



UNIVERSIDADE FEDERAL DO ESPÍRITO SANTO  
CENTRO DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS E ENGENHARIAS  
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**MARIANA DE AQUINO ARAGÃO**

**MODELAGEM DA DISTRIBUIÇÃO DE DIÂMETROS EM POVOAMENTOS DE  
PARICÁ SOB DIFERENTES ESPAÇAMENTOS**

JERÔNIMO MONTEIRO – ES

2018

**MARIANA DE AQUINO ARAGÃO**

**MODELAGEM DA DISTRIBUIÇÃO DE DIÂMETROS EM POVOAMENTOS DE  
PARICÁ SOB DIFERENTES ESPAÇAMENTOS**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.  
Orientador: Prof. Dr. Adriano Ribeiro de Mendonça  
Coorientador: Prof. Dr. Gilson Fernandes da Silva

**JERÔNIMO MONTEIRO – ES**

**2018**

Dados Internacionais de Catalogação-na-publicação (CIP)  
(Biblioteca Setorial Sul, Universidade Federal do Espírito Santo, ES, Brasil)  
Bibliotecário: Felício Gomes Corteletti – CRB-6 ES-000646/O

---

Aragão, Mariana de Aquino, 1992-  
A659m Modelagem da distribuição de diâmetros em povoamentos de  
paricá sob diferentes espaçamentos / Mariana de Aquino Aragão. –  
2018.  
100 f. : il.

Orientador: Adriano Ribeiro de Mendonça.  
Coorientador: Gilson Fernandes da Silva.

Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade  
Federal do Espírito Santo, Centro de Ciências Agrárias e Engenharias.

1. Produtividade florestal. 2. Mensuração florestal. 3.  
Espaçamento. I. Mendonça, Adriano Ribeiro. II. Silva, Gilson  
Fernandes. III. Universidade Federal do Espírito Santo. Centro de  
Ciências Agrárias e Engenharias. IV. Título.

CDU: 630

---

**MODELAGEM DA DISTRIBUIÇÃO DE DIÂMETROS EM POVOAMENTOS DE  
PARICÁ SOB DIFERENTES ESPAÇAMENTOS**

**Mariana de Aquino Aragão**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais do Centro de Ciências Agrárias e Engenharias da Universidade Federal do Espírito Santo, como parte das exigências para obtenção do Título de Mestre em Ciências Florestais na Área de Concentração Ciências Florestais.

Aprovada em 19 de fevereiro de 2018.



---

**Prof. Dr. Leonardo Job Biali** (Examinador externo)  
Universidade de Brasília



---

**Dr. Daniel Henrique Breda Binoti** (Examinador externo)  
Universidade Federal do Espírito Santo



---

**Prof. Dr. Gilson Fernandes da Silva** (Coorientador)  
Universidade Federal do Espírito Santo



---

**Prof. Dr. Adriano Ribeiro de Mendonça** (Orientador)  
Universidade Federal do Espírito Santo

*Aos meus pais, Pedro e Marise, com todo meu amor e gratidão,*

*Dedico.*

*“Foi o tempo que dedicaste à tua rosa que  
a fez tão importante.”*

Antoine de Saint-Exupéry

## **AGRADECIMENTOS**

À Deus, por ser o guia da minha vida, me proporcionando aprendizado em cada etapa dessa caminhada.

À minha mãe, Marise, por ser meu maior exemplo de perseverança e fé, obrigada por ser quem é, e nunca permitir que eu fraquejasse. Ao meu pai, Pedro, obrigada por ser o porto seguro, com quem eu posso contar nos momentos de dificuldade. Vocês são o motivo pelo qual eu consegui chegar até aqui. Amo vocês!

À toda minha família, em especial aos irmãos Felipe e Rogério, pelo carinho e por me apoiarem durante toda a vida.

Ao programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais – UFES, em nome de todos os funcionários e professores, pela oportunidade em fazer parte dessa história e me permitir conhecer o Brasil sem ao menos sair de Jerônimo.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – CAPES, pela concessão da bolsa de estudos.

