (ICJ.MAT)	h/d	PS	FV	FOR				
<b>1</b>	0,8736	0,0283									
<b>Pb.</b>	0,0269	<,0001						0,18	-	9,88	-
<b>2</b>	-0,8082	0,0477	0,826								
<b>Pb.</b>	0,3088	<,0001	0,0138					0,22	0,04	9,68	0,2
<b>3</b>	-0,3455	0,0436	0,8464	-0,5861							
<b>Pb.</b>	0,8361	0,0069	0,0118	0,7569				0,21	-0,01	9,74	-0,06
<b>4</b>	1,3871	0,0283	0,9739	-	-0,8287						
<b>Pb.</b>	0,0598	0,0005	0,0002	-	0,0002			0,39	0,18	8,56	1,18
<b>5</b>	-	0,04130	1,3004	-	-0,924	0,32					
<b>Pb.</b>	-	<,0001	<,0001	-	<,0001	0,011		0,4	0,01	8,42	0,14
<b>6</b>	-	0,04230	1,2964		-0,946	0,63	-0,3768				
<b>Pb.</b>	-	<,0001	<,0001	-	0,0002	0,001	0,0174	0,44	0,04	8,18	0,24

Onde: MD= modelos; Pb.= probabilidade; FOR= forma da copa; FV= porcentagem de folhas verdes; PS= posição sociológica; d= diâmetro (cm); h/d= relação altura diâmetro (m/cm); IPAg= incremento periódico anual em área transversal (cm<sup>2</sup>/ano); ln (ICJ.MAT)= logaritmo da média de "A" total de *A. angustifolia* e folhas; R<sup>2</sup><sub>aj.</sub>= coeficiente de determinação ajustado; Syx= erro padrão da estimativa; Δ= variação.

Fonte: autora (2018).

Observa-se que, no modelo 6, a variável correspondente a relação h/d da árvore objetivo não permaneceu no modelo, não foi significativa, sendo substituída pelo logaritmo índice de competição de Johann (ln (ICJ.MAT)). Na formulação do índice (5)

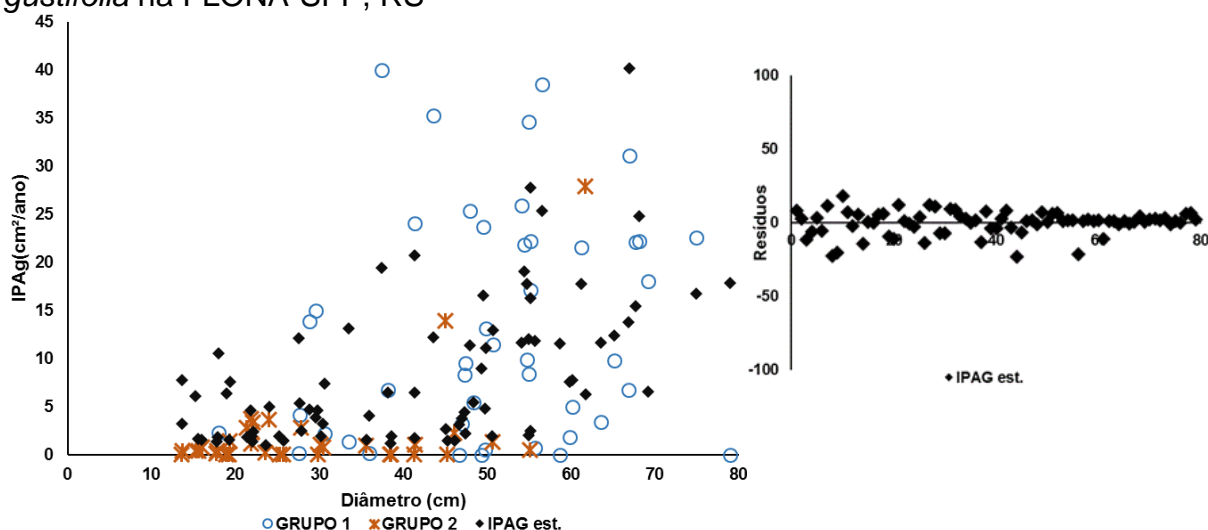
a relação h/d da árvore objetivo é considerada e está expressa no modelo de acordo com as tendências propostas pelo autor do índice, que relaciona o aumento do grau de competição de uma árvore objetivo com a sua relação h/d.

O aumento de variáveis dendrométricas e morfométricas nos modelos trouxe ganho à precisão e à redução do erro padrão da estimativa (Tabela 12). Acrescentando a posição sociológica (PS) no modelo 4, o ganho no  $R^2_{aj}$  foi de 0,18%, o maior para essa estatística. O erro padrão da estimativa foi sendo reduzido com a inclusão de variáveis de copa, alcançando, no modelo 6, a 8,18  $\text{cm}^2/\text{ano}$ . Para esse modelo, o erro reduziu 0,24  $\text{cm}^2/\text{ano}$ , com maior variação no modelo 4 de 1,18  $\text{cm}^2/\text{ano}$ , evidenciando a importância dessas variáveis na descrição da dinâmica de crescimento e da competição em que a floresta está inserida. Os valores de AIC e BIC foram 336,96 e 348,81 respectivamente no modelo 6 (18).

$$IPAg = 0,04230 d + 1,2964 \cdot \ln(ICJ.MAT) - 0,946 \cdot PS + 0,63 \cdot FV - 0,3768 \cdot FOR \quad (18)$$

Onde: IPAg= incremento periódico anual em área transversal ( $\text{cm}^2/\text{ano}$ ); d= diâmetro (cm);  $\ln(ICJ.MAT)$ = logaritmo da média de "A" total de *A.angustifolia* e folhosas; FORMA= forma da copa; FV= porcentagem de folhas verdes; PS= posição sociológica; link= função de ligação; dist= distribuição.

Figura 24 – Distribuição dos valores observados (IPAg obs.) e estimados (IPAg est.) do incremento periódico anual em área transversal do Modelo 6 para *Araucaria angustifolia* na FLONA-SFP, RS



Fonte: Autora (2018)

As variáveis de copa qualitativas tanto quanto as quantitativas são relevantes para promover boas estimativas em modelos de incremento. No entanto, realizar as medições é sempre mais confiável e reduz o erro nas estimativas. Nesse contexto, medir o diâmetro de copa pode ser mais eficiente do que estimar, principalmente em



floresta de com crescimento estagnado, onde não foram realizadas intervenções de manejo.

A taxa de crescimento em FOM são milimétricas (COSTA, 2015; CUBAS, 2015), não ocorrendo alterações expressivas nos diâmetros ao longo do tempo, principalmente se não for realizado nenhum corte como observados nos dados de estudo. A modelagem do IPAg possui uso restrito quando se deseja prognosticar em outras tipologias semelhantes, uma vez que foi considerado as condições de copas atuais em relação as taxas de crescimento de 2007 a 2009. Então, o resultado do modelo 6 é importante para comprovação da capacidade das variáveis de copa em descrever o incremento periódico anual em área transversal, devendo serem incluídas nos modelos de regressão, a fim de melhorar a acurácia.

Segundo Zimmermann et al. (2016) as características dendrométricas, morfo-métricas e de competição na construção dos modelos de crescimento para árvores individuais ilustra de forma mais concreta a dinâmica do povoamento, uma vez que esses fatores exercem influência na produção quali-quantitativa de madeira.