Aos meus orientadores, Adriano Ribeiro de Mendonça e Gilson Fernandes da Silva, pela confiança, paciência e por todo conhecimento compartilhado, contribuindo para o meu crescimento profissional e pessoal.

Ao Daniel Binoti, pelas sugestões e conselhos durante todo o desenvolvimento deste trabalho.

Ao Leonardo Bialli, pelas sugestões para a melhoria deste trabalho.

Aos amigos “2016.1”, por terem formado uma família em Jerônimo Monteiro e me proporcionado momentos leves e muito divertidos. Em especial, às minhas irmãzinhas, Genilda e Kaíse, por terem sido as primeiras à me abraçar, dividir comigo o lar (sem ao menos me conhecer) e dedicarem à mim uma bela amizade.

Aos colegas do laboratório de Mensuração e Manejo Florestal, por compartilharem comigo experiências, conhecimentos e risadas, obrigada por cada momento que pudemos passar juntos. De modo especial, agradeço à Sandra, Catherine, Harliany, Julyana, Letícia, Vanessa e Taís (agregada mais linda, rsrs) por terem me acolhido nos momentos em que mais precisei, pela amizade, conversas, sorrisos, companheirismo, pedaladas, “escaladas”, cafés da tarde, filmes, choros e lamentações. Vocês me proporcionaram uma amizade muito linda, sou muito grata à

Deus por ter posto em meu caminho criaturas tão especiais, que levarei por toda vida.

Aos velhos e bons amigos, de Itororó à UESB, que mesmo de longe, ouviam, aconselhavam, alegravam e me davam força para seguir em frente.

À cidade de Jerônimo Monteiro, em nome de todos os moradores que conheci, por ter me acolhido de uma forma tão simples e alegre. Aqui conheci uma força que nem eu mesmo sabia que tinha, aprendi a lidar com situações que nunca imaginei passar e vivi momentos que irão ficar guardados em mim para o resto da vida.

À todos que de alguma maneira apoiou, ajudou ou torceu pelo meu crescimento, minha eterna GRATIDÃO!



## RESUMO GERAL

ARAGÃO, MARIANA DE AQUINO. **Modelagem da distribuição de diâmetros em povoamentos de paricá sob diferentes espaçamentos.** 2018. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Orientador: Adriano Ribeiro de Mendonça. Coorientador: Gilson Fernandes da Silva

O conhecimento a respeito do crescimento da árvore e da produção florestal, assim como as estimativas dessas variáveis, são essenciais para viabilizar o planejamento, gerenciamento e controle de uma floresta. A modelagem da distribuição de diâmetros é amplamente utilizada para esse fim, que além de permitir a descrição atual do povoamento, permite a projeção da produção e auxiliam na tomada de decisão. Dessa forma, esse trabalho tem como objetivo propor um sistema de projeção da distribuição de diâmetros para povoamentos de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby (paricá) sob diferentes espaçamentos. Os dados utilizados nessa pesquisa foram provenientes de povoamentos homogêneos de paricá, localizados no estado do Pará, plantados sob os espaçamentos 3x2, 3x3, 3x4, 4x4 e 5x5 m. Ajustou-se as funções Weibull 2 e 3 parâmetros, Weibull 2 parâmetros com parâmetro de locação fixo no *DAP* mínimo, Weibull 3 parâmetros truncada à direita, Hiperbólica 2 e 3 parâmetros, Log-logística 2 e 3 parâmetros e Logística-generalizada. Após o ajuste das *fdp*'s, foi aplicado o teste de Kolmogorov-Smirnov para a avaliação da aderências aos dados, a 5% de significância, assim como a análise gráfica dos dados observados e estimados. As funções avaliadas obtiveram aderência aos dados observados superior a 98 %, e de acordo análise gráfica descreveu com eficiência os dados de campo nos cinco espaçamentos estudados, indicando que todas podem ser empregadas para a modelagem da distribuição de diâmetros de paricá. Na projeção dos diâmetros utilizou-se a função Weibull para a recuperação dos parâmetros por ser flexível e de fácil utilização. Foram ajustados sete modelos de regressão, para cada um dos espaçamentos. Os modelos foram avaliados por meio do coeficiente de determinação ajustado ( $\bar{R}^2$ ), viés (V%) e da raiz do quadrado médio do erro (RQME%). O parâmetro de forma não apresentou boa estimativa, principalmente para os espaçamentos 3x4 e 5x5 m. Foi possível obter sistemas de equações para a projeção dos parâmetros das funções em quatro dos espaçamentos estudados, exceto para o espaçamento 5x5 m.