As alternâncias de luz nas fases de crescimento causadas pela competição entre árvores na floresta provocam a formação de copas desuniformes, assimétricas e pequenas decorrentes da necessidade de evitar a concorrência de vizinhos e a procura por luz (MUTH; BAZZAZ, 2003). Por essa razão, a característica heliófita (CARVALHO, 2003) da *A. angustifolia* e alta densidade da floresta podem justificar as variações de copa encontradas no local estudado.

De acordo com Longhi (2016), intervenções periódicas na floresta em intervalos de 10 anos foram uma alternativa de reestruturação da produção de uma FOM secundária, seja com corte seletivo leve ou moderado. Essas alternativas de manejo provocaram o aumento das taxas de crescimento de *A. angustifolia* em relação a uma floresta não manejada.

O crescimento individual após a intervenção com o desbaste aumenta, estando relacionado com maiores volumes de copa, área foliar, massa radicular devido ao aumento do espaço individual e da redução da competição por luz. (MUÑOZ et al., 2008). As simulações de espaço vital e desbaste são ferramentas que contribuem para o planejamento e a tomada de decisão do melhor momento de realização de desbastes, visando diminuir a competição entre as copas das árvores em florestas (CONDÉ et al., 2013).

## 5 CONCLUSÕES

A quantificação da competição com os índices dependentes da distância de (Johann, Hegyi) e independente (BAL) não apresentam bom desempenho na explicação do incremento periódico anual em área transversal de *Araucaria angustifolia*, indicando a estagnação da floresta.

As competições intraespecíficas e interespecíficas juntas possuem maior correlação com as taxas de crescimento de *Araucaria angustifolia* e explicam melhor as variações dos incrementos das árvores do que separadas na FLONA de São Francisco de Paula, RS.

A modificação no Índice de Johann com a inclusão da altura da árvore competidora pode ser utilizada para descrever a competição entre as árvores.

A distância a ser mantida entre as árvores nos cortes de liberação, tomando como referência o incremento em área transversal, não pode ser definida pelo valor de "A" do índice de Johann, em decorrência da característica da araucária de redução do crescimento por longo período, ocasionado pela redução nas dimensões da copa, sem que ocorra mortalidade da planta em curto período, conforme constatado na Floresta Nacional de São Francisco de Paula, no Rio Grande do Sul, e em Irati, no Paraná.

A dinâmica do crescimento de *A.angustifolia* em floresta sem ocorrência de intervenção é evidenciada em características da copa. Neste caso, árvores com copas pequenas, irregulares e de menor quantidade de acículas estão sujeitas a alto grau de competição, incremento reduzido ou desprezível, sendo o contrário em árvores com copa de boa qualidade.

A modelagem do incremento em área transversal utilizando variáveis diâmetro e a média de "A" total (de árvores latifoliadas e de araucária) do índice de Johann não apresentam boa qualidade de ajuste, com erro elevado e baixo coeficiente de determinação.

A inclusão de variáveis de copa no modelo de regressão melhora a acurácia e precisão das estimativas de incremento periódico anual em área transversal indicando a importância dessas características na estrutura de modelos de crescimento.

## REFERÊNCIAS

- ALBETZ, P.; OHNEMUS, K. Der Z-Baum-Bestockungsgrad (Definition, Herleitung, Anwendung), Allgemeine Forst und Jagdzeitung, Frankfurt am Main, 165. Jg., 10-12: 177 - 185, 1994.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; DE MORAES GONÇALVES, J. L., SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**. Stuttgart, v. 22, n. 6, p. 711-718, 2014.
- ANDRADE, C. M.; FINGER, C. A. G.; THOMAS, C.; SCHNEIDER, P. R. Variação do incremento anual ao longo do fuste de *Pinus taeda* L. em diferentes idades e densidades populacionais. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 17, n. 3, p. 239-246, jul.-set. 2007.
- ARAÚJO JÚNIOR C. A.; SOARES C. P. B.; LEITE H. G. Curvas de índices de local em povoamentos de eucalipto obtidas por regressão quantílica. **Pesquisa agropecuária brasileira**. Brasília, v.51, n.6, p.720-727, jun. 2016
- ASSMANN, E. Zur Theorie der Grundflächenhaltung. **Fw. Gbl.** v.78, n.32, p.321-330, 1968.
- AYINDE, K.; LUKMAN, A. F.; AROWOLO, o. Robust regression diagnostics of influential observations in linear regression model. **Open Journal of Statistics**, v. 5, n. June, p. 273–283, 2015.
- BABA, R. K.; VAZ, M. S. M. G.; COSTA, J. DA. Agrometeorological data correction using statistical methods. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 29, n. 4, p. 515–526, 2014.
- BARNETT, V.; LEWIS, T. (1994) **Outliers in Statistical Data**. New York, Wiley.
- BELLA, I. E. A new competition model for individual trees. **Forest Science**, v. 17, n. 3, p. 364-372, 1971.
- BELSLEY, D.A., KUH, E. AND WELSCH, R.E. Regression Diagnostics; Identifying Influence Data and Source of Collinearity. Wiley, New York. 1980.
- BERTONI, J. C.; TUCCI, C. E. M. **Precipitação**. In: TUCCI, C. E. M. Hidrologia: ciência e aplicação. 2. ed. Porto Alegre, RG: UFRGS, 2001. 943 p.
- BIER, A. A.; FERRAZ, S. E. T. Comparação de Metodologias de Preenchimento de Falhas em Dados Meteorológicos para Estações no Sul do Brasil. **Revista Brasileira de Meteorologia**, v. 32, n. 2, p. 215–226, 2017.
- BIGING, G.S.; DOBBERTIN, M.. Evaluation of competition indices in individual tree growth models. **Forest Science**, 41: 360-377. 1995.
- BRASIL. LEI Nº 11.428, de 22 de dezembro de 2006. Dispõe sobre a utilização e proteção da vegetação nativa do Bioma Mata Atlântica, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 26 dez. 2006. Disponível em: <<http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=526>>. Acesso em: 12 jun.2016.

BRASIL. LEI Nº 3.782, de 22 de julho de 1960. Cria os Ministérios da Indústria e do Comércio e das Minas e Energia, e dá outras providências. **Diário Oficial da União** Brasília, DF, 22 jul. 1960. Disponível em: < [http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/1950-1969/L3782.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/1950-1969/L3782.htm)>. Acesso em: 18 jun.2017

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Resolução CONAMA nº 278, de 24 de maio de 2001. Dispõe contra corte e exploração de espécies ameaçadas de extinção da flora da Mata Atlântica. **Diário Oficial da República Federativa do Brasil**, Brasília, DF, 18 junho. 2001b. Disponível em:< <http://www.mma.gov.br/port/conama/legiabre.cfm?codlegi=276>> Acesso em: 12 nov.2017.

BRASIL. Portaria nº 561, de 25 de outubro de 1968. Portaria IBDF N.º 561, de 25 de Outubro de 1968. Rio de Janeiro, 25 out. 1968. **Diário Oficial da União**. Rio de Janeiro, RJ, 25 out. 1968. Disponível em: <<http://www.florestanacional.com.br/1968Portaria561.pdf>>. Acesso em: 14 out. 2017.

BRASIL. SNUC. Lei nº. 9.985, de 18 de julho de 2000. Institui o Sistema Nacional de Unidades de Conservação e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 26 dez. 2006. Disponível em: <[http://www.planalto.gov.br/ccivil\\_03/leis/L9985.htm](http://www.planalto.gov.br/ccivil_03/leis/L9985.htm)>. Acesso em: 12 jun.2016.

CALLEGARI-JACQUES, S. M. **Bioestatística: princípios e aplicações**. Porto Alegre: Artmed, 2003. 255 p.

CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 3.ed. Viçosa: UFV, 2009. 548p.

CAO, Q.V.; WANG, J. Evaluation of methods for calibrating a tree taper equation. **Forest Science**, v.61, p.213-219, 2015.

CARVALHO, P. E. R. **Pinheiro-do-paraná**. Colombo. EMBRAPA-FLORESTAS, 17p. (Embrapa Florestas. Circular Técnica, 60). 2002.

CARVALHO, P.E.R. **Espécies florestais brasileiras**. Colombo: EMBRAPA-FLORESTAS, 2003. 1039p.

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

CASTAGNERI, D.; VACCHIANO, G.; LINGUA, E.; MOTTA, R. Analysis of intraspecific competition in two subalpine Norway spruce (*Picea abies* (L.) Karst.) stands in Paneveggio (Trento, Italy). **Forest Ecology and Management**, v. 255, p. 651-659, 2008.

CHASSOT, T.; FLEIG, F. D.; FINGER, C. A. G.; LONGHI, S. J. Modelos de crescimento em diâmetro de árvores individuais de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze em floresta ombrófila mista. **Ciência Florestal**, v. 21, n. 2, p. 303–314, 2011.

CHATTERJEE, S.; HADI, A.S. Sensitivity Analysis in Linear Regression. **Wiley Series in Probability and Mathematical Statistics**. Wiley, New York. 1988.

CHEN, C. “Robust Regression and Outlier Detection with the ROBUSTREG Procedure.” In Proceedings of the Twenty-Seventh Annual. **SAS Users Group International Conference**. Cary, NC: SAS Institute Inc. 2002.

CLARK, D. A.; CLARK, D. B. Getting to the canopy: tree height growth in a neotropical rain forest. **Ecology**, v. 82, n. 5, p. 1460-1472, 2001.

CONAB- COMPANHIA NACIONAL DE ABASTECIMENTO. **Pinhão (semente). Conjuntura Especial**. set. 2014. Brasília, DF, 2014. Disponível em: <[http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14\\_09\\_09\\_12\\_36\\_06\\_pinhaosementesetembro\\_2014.pdf](http://www.conab.gov.br/OlalaCMS/uploads/arquivos/14_09_09_12_36_06_pinhaosementesetembro_2014.pdf)> Acesso em: 15 out. 2016.

CONDÉ, T. M.; LIMA, M. L. M. DE; LIMA NETO, E. M. DE; TONINI, H. Morfometria de quatro espécies florestais em sistemas agroflorestais no município de Porto Velho, Rondônia. **Revista Agro@Mambiente on-Line**, v. 7, n. 1, p. 18, 2013

CONTRERAS, M. A.; AFFLECK, D.; CHUNG, W. Evaluating tree competition indices as predictors of basal area increment in western Montana forests. **Forest Ecology and Management**, v. 262, p. 1939-1949, 2011.

COOMES, D.A.; ALLEN, R.B. Effects of size, competition and altitude on tree growth. **Journal of Ecology**, v.95, p.1084-1097, 2007a.

COOMES, D.A.; ALLEN, R.B. Mortality and tree-size distributions in natural mixed-age forests. **Journal of Ecology**, v.95, p.27-40, 2007b.

COSTA, E. A; **Modelagem biométrica de árvores com crescimento livre e sob competição em Floresta de Araucária**. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015

COSTA, E. A.; FINGER, C. A. G. Efeito da competição nas relações dimensionais de araucária. **Floresta e Ambiente**, v. 24, 2017.

COSTA, E. A.; FINGER, C. A. G.; HESS, A. F. Modelo de incremento em área transversal para árvores de araucária de uma floresta inequiana. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 83, p. 239, 2015.

CUBAS, R. **Restabelecimento de *Araucaria angustifolia* e *Ocotea porosa* após sete décadas da exploração florestal**. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2015.

CUNHA DA, U. S.; MACHADO S. DO A; FIGUEIREDO FILHO A. Uso de análise exploratória de dados e de regressão robusta na avaliação do crescimento de espécies comerciais de terra firme da Amazônia. **Revista. Árvore**, Viçosa-MG, v.26, n.4, p.391-402, 2002.

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

CUNHA, T. A. DA; FINGER, C. A. G. Competição assimétrica e o incremento diamétrico de árvores individuais de *Cedrela odorata* L. na Amazônia ocidental. **Acta Amazonica**, v. 43, n. 1, p. 9–18, 2013.

CURTO, R. D. A. **Avaliação do crescimento e potencial de manejo em plantio superestocado de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze**. 2015. Tese (Doutorado em engenharia Florestal) -Universidade Federal Do Paraná, Curitiba, 2015.

DAHLGREN, J.P.; ERIKSSON, O.; BOLMGREN, K.; STRINDELL, M.; EHRLÉN, J. Specific leaf area as a superior predictor of changes in field layer abundance during forest succession. **Journal of Vegetation Science**, v.17, p.577-582, 2006.

DOBSON, J. A. An a introduction to generalized linear models. 2nd ed. Florida: Chapman & Hall, 2002. 221 p.

DURLO, M. A. Relações morfométricas para *Cabralea canjerana* (Well.) Mart. **Ciência Florestal**, v. 11, p. 141–149, 2001.

DURLO, M.; 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, 1998.

EBLING, A. A.; PÉLLICO NETTO, S. Modelagem da ocorrência de coortes na estrutura diamétrica da *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze. **Cerne**, Lavras, v. 21, n. 2, p. 251-257, 2015.

EMBRAPA- EMPRESA BRASILEIRA DE PESQUISA AGROPECUARIA. Centro Nacional de Pesquisa de Florestas. Zoneamento ecológico para plantios florestais no estado de Santa Catarina. Curitiba: CNPF - **EMBRAPA**, 1988. 113 p.

EMBRAPA. Centro Nacional de Pesquisa de Solos (Rio de Janeiro, RJ). Sistema brasileiro de classificação de solos. 2. ed. – Rio de Janeiro. EMBRAPA-SPI, 2006.

FIELD, A. **Descobrimo a Estatística Utilizando o SPSS**. Porto Alegre: Artmed, 2009. 688 p. (Tradução da Segunda Edição Inglesa de Discovering Statistics Using SPSS).

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

FIGUEIREDO FILHO, A.; DIAS, A. N.; STEPKA, T. F.; SAWCZUK, A. R. Crescimento, mortalidade, ingresso e distribuição diamétrica em floresta ombrófila mista. **Floresta**, v. 40, n. 4, p. 763–776, 2010.

FINGER, C. A. G. **Apostila de crescimento e produção florestal**. 2010, 123 p.

FINGER, C.A.G. **Fundamentos de biometria florestal**. Santa Maria: CEPEF/FA-TEC,1992. 269p.

HANEWINKEL, M.; PRETZSCH, H. Modelling the conversion from even-aged to uneven-aged stands of Norway spruce (*Picea abies* L. Karst.) with a distance-dependent growth simulator. **Forest Ecology and Management**, v. 134, n. 1–3, p. 55–70, 2000.