**Palavras-chave:** Função Densidade de Probabilidade, Prognose, *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*

## GENERAL ABSTRACT

ARAGÃO, MARIANA DE AQUINO. **Modeling the distribution of diameters in paricá stands under different spacing.** 2018. Dissertation (Master Degree in Forest Science) – Federal University of Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES. Adviser: Adriano Ribeiro de Mendonça. Co-adviser: Gilson Fernandes da Silva

Knowledge about tree growth and forest products, as well as estimates of these variables, are essential to enable the planning, management and control of a forest. The modeling of the diameter distribution is widely used for this purpose, it also allows a current description of the forest stand, allows the production projection and aid in the decision making. Thus, this work aims to propose a system of projection of the diameter distribution for *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby (paricá) stands under different spacings. The data used in this research came from homogeneous stands of the paricá, located in the state of Pará, arranged under the spacings 3x2, 3x3, 3x4, 4x4 and 5x5 m. The functions Weibull 2 and 3 parameters, Weibull 2 parameters with location parameter fixed in the minimum DBH, Weibull 3 parameters truncated to the right, Hyperbolic 2 and 3 parameters, Log-logistic 2 and 3 parameters and Logistics-generalized were fitted. to stands of *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*. After the fit of the *pdf*'s, the Kolmogorov-Smirnov test was applied for the evaluation of adherence to the data, at 5% of significance, as well as the graphical analysis of the observed and estimated data. The evaluated functions obtained adherence to the data observed above 98%, and according to graphic analysis, the field data were efficiently described in the five spacings studied, indicating that all can be used to model the diameters distribution of the paricá. In the projection of the diameters, the Weibull function was used for the recovery of the parameters because this function is considered more flexible and easy to use. Seven regression models were fitted for each of the spacings. The models were evaluated by means of the determination coefficient ( $\bar{R}^2$ ), the bias ( $B\%$ ) and the root mean square error ( $RMSE\%$ ). The shape parameter did not present a good estimate for all spacings, especially for spacings 3x4 and 5x5 m. It was possible to obtain systems of equations for the projection of the functions parameters in four of the studied spacings, except for the spacing 5x5 m.

**Keywords:** Probability Density Function, Prognosis, *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*

## SUMÁRIO

<b>1 INTRODUÇÃO GERAL .....</b>	<b>14</b>
<b>2 OBJETIVOS .....</b>	<b>16</b>
<b>2.1 Objetivo geral .....</b>	<b>16</b>
<b>2.2 Objetivos específicos .....</b>	<b>16</b>
<b>3 REVISÃO DE LITERATURA .....</b>	<b>17</b>
<b>3.1 <i>Schizolobium parahyba</i> var. <i>amazonicum</i> (Huber ex Ducke) Barneby .....</b>	<b>17</b>
<b>3.2 Modelagem do crescimento e da produção .....</b>	<b>18</b>
<b>3.3 Modelos da distribuição de diâmetros (<i>MDD</i>) .....</b>	<b>19</b>
3.3.1 Função Weibull .....	23
3.3.2 Função log-logística .....	24
3.3.3 Função logística-generalizada.....	24
3.3.4 Função hiperbólica .....	25
<b>3.4 Métodos de ajuste das funções densidade de probabilidade (<i>fdp</i>).....</b>	<b>25</b>
3.4.1 Método dos momentos .....	25
3.4.2 Método dos percentis .....	26
3.4.3 Método da máxima verossimilhança .....	26
<b>3.5 Aplicações das <i>fdp</i> na mensuração florestal .....</b>	<b>27</b>
<b>3.6 Testes de aderência .....</b>	<b>29</b>
<b>REFERÊNCIAS .....</b>	<b>31</b>
<b>CAPÍTULO I - FUNÇÕES DENSIDADE DE PROBABILIDADE PARA A DESCRIÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE DIÂMETROS EM POVOAMENTOS DE <i>Schizolobium parahyba</i> var. <i>amazonicum</i> .....</b>	<b>37</b>
<b>RESUMO .....</b>	<b>37</b>
<b>ABSTRACT .....</b>	<b>38</b>
<b>1 INTRODUÇÃO.....</b>	<b>39</b>