HASENAUER, H. Dimensional relationships of open-grown trees in Austria. **Forest Ecology and Management**, v. 96, n. 3, p. 197–206, 1997.

HEGYI, F. **A simulation model for managing Jack-pine stands**. In Growth Models for Tree and Stand Simulation; Fries, J., Ed.; Research Note No. 30; Royal College of Forestry, Department of Forest Yield Research: Stockholm, Sweden, 1974; pp. 74–90.

HERTEL, R. J. G. **Interpretação morfológica da *Araucaria angustifolia***. 1980. 143 f. Tese (Professor titular). Universidade Federal do Paraná. Curitiba, 1980.

HESS, A. F.; CALGAROTTO, A. R.; PINHEIRO, R.; WANGINIÁK, T. C. R. Proposta de manejo de *Araucaria angustifolia* utilizando o quociente de Liocourt e análise de incremento, em propriedade rural no Município de Lages, SC. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 30, n. 64, p. 337–345, 2010.

HESS, A. F.; CIANORSCHI, L. D.; SILVESTRE, R.; SCARIOT, R.; RICKEN, P. Aplicação dos modelos lineares generalizados para estimativa do crescimento em altura. **Pesquisa Florestal Brasileira**. Colombo, v. 35, n. 84, p. 427-433, out./dez. 2015.

HIGUCHI, P.; SILVA, A. C.; FERREIRA, T. S.; SOUZA, S. T.; GOMES, J. P.; SILVA, K. M.; SANTOS, K.; LINKE, C.; PAULINO, P. S. Influência de variáveis ambientais sobre o padrão estrutural e florístico do componente arbóreo, em um fragmento de Floresta Ombrófila Mista Montana em Lages, SC. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 22, n. 1, p. 79-90, jan.mar. 2012.

HOLANDA, A.C.; FELICIANO, A. L. P.; MARANGON, L. C.; SANTOS, M. S. do; MELO C. L. S. M. de; PESSOA, M. M. L. de. Estrutura de espécies arbóreas sob efeito de borda em um fragmento de Floresta Estacional Semidecidual em Pernambuco. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 34, n. 1, p. 103-114, 2010.

HOLMES, M. J.; REED, D. D. Competition indices for mixed species northern hardwoods. **Forest Science**, v. 37, n. 5, p. 1338-1349, 1991.

HUBER, P.J. “Robust regression: Asymptotics, conjectures and Monte Carlo,” **Ann. Stat.**, 1, 799- 82. 1973.

IBGE-INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA. **Manual técnico da vegetação brasileira**. 2ed. Manuais Técnicos em Geociências, n.1, RJ, 2012.

ICMbio (Instituto Chico Mendes MMA), Ministério do meio Ambiente, acessado em: 17/11/2017, disponível em: <<http://www.icmbio.gov.br>>.

IMB SPSS Statistics 20. IMB. 2011. *Software*.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. ICMBio **Plano de Manejo para a Floresta Nacional de São Francisco de Paula – RS**. Santa Maria, 1989. 215 p. Disponível em:< [http://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/docs-planos-de-manejo/flona\\_de\\_sao\\_francisco\\_de\\_paula\\_pm.pdf](http://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/docs-planos-de-manejo/flona_de_sao_francisco_de_paula_pm.pdf)> Acesso: 6 de jun. 2016.

INSTITUTO CHICO MENDES DE CONSERVAÇÃO DA BIODIVERSIDADE. ICMBio **Plano de Manejo para a Floresta Nacional de Irati– PR**. Fernandes Pinheiro, 2013, 66 p. Disponível em:< [http://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/docs-planos-de-manejo/flona\\_de\\_sao\\_francisco\\_de\\_paula\\_pm.pdf](http://www.icmbio.gov.br/portal/images/stories/docs-planos-de-manejo/flona_de_sao_francisco_de_paula_pm.pdf)> Acesso: 6 de jun. 2016.

JOHANN K. Der „A-Wert“– ein objektiver Parameter zur Bestimmung der Freistellungsstärke von Zentralbäumen. **Tagungsberichte der Sektion Ertragskunde im Deutschen Verband Forstlicher Forschungsanstalten**. pp. 146-158. 1982.

KOEHLER, A. B. Modelagem biométrica e morfometria em povoamentos jovens de *Araucaria angustifolia* (Bert.) Ktze., em Tijucas do Sul, Estado do Paraná. , p. 128, 2009.

KOENKER, R.; GILBERT, B. "Regression Quantiles." **Econometrica**. January, 46:1, pp. 33–50. 1978.

KOENKER, R.; KEVIN F. H. 2001. "Regressão quantile". Journal of **Economic Perspectives** , 15 (4): 143-156. 2001.

KOENKER, ROGER; VASCO D'OREY. "Computing Regression Quantiles." **Applied Statistics**. 36, pp. 383–93. 1987.

LAUW, A. M. R. F. **Estudo de anéis anuais de crescimento de árvores como indicadores climáticos em Portugal**. 2011. 84 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal e dos Recursos Naturais) – Universidade técnica de Lisboa, Lisboa, 2011.

LEDERMAN, T. Evaluating the performance of semi-distance-independent competition indices in predicting the basal area growth of individual trees. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 40, p. 796-805, 2010.

LEITE, P. F.; KLEIN, R. M. **Vegetação**. In: Instituto Brasileiro De Geografia E Estatística - IBGE. (Ed.). Geografia do Brasil: Região Sul. Rio de Janeiro: 1990. v.2. p.113-150.

LONGHI, R. V. **Ordenamento e condução da produção em floresta ombrófila mista no estado do Rio Grande do Sul**, 2016. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal)-Universidade Federal De Santa Maria, Santa Maria, 2016.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas do Brasil**. v. 2. 3.ed. Nova Odessa, SP: Instituto Plantarum, 2009. 384 p.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. 5 .ed. Instituto Plantarum de Estudos da Flora, 2008. v. 1. 384 p.

LUSK, C. H.; LE-QUESNE, C. Los verticilos de juveniles de *Araucaria araucana* (Molina) Koch: ¿son formados anualmente? **Rev. Chil. Hist. Nat.**, set. 2000, vol.73, no.3, p.497-501.

MACHADO, A.S., ZAMIN, N.T.; NASCIMENTO, R.G.M.; SANTOS, A.A.P. Efeito de Variáveis Climáticas no Crescimento Mensal de *Pinus taeda* e *Araucaria angustifolia* em Fase Juvenil. **Floresta e Ambiente**. v.21, n.15, p. 170-181, 2014.

MAILLY, D.; TURBIS, S.; POTHIER, D. Predicting basal area increment in a spatially explicit, individual tree model: a test of competition measures with black spruce. **Canadian Journal Forest Research**, v. 33, p. 435-443, 2003.

MARONNA, R. A., MARTIN, R.D. AND YOHAI, V.J. **Robust Statistics: Theory and Methods**. Wiley, New York. 2006.

MARTINKOSKI, L.; VOGEL, G. F.; JADOSKI, S. O. Influência do clima no crescimento diamétrico de *Araucária angustifolia*: revisão bibliográfica. **Brazilian Journal of Applied Technology for Agricultural Science**, v. 8, n. 2, p. 104–111, 2015.



MATTOS, R. B. DE. **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. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal)-Universidade Federal De Santa Maria, Santa Maria, 2007.

MAZZA, C. A. S. **Caracterização ambiental da paisagem da Microregião Colonial de Irati e zoneamento ambiental da Floresta Nacional de Irati, PR**. 2006. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas) - Universidade Federal de São Carlos, São Carlos, 2006.

MEHTÄTALO, L.; GREGOIRE, T.G.; BURKHART, H.E. Comparing strategies for modeling tree diameter percentiles from remeasured plots. **Environmetrics**, v.19, p.529-548, 2008.

MELLO, A. A. DE; EISFELD, R. DE L.; SANQUETTA, C. R. Projeção Diamétrica E Volumétrica Da Araucária E Espécies Associadas No Sul Do Paraná, Usando Matriz De Transição. **Revista Acadêmica: ciências agrárias e ambientais**, Curitiba, v.1, n.4, p. 55-66, out./dez. 2003.

MEYER, K.M.; WARD, D.; MOUSTAKAS, A.; WIEGAND, K. Big is not better: small *Acacia mellifera* shrubs are more vital after fire. **African Journal of Ecology**, v.43, p.131-136, 2005.

MITSCHERLICH, G. **Wald, Wachstum und Umwelt**. Eine Einführung in die ökologischen Grundlagen des Waldwachstums. Erster Band: Form und Wachstum von Baum und Bestand. II Auflage. J.D. Sauerländer's Verlag. Frankfurt am Main. 1978. 144 p.

MUTH, C.C.; BAZZAZ, F.A. Tree canopy displacement at forest gap edges. **Can. J. For. Res.** Vol. 33, 2003.

NELDER, J. A.; WEDDERBURN, R. W. M. Generalized linear models. *Journal of the Royal Statistical Society, London*, v. 135, n. 3, p. 370-384, 1972.

O' NEAL, D. D.; HOUSTON, A. E.; BUCKNER, E. R.; MEADOWS, J. S. An index of competition based on relative crown position and size. **Eight biennial southern silvicultural research conference**. Auburn, AL, p. 1-3, 1994.

OGDEN J; STEWART G. H. Community dynamics of the New Zealand conifers. In: N. Enright; R. S. Hill. **Ecology of the Southern Conifers**. Smithsonian Institution Press, Washington. pp. 81–119.

OLIVEIRA, J. C. DE; BAUM, C. A.; BECEGATO, V. A.; NETO, S. L. R.; LAVNITCKI, L. Uso de ferramentas sig para análise de agrupamento florestal de *Araucaria angustifolia* em um fragmento de floresta ombrófila mista no parque nacional de São Joaquim-sc. **Revista Geográfica Acadêmica**, v. 2, p. 93–104, 2016.

OLIVEIRA, J. R. DE; ADENESKY-FILHO, E.; ESEMANN-QUADROS, K. Avaliação do crescimento do lenho de *Araucaria angustifolia* no planalto norte de Santa Catarina. **Revista FLORESTA**, p. 155–164, 2017.

ORELLANA, E. **Sucessão florestal, regimes de manejo e competição avaliados por modelos de árvore individual em um fragmento de floresta de araucária,**

2014. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal)-Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.

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**, 2010.

PALUDO, G. F.; MANTOVANI, A.; REIS, M. S. Regeneração de uma população natural de *Araucaria angustifolia* (Araucariaceae). **Revista Árvore**, Viçosa, v. 35, n. 5, p. 1107-1119, 2011.

PAULA, G. A. Modelos de regressão com apoio computacional. São Paulo: Universidade de São Paulo, Instituto de Matemática e Estatística, [s.d.]. Disponível em: <[http://www.ime.unicamp.br/~cnaber/Livro\\_MLG.pdf](http://www.ime.unicamp.br/~cnaber/Livro_MLG.pdf)>. Acesso: 31 jan. 2018.

PAULA, J. E.; ALVES, J. L. H. **Madeiras Nativas do Brasil: anatomia dendrologia - dendrometria - produção - uso**. Porto Alegre: Cinco Continentes, 2007. 438 p.

PRETZSCH, H.; BIBER, P.; UHL, E.; DAHLHAUSEN, J.; RÖTZER, T.; CALDENTY, J.; KOIKE, T.; VAN CON, T.; CHAVANNE, A.; SEIFERT, T.; et al. Crown size and growing space requirement of common tree species in urban centres, parks, and forests. **Urban For. Urban Green**. 2015, 14, 466–479

PRODAN, M., PETERS, R., COX, F., REAL, P. **Mensura Florestal**. San José – Costa Rica: GTZ - IICA. 1997. 586p

RADTKE, P. J.; WESTFALL, J. A.; BURKHART, H. E. Conditioning a distance-dependent competition index to indicate the onset of inter-tree competition. **Forest Ecology and Management**, v. 175, n. 1–3, p. 17–30, 2003.

REITZ, R.; KLEIN, R. M.; REIS, A. **Projeto madeira de Santa Catarina**. Itajaí: SUDESUL: Herbário “Barbosa Rodrigues”, 1978. 320 p.

RICKEN, P. **Incremento, espaço horizontal e competição em povoamento natural de *Araucaria angustifolia* em Lages - SC**. 2014. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal)- Universidade do Estado de Santa Catarina, Lages-SC. 2014.

ROUSSEEUW, P.J. “Least Median of Squares Regression,” **Journal of the American Statistical Association**, 79, 871-880. 1984.

ROUSSEEUW, P.J.; YOHAI, V. “Robust Regression by Means of S estimators”, in Robust and Nonlinear Time Series Analysis, edited by J. Franke, W. Härdle, and R.D. Martin, **Lecture Notes in Statistics 26**, Springer Verlag, New York, 256-274. 1984.

SABATIA, C. O.; BURKHART, H. E. Competition among loblolly pine trees: Does genetic variability of the trees in a stand matter? **Forest Ecology and Management**, v. 263, p. 122–130, 2012. Elsevier B.V.

SANQUETTA C.R.; DALLA CORTE A.P.; RODRIGUES A. L.; WATZLAWICK, L. F. **Inventários Florestais: Planejamento e Execução**. 3ª ed. Curitiba: Curitiba: Mult-Graf, 406 p., 2014.

SANQUETTA, C. R.; PIZATTO, W.; PÉLLICO NETTO, S.; FIGUEIREDO FILHO, A.; EISFELD, R. de L. Estrutura vertical de um fragmento de Floresta Ombrófila Mista no Centro-sul do Paraná. **Floresta**, Curitiba, v. 32, n. 2, p.267-276, jul./dez. 2002