<b>2 METODOLOGIA</b> .....	<b>41</b>
2.1 Descrição dos dados .....	41
2.2 Descrição e ajuste das funções densidade de probabilidade .....	44
<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>47</b>
<b>4 CONCLUSÃO</b> .....	<b>68</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>69</b>
<b>CAPÍTULO II - SISTEMA DE PROJEÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE DIÂMETROS EM POVOAMENTOS DE <i>Schizolobium parahyba</i> var. <i>amazonicum</i> SOB DIFERENTES ESPAÇAMENTOS</b> .....	<b>72</b>
<b>RESUMO</b> .....	<b>72</b>
<b>ABSTRACT</b> .....	<b>73</b>
<b>1 INTRODUÇÃO</b> .....	<b>74</b>
<b>2 METODOLOGIA</b> .....	<b>76</b>
2.1 Descrição dos dados .....	76
2.2 Modelos de distribuição de diâmetros por espaçamento .....	77
2.3 Modelos de distribuição de diâmetros com inclusão da variável área útil ..	78
2.4 Avaliação dos modelos de distribuição .....	79
<b>3 RESULTADOS E DISCUSSÃO</b> .....	<b>81</b>
3.1 Modelos de distribuição de diâmetros por espaçamento .....	81
3.2 Modelos de distribuição de diâmetros com inclusão da variável área útil ..	89
<b>4 CONCLUSÃO</b> .....	<b>91</b>
<b>REFERÊNCIAS</b> .....	<b>92</b>
<b>4 CONCLUSÕES GERAIS</b> .....	<b>94</b>
<b>APÊNDICE A – Resultados dos ajustes dos modelos para projeção da distribuição de diâmetros de povoamentos de <i>Schizolobium parahyba</i> var. <i>amazonicum</i> referente ao espaçamento 3x2m</b> .....	<b>95</b>
<b>APÊNDICE B – Resultados dos ajustes dos modelos para projeção da distribuição de diâmetros de povoamentos de <i>Schizolobium parahyba</i> var. <i>amazonicum</i> referente ao espaçamento 3x3m</b> .....	<b>96</b>

<b>APÊNDICE C – Resultados dos ajustes dos modelos para projeção da distribuição de diâmetros de povoamentos de <i>Schizolobium parahyba</i> var. <i>amazonicum</i> referente ao espaçamento 3x4m .....</b>	<b>97</b>
<b>APÊNDICE D – Resultados dos ajustes dos modelos para projeção da distribuição de diâmetros de povoamentos de <i>Schizolobium parahyba</i> var. <i>amazonicum</i> referente ao espaçamento 4x4m .....</b>	<b>98</b>
<b>APÊNDICE E – Resultados dos ajustes dos modelos para projeção da distribuição de diâmetros de povoamentos de <i>Schizolobium parahyba</i> var. <i>amazonicum</i> referente ao espaçamento 5x5 m .....</b>	<b>99</b>
<b>APÊNDICE F – Resultados dos ajustes dos modelos para projeção da distribuição de diâmetros de povoamentos de <i>Schizolobium parahyba</i> var. <i>amazonicum</i> para todos os espaçamentos em conjunto.....</b>	<b>100</b>

## 1 INTRODUÇÃO GERAL

No Brasil, os plantios florestais são responsáveis por 90% de toda matéria prima madeireira para fins industriais, destacando-se os plantios dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*, espécies exóticas de elevada produtividade e com boa adaptação (IBÁ, 2017). Os plantios de espécies nativas arbóreas vêm ganhando representatividade (CORDEIRO et al., 2015), correspondendo à uma área de 589.361 hectares, ou seja, 7,5% do total dos plantios brasileiros (IBÁ, 2017).