- SAS Institute Inc., 2009. SAS/ETS 9.1 User's Guide. SAS Institute Inc., Cary. NC..
- SCHNEIDER, P. R.; SCHNEIDER, P. S. P. **Introdução ao Manejo florestal. Santa Maria:** Ed. FACOS, 2008. 566 p.
- SCHNEIDER, P.R. **Análise de Regressão aplicada a Engenharia Florestal.** 2 ed.Santa Maria: UFSM, CEPEF 236p. 2009.
- SCOLFORO, J. R. S. **Manejo Florestal.** Universidade Federal de Lavras – Fundação de Apoio ao Ensino, Pesquisa e Extensão. Lavras, 1997. 433p
- SCOLFORO, J.R.S. **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. 352 p. 2005.
- SENA, A. L. M. **Manejo da densidade e predição probabilística multivariada de múltiplos produtos em povoamentos florestais.** 2011. 156p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2011.
- SILVA, K. E.; MARTINS, S. V.; SANTOS, N. T.; RIBEIRO, C. A. A. S. Padrões espaciais de espécies arbóreas tropicais. In: MARTINS, S. V. (ed.). **Ecologia de florestas tropicais do Brasil.** Viçosa-MG: Editora UFV, 2012, p. 326-354.
- SILVA, M. M.; GANADE, G. M. S.; BACKES, A. Regeneração natural em um remanescente de floresta ombrófila mista, na Floresta Nacional De São Francisco de Paula, Rio Grande Do Sul, Brasil. **PESQUISAS, BOTÂNICA.** São Leopoldo: Instituto Anchieta de Pesquisas, 2010.
- SILVA, R. P.; NAKAMURA, S.; AZEVEDO, C. P.; et al. Uso de banda dendrométrica na definição de padrões de crescimento individual em diâmetro de árvores da bacia do rio Cuieiras. **Acta Amazonica**, v. 33, n. 1, p. 67–84, 2003
- SILVEIRA, B. D. da; FLORIANO, E. P.; NAKAJIMA, N. Y.; Relação da morfometria e competição com o crescimento de *Trichilia clausenii* em um fragmento de floresta semidecidual, RS. **Floresta**, v. 45, n. 2, p. 373–382, 2015.
- SKOVSGAARD, J. P.; VANCLAY, J. K. Forest site productivity: A review of the evolution of dendrometric concepts for even-aged stands. **Forestry**, v. 81, n. 1, p. 13–31, 2008.
- SOUZA, A. F. Ecological interpretation of multiple population size structures in trees: The case of *Araucaria angustifolia* in south america. **Austral Ecology**, v.32, p.524-533, 2007.
- SPURR, S.H. A measure of point density. **Forest Science.** 1962, 8, 85–96.
- SPURR, S.H., L.J. YOUNG, B.V. BARNES AND E.L. HUGHES. Nine successive thinings in a Michigan white pine plantation. **J. For.** 55: 7-13. 1957.
- STAGE, A. R.; LEDERMANN, T. Effects of competitor spacing in a new class of individual-tree indices of competition: semi-distance-independent indices computed for Bitterlich versus fixed-area plots. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 38, n. 4, p. 890–898, 2008.

STEPKA, T. F.; DIAS, A. N.; FILHO, A. F.; MACHADO, A.; SAWCZUK, A. R. Modelagem do incremento em diâmetro da *Araucaria angustifolia* em uma floresta ombrófila mista no Centro- Sul do Paraná. **Floresta**. p. 607–620, 2012.

STIGLER, S. M. **The history of statistics: the measurement of uncertainty before 1900**. Cambridge, USA: The Belknap Press of Harvard University Press, 1986.

TABOADA, M. F. Á.; ANTA, M. B.; VARELA, J. G.; GONZÁLEZ, Y J. G. Á. Influencia de la competencia en el crecimiento individual de *Pinus radiata* D. Don en Galicia. **Sociedad Española de Ciencias Forestales**, v. 174, n. April, p. 167–174, 2003.

TAIZ, L.; ZEIGER, E. **Fisiologia vegetal**. 4.ed. Porto Alegre: Artmed, 2009. 819p.

THORPE, H. C.; ASTRUP, R.; TROWBRIDGE, A.; COATES, K. D. Competition and tree crowns: A neighborhood analysis of three boreal tree species. **Forest Ecology and Management**, v. 259, n. 8, p. 1586–1596, 2010.

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

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

VANCLAY, J. K. Spatially-explicit competition indices and the analysis of mixed-species plantings with the Simile modelling environment. **Forest Ecology and Management**, v. 233, n. 2–3, p. 295–302, 2006.

VAZ, S.; MARTIN, C.S.; EASTWOOD, P.D.; ERNANDE, B.; CARPENTIER, A.; MEADEN, G.J.; COPPIN, F. Modelling species distributions using regression quantiles. **Journal of Applied Ecology**, v.45, p.204-217, 2008.

VLIET, C. Van der. Pinheiro brasileiro plantado de mudas com raízes cortadas. **Anuário Brasileiro de Economia Florestal**. Rio de Janeiro, v. 10, n. 10, p. 89-102,1958.

WATZLAWICK, L. F.; GARDIN, E.; LONGHI, S. J. Florística, estrutura e distribuição espacial em fragmento de Floresta Ombrófila Mista em São Francisco de Paula (RS). **Revista Ambiência**, v. 9, n. 1, p. 113–128, 2013.

WEBER, V. P.; FINGER, C. A. G.; COSTA, E. C.; ZIMMERMANN, A. P. L.; LONGHI, R. V. Modelagem linear generalizada para descrever o incremento em área transversal de árvores individuais de Imbuia. **Floresta**, Curitiba, PR, v. 48, n. 1, p. 123 - 132, jan./marc. 2018.

WEISKITTEL, A.R; HANN, D.W; KERSHAW, J.A, J.R .; VANCLAY, J.K. **Forest Growth and Yield Modeling** . John Wiley & Sons: Chichester, Reino Unido, 2011.