O paricá (*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*), nativo da região Amazônica, apresenta destaque na região Norte do país por possuir características que motivam os plantios em escala comercial (VIDAURRE, 2010). A área reflorestada com essa espécie cresceu aproximadamente 5% de 2011 a 2017, ocupando cerca de 90 mil hectares (IBÁ, 2017). As características da madeira, como pouca incidência de defeitos e nós, torna a espécie de grande potencial para expansão da cadeia produtiva, principalmente no que diz respeito à produção de lâminas e derivados (MONTEIRO et al., 2013).

As lâminas de madeira são produtos utilizados como matéria-prima para a indústria de compensado, em que os painéis são empregados na construção civil e para a fabricação de móveis e pisos (SILVA et al., 2015). O rendimento na produção de lâminas de madeira está diretamente ligado ao diâmetro e à forma das árvores (SANTOS, 2012). Dessa maneira, informações acerca do comportamento da espécie, assim como os tratamentos culturais adequados durante o plantio e o desenvolvimento das árvores, são imprescindíveis para garantir maior produtividade e sustentabilidade da produção.

O conhecimento sobre a produção madeireira de uma floresta em diferentes condições de idade, sítio e espaçamento permite indicar, de forma mais adequada, qual alternativa de planejamento deve ser utilizada em um projeto florestal. Nesse contexto, a estimativa do crescimento e da produção são ferramentas importantes para o gerenciamento e controle de um povoamento.

Dentre os modelos de crescimento e produção destacam-se os modelos de distribuição de diâmetros (*MDD*). Este tipo de modelo se caracteriza como um método capaz de estimar com eficiência o número de árvores por classe de diâmetro nas idades presente e futuras, o que permite obter a produção em cada classe, sendo significativos para situações de quantificação de multiprodutos de madeira (CAMPOS; LEITE, 2017).

Os *MDD* classificam o povoamento florestal por classe de diâmetro e podem ser modelados a partir de funções densidade de probabilidade (*fdp*). Os parâmetros das *fdp*'s apresentam alta correlação com as variáveis do povoamento como idade e diâmetro, e são capazes de estimar a quantidade de árvores por hectare em cada classe, nas idades atual e futura. Nesse âmbito, a função Weibull apresenta aplicação mais comum devido à grande flexibilidade (CAMPOS; LEITE, 2017). No entanto, ainda que menos frequentes, outras distribuições também são utilizadas para descrever a distribuição por classe de diâmetro como a hiperbólica, lognormal, log-logística, beta, gama, logística-generalizada e  $S_B$  Jonhson (VANCLAY, 1994).

Diversos estudos foram desenvolvidos a fim de descrever o crescimento de plantios florestais por meio de modelos de distribuição de diâmetros. Vários destes, direcionados aos povoamentos de *Eucalyptus* e *Pinus*, podendo-se citar os trabalhos de Binoti, Binoti e Leite (2015a; 2015b), Binoti et al. (2011), Dias et al. (2005), Ferraz Filho et al. (2015), Leite et al. (2013), Nogueira et al. (2005), Schneider et al. (2008). Contudo, ainda são escassas as pesquisas desenvolvidas a respeito do manejo e crescimento em plantios comerciais de espécies nativas, incluindo o paricá.

Para esta espécie é possível citar o trabalho realizado por Santos (2012), em que foi utilizada a função Weibull dois parâmetros para projetar os diâmetros em idades futuras, avaliando o método dos ingressos percentuais para estimar a idade ideal para o desbaste. No entanto, esse estudo não avaliou o efeito do truncamento desta função, ou mesmo a eficiência de outras funções em estimar a distribuição de diâmetros e verificar qual seria a mais adequada para o povoamento em questão. Isso gerou uma dúvida de que a função ajustada talvez não seja a que melhor descreva à distribuição de diâmetros do plantio.

Apesar do crescimento em áreas plantadas com paricá, ainda existem lacunas no que diz respeito à modelagem do crescimento e produção dessa espécie. Isto indica que é necessário novos estudos que possibilitem melhorar o conhecimento sobre a forma mais adequada de conduzir os povoamentos.

## 2 OBJETIVOS

### 2.1 Objetivo geral

Ajustar sistemas de prognose da distribuição de diâmetros para plantios de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* conduzidos sob diferentes espaçamentos.

### 2.2 Objetivos específicos

- Ajustar diferentes funções densidade de probabilidade para povoamentos de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* sob diferentes espaçamentos;
- Selecionar as funções densidade de probabilidade que melhor representem as distribuições de diâmetros dos povoamentos de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* sob diferentes espaçamentos;
- Ajustar, analisar e selecionar modelos de regressão para recuperação dos parâmetros da função densidade de probabilidade testada, em cada espaçamento, em povoamentos de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*.
- Ajustar, analisar e selecionar modelos de regressão com inclusão de área útil para recuperação dos parâmetros das funções densidade de probabilidade testadas, em povoamentos de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*, considerando os cinco espaçamentos estudados.



### 3 REVISÃO DE LITERATURA

#### 3.1 *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby

A espécie *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby, é conhecida popularmente como paricá, paricá-da-amazônia, canafístula, guapuruvu-da-amazônia ou bandarra. Naturalmente, apresenta ampla distribuição geográfica em altitude de até 800 metros, ocorrendo na Região Amazônica brasileira, venezuelana, colombiana, peruana, boliviana, equatoriana e em toda América Central. No Brasil, a espécie se encontra nos estados do Amazonas, Pará, Mato Grosso, Rondônia e Acre (CARVALHO, 2007).

O paricá é uma espécie de grande porte, pertencente à família Fabaceae, subfamília Caesalpinoideae, natural de florestas primária e secundária tanto em solos de terra firme como em várzea (CORDEIRO et al., 2015). Na floresta, as árvores podem alcançar cerca de 40 m de altura e 100 cm de diâmetro a altura de 1,30m (*DAP*) (CARVALHO, 2007).

A espécie possui copa pouco densa, tronco cilíndrico e reto com presença de sapopemas desde a fase jovem, podendo alcançar até 1,5 m de altura em árvores mais velhas; casca lisa e verde quando jovem, tornando-se cinza-amarelada com manchas esbranquiçadas na fase adulta; as folhas são alternas, compostas, chegando a um metro de comprimento; as inflorescências são em forma de racemos terminais na cor amarela; o fruto é um legume deiscente, alado e a semente lisa e brilhante (SOUZA et al., 2003).

Uma das características principais apontadas acerca da espécie é o crescimento rápido, principalmente nos primeiros anos. Com isso, a espécie vem se tornando, desde meados dos anos 1990, uma alternativa viável para cultivo de novas florestas nas regiões Norte e Centro-Oeste do país (TEREZO, 2010).

O paricá vem sendo amplamente utilizado nos sistemas de produção florestal e agroflorestal. As características da madeira permitem a fabricação de pequenos produtos, tais como: brinquedos, saltos de calçados, palitos de fósforo, pranchetas (OHASHI; YARED; FARIAS NETO, 2010) e a produção de lâminas que abastecem, principalmente, o setor de madeira processada, sendo fonte de matéria prima para confecção de chapas de compensado (TEREZO, 2010).

O interesse na utilização do paricá para fins comerciais e em larga escala, faz com que se aumente a necessidade da busca pela informação a respeito do

comportamento da espécie, da qualidade da madeira e do manejo adequado para atingir a produção que seja capaz de abastecer o mercado. Com isso, várias pesquisas têm sido realizadas a fim de gerar informações que contribuam para o conhecimento sobre a tecnologia, silvicultura e manejo dos plantios (CORDEIRO et al., 2015; NEGREIROS et al., 2015; OHASHI; YARED; FARIAS NETO, 2010; SILVA et al., 2015; SANTOS, 2012; TEREZO, 2010; VIDAURRE, 2010).

### **3.2 Modelagem do crescimento e da produção**

A modelagem do crescimento e da produção de um povoamento florestal é essencial no gerenciamento de uma floresta. O crescimento de uma árvore consiste em mudanças no tamanho e forma do tronco devido à adição contínua de camadas de lenho ao longo do fuste, enquanto a produção denota a quantidade acumulada de volume, ou outra variável, em um determinado período de tempo (CAMPOS; LEITE, 2017).