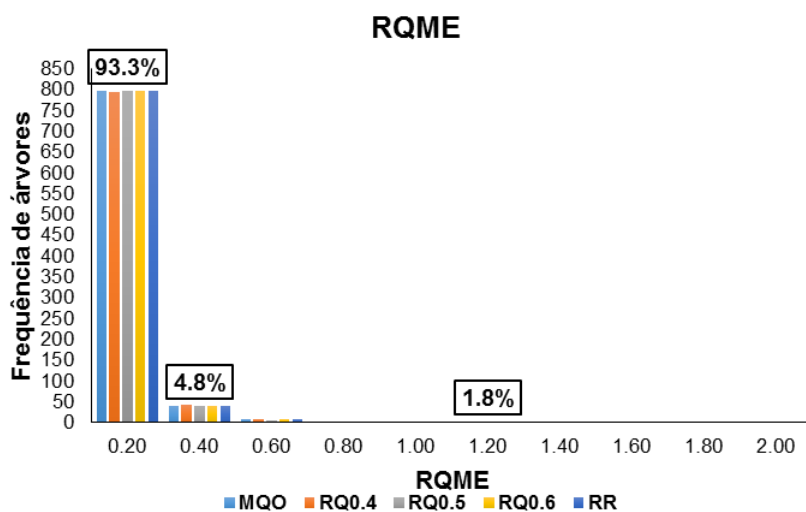
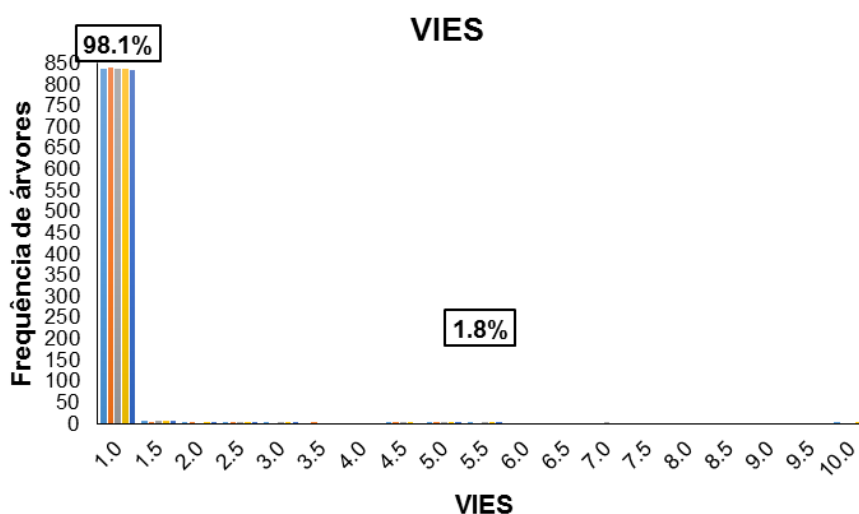
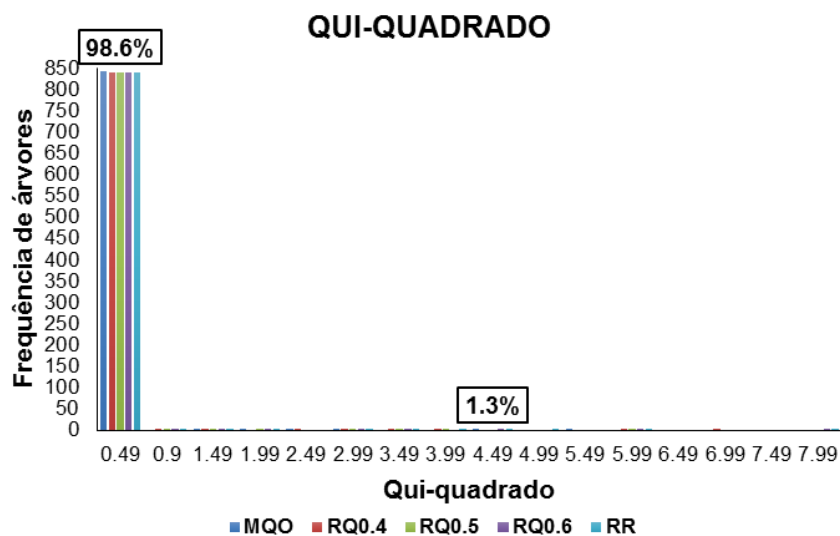
WIMBERLY, M.C.; BARE, B.B. Distance-dependent and distance-independent models of Douglas-fir and western hemlock basal area growth following silvicultural treatment. **Forest Ecology and Management**, v.89, p.1-11, 1996.

YOHAI V.J. “High Breakdown Point and High Efficiency Robust Estimates for Regression,” **Annals of Statistics**, 15, 642-656. 1987.

ZANON, M. L. B.; FINGER, C. A. G. Relação de variáveis meteorológicas com o crescimento das árvores de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) O. Kuntze em povoamentos implantadosciencia florestal. **Ciência Florestal** vol. 20, núm. 3, , pp. 467-47.

Zimmermann, A. P. L.; COSTA E. A.; SCHRÖDER, T. FLEIG, F. D. Modelagem do incremento diamétrico de *Pinus taeda* em função de variáveis da copa e índices de competição. FLORESTA, Curitiba, PR, v. 46, n. 1, p. 115 - 122, jan. / mar. 2016.

## APÊNDICE A – DISTRIBUIÇÃO DE FREQUÊNCIA DE ÁRVORES EM CLASSES DE QUI-QUADRADO VIES E Syx



## APÊNDICE B – DESCRIÇÃO DOS ESTIMADORES DE REGRESSÃO DO MÉTODO DOS MÍNIMOS QUADRADOS ORDINÁRIOS, REGRESSÃO QUANTÍLICA E REGRESSÃO ROBUSTA.

### MÍNIMOS QUADRADOS ORDINÁRIOS

O estimador possui algumas propriedades estatísticas muito atraentes que o tornaram um dos mais poderosos e estimadores populares do modelo de regressão (AYINDE, 2015). O diagnóstico da regressão torna-se para detectar a presença de valores atípicos e pontos influentes. Essas medidas usam os resíduos MQO ou algumas funções dos resíduos MQO (resíduos padronizados e studentized) para detectar outliers na direção Y e os elementos diagonais do chapéu matriz para detectar alavancas altas (direção X) (CHATTERJEE; HADI, 1988).

O estimador de mínimos quadrados ordinários para  $\beta_0$  é definido como  $\hat{\beta}_{MQO} = \arg \min_{\beta \in \mathfrak{R}} \sum_{i=1}^n r_i^2(\beta)$ , derivando p  $\beta$  obtém-se  $\sum_{i=1}^n r_i(\hat{\beta}_{MQO})x_i = 0$ , que é equivalente a chamadas equações normais  $X'X\hat{\beta}_{MQO} = X'y$ . Se X possuir alcance total,  $\hat{\beta}_{MQO}$  é determinado exclusivamente por  $\hat{\beta}_{MQO} = \hat{\beta}_{MQO}(X, y) = (X'X)^{-1}X'y$ . Por outro lado,  $\hat{\beta}_{MQO}$  se encontra  $E(\hat{\beta}_{MQO}|X) = \beta$  e  $Var(\hat{\beta}_{MQO}|X) = \sigma_0^2(X'X)^{-1}$ , Onde:  $r_i(\beta)$ = resíduos que correspondem a  $\beta$ ;  $\sigma_0^2 = Var(u)$ .

### REGRESSÃO QUANTÍLICA

A presença de outliers pode levar a uma estimativa tendenciosa dos parâmetros, a falta de especificação do modelo e previsões inadequadas (CHATTERJEE; HADI, 1988).

De acordo com Koenker e Gilbert (1978) regressão quantílica também pode ser utilizada quando os dados não seguem a distribuição normal. Seus estimadores, além de serem eficientes mesmo com erros que não apresentam distribuição normal, podem ser obtidos com programação matemática ou com programação linear, pela adaptação algoritmo *simplex*, encontrada em Koenker e d'Orey (1987).

Em outras palavras, a partir das regressões quantílicas é possível observar a resposta de cada quantil, enquanto que na regressão por Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) há apenas uma reta de regressão em torno da média, podendo ofuscar importantes efeitos distributivos (KOENKER; KEVIN, 2001).

O modelo para regressão quantílica linear é

$$y = A'\beta + \varepsilon$$

Onde:  $y = (y_1, \dots, y_n)'$  é o  $(n * 1)$  vetor das respostas;  $A' = (x_1, \dots, x_n)'$  é a  $(n * p)$  matriz de regressão;  $\beta = (\beta_1 \dots \beta_p)'$  é o  $(p * 1)$  vetor de parâmetros desconhecidos;  $\varepsilon = (\varepsilon_1 \dots \varepsilon_n)'$  e  $(n * 1)$  é o vetor de erros desconhecidos.

A regressão quantílica, também conhecida como regressão mediana ( $L_1$ ), é uma extensão natural da mediana da amostra quando a resposta está condicionada às covariáveis. Em ( $L_1$ ) regressão, a estimativa dos resíduos mínimos absolutos  $\hat{\beta}_{LAR}$ , referida como a  $L_1$  “estimativa sem precedentes”, obtida como solução do problema de minimização  $\min_{\beta \in \mathbb{R}^p} = \sum_{i=1}^n |y_i - X'_i \beta|$ . Mais geralmente, para a regressão de quantílica Koenker e Gilbert (1978) definiu o  $\tau$ -ésimo quantil de regressão  $0 < \tau < 1$ , como qualquer solução para o problema de minimização  $\min_{\beta \in \mathbb{R}^p} = \left[ \sum_{i \in \{i: y_i \geq x'_i \beta\}} \tau |y_i - x'_i \beta| + \sum_{i \in \{i: y_i < x'_i \beta\}} (1 - \tau) |y_i - x'_i \beta| \right]$ .