A modelagem do crescimento e da produção florestal permite simular a dinâmica natural da floresta, de modo a estimar a produção ao longo do tempo, além de auxiliar na tomada de decisões relacionadas ao manejo florestal (VANCLAY, 1994). Dessa maneira, é dada uma grande importância aos modelos capazes de prever as características do povoamento, à curto ou longo prazo, para volume total da floresta ou por classe de produtos e tamanhos (BURKHART; TOMÉ, 2012).

Os modelos de crescimento e produção são classificados de acordo com o nível de detalhamento desejado (DAVIS et al. 2001; VANCLAY, 1994), em: modelos em nível de povoamento, modelos de árvores individuais e modelos de distribuição de diâmetros. Esses modelos, apesar de não responderem a detalhes sobre as causas do crescimento da floresta, são aplicados com sucesso para prognosticar a produção do povoamento (CAMPOS; LEITE, 2017).

Os modelos em nível de povoamento, também denominados modelos de povoamento total, permitem estimativas de crescimento e produção por unidade de área e utilizam como parâmetros variáveis do povoamento tais como idade, sítio e área basal. Os modelos mais utilizados são os modelos propostos por Schumacher em 1939, por Buckman em 1962 e especialmente o de Clutter, em 1963, devido à menor complexidade (CAMPOS; LEITE, 2017; DIAS et al., 2005). Essa modelagem atende aos usuários de forma eficiente, sendo considerada a categoria mais utilizada por empresas florestais no Brasil (CASTRO et al., 2013). No entanto, não

explica diretamente a variação do tamanho das árvores no povoamento (NORD-LARSEN; CAO, 2006).

Os modelos de árvores individuais consideram a árvore como unidade básica na modelagem. O crescimento e a produção são obtidos para cada árvore individualmente, em que a soma das produções corresponde a produção total (BETTINGER et al, 2009). Os modelos de árvores individuais permitem a obtenção de informações mais detalhadas do povoamento florestal, contudo, a obtenção das informações necessárias para a construção dos modelos torna-os com pouco valor prático aos manejadores florestais (CAMPOS; LEITE; 2017).

Como alternativa ao uso dos modelos de povoamento total e dos modelos de árvores individuais, utiliza-se os *MDD*, que proporcionam obtenção do desenvolvimento do povoamento dentro de cada classe de diâmetro, fornecendo conhecimento detalhado da floresta sem o aumento significativo na complexidade dos modelos (BETTINGER et al., 2009).

Os modelos de distribuição por classe de diâmetro, ou modelos de distribuição de diâmetros (*MDD*), estimam o número de árvores e a produção por hectare em cada classe de diâmetro no futuro, utilizando por base a idade e as demais características do povoamento, no presente (DAVIS et al, 2001). Esse tipo de modelo é imprescindível para definir antecipadamente estratégias para o manejo da floresta, possibilitando prognosticar o crescimento e a produção inclusive para multiprodutos da madeira (SCOLFORO; THIERSCHI, 1998).

Independentemente da complexidade estrutural e da quantidade de detalhes que permite fornecer, todos os modelos de crescimento e produção tem um propósito comum, produzir estimativas das características do povoamento em períodos de tempo específicos (BURKHART; TOMÉ, 2012). A seleção e aplicação de um dos modelos irá depender da quantidade e qualidade dos dados disponíveis e dos objetivos do manejo (CAMPOS; LEITE, 2017).

### **3.3 Modelos da distribuição de diâmetros (*MDD*)**

Os modelos de distribuição de diâmetros são bastante difundidos no setor florestal, pois além de fornecerem informações mais detalhadas que os modelos em nível de povoamento apresentam uma utilização mais simples que os modelos de árvores individuais (FIGURA, 2010). A distribuição dos diâmetros é importante para

descrever um povoamento florestal devido à alta correlação existente entre o diâmetro e outras variáveis, como altura e volume (CAMPOS; LEITE, 2017).