A solução é denominada de  $\hat{\beta}(\tau)$ , e o  $L_1$  normal estimativa corresponde a  $\hat{\beta}(1/2)$ . O  $\tau$ -ésimo da regressão é uma extensão do  $\tau$ -ésimo da amostra  $\hat{\xi}(\tau)$ , que pode se formulada como a solução  $\min_{\xi \in \mathbb{R}} = \left[ \sum_{i \in \{i: y_i \geq \xi\}} \tau |y_i - \xi| + \sum_{i \in \{i: y_i < \xi\}} (1 - \tau) |y_i - \xi| \right]$ , ou para obter o estimador  $\hat{\beta}(\tau)$  é necessário minimizar a soma de erros absolutos ponderados  $\min_{\xi \in \mathbb{R}} = \sum_{i=1}^n \rho_\tau(y_i - \xi)$   $\rho_\tau(u) = \begin{cases} \tau u, & u \geq 0 \\ (\tau - 1)u, & u < 0 \end{cases}$

Onde:  $\tau$  = um dado percentil;  $u$  é igual ao erro ou resíduo.

## REGRESSÃO ROBUSTA

Uma violação comum no ajuste de um modelo pela regressão linear clássica é a presença de outlier. Um outlier é uma observação que parece ser inconsistente com as outras observações em um conjunto de dados (BARNETT; LEWIS, 1994). Segundo BELSLEY et al. (1980) na regressão, outliers pode ocorrer em três formas diferentes:

- a) outliers na variável de resposta;
- b) outliers na variável explicativa denominada pontos de alavanca; e



c) outliers na resposta e na variável explicativa.

Muitos métodos foram desenvolvidos para esses casos, no entanto os mais utilizados são fornecidos pelos estimadores robustos que incluem o M, MM, LTS e estimadores S. O procedimento ROBUSTREG do sistema SAS fornece os quatro métodos (CHEN, C., 2002).

- a) Estimador M: foi introduzido por Huber (1973), como uma abordagem mais simples tanto computacional quanto teoricamente. Embora não seja robusto em relação aos pontos de influência, ainda é usado extensivamente na análise de dados quando a contaminação pode ser assumida como sendo principalmente na direção da variável resposta.
- b) Estimador de Quadrados Mínimos Aparados (*Least Trimmed Squares* - LTS): é um método de alto índice de ruptura (50%) que foi proposto por Rousseeuw (1984). O valor de ruptura é uma medida da proporção de contaminação que um procedimento pode suportar e ainda manter sua robustez. O desempenho deste método foi melhorada pelo algoritmo FAST-LTS de Rousseeuw e Van Driessen (2000).
- c) Estimador S: é um método de alto valor de repartição assintótica que foi introduzido por Rousseeuw e Yohai (1984). Dado o mesmo valor de repartição, a estimativa S tem uma maior eficiência estatística do que a estimativa LTS.
- d) Estimador MM: introduzido por Yohai (1987): combina alta estimativa do valor de quebra e M estimativa. Tem a mesma propriedade de degradação elevada como a estimativa S, mas uma maior eficiência estatística, quando os erros seguem a distribuição Gaussiana.

Nesse estudo o método utilizado é MM, portanto foi abordado com maior profundidade. Foi descrito em três etapas da seguinte forma:

- Fase 1: Um estimador com elevado ponto de ruptura é usado para encontrar uma estimativa inicial, denotado de  $\tilde{\beta}$ . O estimador precisa ser eficiente. Os resíduos são computados por  $r_i(\beta) = y_i - x_i^T \tilde{\beta}$ .
- Fase 2: Um estimador M de escala,  $s_n$ , com 50% de ponto de ruptura é calculado utilizando os resíduos do ajuste robusto e pela equação algébrica não-linear  $\frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \rho\left(\frac{r_i}{s}\right) = K$ , onde  $K$  é uma constante e a função  $\rho$  objetivo. O

$s(r_1(\tilde{\beta}), \dots, r_n(\tilde{\beta}))$  é denominado de  $s_n$  e a função objetiva utilizada nessa etapa é  $\rho_0$ . Em que a função deve satisfazer as seguintes condições:

- É simétrica, continuamente diferenciável, e  $\rho_0 = 0$ ;
- existe um  $c > 0$  que  $\rho$  é estritamente crescente em  $[0, c]$  e constante em  $[0, \infty]$ . Essas condições implicam que a função seja redescendente.

- Fase 3: O estimador MM é agora definido como um estimador M de  $\beta$  usando uma função de pontuação de redescendência,  $\varphi_i(u) \frac{\partial \rho_i(u)}{\partial u}$  e a escala estimada  $s_n$  obtida a partir da fase 2. Assim, o estimador MM é definido como solução para  $\sum_{i=1}^n x_{ij} \varphi_1\left(\frac{y_i - x_i^T \tilde{\beta}}{s_n}\right) = 0 \quad j = 1, \dots, p$ .

### APÊNDICE C – COPA DE *Araucaria angustifolia* COM DISTÂNCIA IRREGULAR DOS PSEUDO VERTICÍLOS E COPA EM FORMA DE UMBELA NA FLONA DE SÃO FRANCISCO DE PAULA, RS



Fonte: Autora (2018).

## APÊNDICE D – ALGUNS PROGRAMAS UTILIZADOS

Regressão com Mínimos Quadrados Ordinários, Regressão Quantílica e Robusta.

```

ODS GRAPHICS ON;
PROC SORT DATA=A;
    BY ARV;
TITLE ' Mínimos Quadrados Ordinários ';
PROC REG OUTEST=PARMS1 DATA=A;
MODEL D=ANOS/ SPEC INFLUENCE;
    BY ARV;
OUTPUT OUT=S1 R=R1 P=EST1;
TITLE ' Regressão Quantílica 0.4';
PROC QUANTREG OUTEST=PARMS2 DATA=A;
MODEL D=ANOS/QUANTILE = 0.4;
    BY ARV;
    OUTPUT OUT=S2 RESIDUAL=R2 PREDICTED=EST2
TITLE ' Regressão Quantílica 0.5';
PROC QUANTREG OUTEST=PARMS3 DATA=A;
MODEL D=ANOS/QUANTILE = 0.5;
    BY ARV;
    OUTPUT OUT=S3 RESIDUAL=R3 PREDICTED=EST3;
TITLE ' Regressão Quantílica 0.6';
PROC QUANTREG OUTEST=PARMS4 DATA=A;
MODEL D=ANOS/QUANTILE = 0.6;
    BY ARV;
    OUTPUT OUT=S4 RESIDUAL=R4 PREDICTED=EST4;
TITLE 'Regressão Robusta';
PROC ROBUSTREG METHOD=MM (INITEST=S) OUTEST=PARMS5 PLOTS=ALL
DATA=A;
    MODEL D=ANOS/ DIAGNOSTICS LEVERAGE;
    BY ARV;
    OUTPUT OUT=S5 R=R5 P=EST5;
RUN;QUIT;
ODS GRAPHICS OFF;

```