Os *MDD* permitem projetar o número de árvores por classe de diâmetro ao longo do tempo, fornecendo a proporção das árvores em cada classe. Essa classificação dos indivíduos em classes diamétricas pode ser realizada por meio de matrizes de transição, redes neurais artificiais, autômatos celulares, funções densidade de probabilidade (*fdp*), entre outros. Dentre esses métodos, é comum o uso de *fdp* para a descrição do povoamento, permitindo descrever alterações ocorridas na estrutura do povoamento durante a rotação (ABREU et al., 2002; NOGUEIRA et al., 2005).

Os *MDD* realizados por meio de *fdp* correlacionam coeficientes de funções probabilísticas com a estrutura do povoamento (ABREU et al., 2002). Essa modelagem é realizada em duas fases, em que a primeira é caracterizada pelo ajuste da funções densidade de probabilidade (*fdp*) aos dados da distribuição diamétrica de cada parcela e medição, e a segunda pela correlação dos parâmetros da *fdp* com as características do plantio (CAMPOS; LEITE, 2017).

As funções densidade de probabilidade, são funções probabilísticas contínuas, que podem ser agrupadas quanto aos picos de frequência, simetria, tipo de curvatura e número de variáveis aleatórias (GUIMARÃES, 2002). Essas funções apresentam como requisito geral, a não negatividade e que o resultado da sua integração, ao longo de todo domínio de variação, seja igual a um (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

A função Weibull é a *fdp* mais utilizada para a construção de modelos de distribuição de diâmetros na área florestal (BAILEY; DELL, 1973; CAMPOS; LEITE, 2017; CAO, 2004; LEITE, 1990; MEHTÄTALO; MALTAMO; KANGAS, 2006; NOGUEIRA et al. 2005). No entanto, existem outras funções de uso menos frequentes (beta, gama,  $S_B$  Jonhson, lognormal, log-logística, logística generalizada, hiperbólica e Nakagami), mas que também permitem descrever a estrutura do povoamento de forma consistente (ARAÚJO JÚNIOR et al., 2013; BINOTI; BINOTI; LEITE; 2015a; BINOTI et al., 2011; BINOTI et al; 2014; GUIMARÃES, 2002; LANA et al., 2013; SCOLFORO; THIERSCHI, 1998; SOUZA et al., 2016). De acordo com Campos e Leite (2017), as funções densidade de probabilidade de algumas distribuições são descritas conforme apresentado nas Equações 1 a 15 (Quadro 1).

Quadro 1 – Distribuições de probabilidade beta, gama,  $S_B$  Johnson, lognormal, log-logística, logística generalizada, hiperbólica, Nakagami e Weibull, com respectivas funções densidade de probabilidade (*fdp*) (Continua)

Distribuição	Função	Equação
<b>Beta</b>	$f(X) = \left( \frac{1}{B(\gamma_1, \gamma_2)} \right) \left( \frac{(X-a)^{\gamma_1-1} (b-X)^{\gamma_2-1}}{(b-a)^{\gamma_1+\gamma_2-1}} \right)$	(1)
	$B(\gamma_1, \gamma_2) = \int_0^1 t^{\gamma_1-1} (1-t)^{\gamma_2-1} dt$	(2)
$\gamma_1$ e $\gamma_2 > 0$ ; $a$ e $b$ são os limites da distribuição e $X$ variável aleatória.		
<b>Gama</b>	$f(X) = \frac{(X-\alpha)^{\gamma-1} e^{-[X-\alpha]/\beta}}{\beta^\gamma \Gamma(\gamma)}$	(3)
	$\Gamma(\gamma) = \int_0^\infty t^{\gamma-1} e^{-t} dt$	(4)
$\gamma$ é o parâmetro de escala ( $\gamma > 0$ ); $\beta$ é o parâmetro de escala ( $\beta > 0$ ); $\alpha$ é o parâmetro de localização e $X$ variável aleatória.		
<b><math>S_B</math> Johnson</b>	$f(X) = \frac{\delta \lambda}{\sqrt{2\pi(X-\varepsilon)(\lambda+\varepsilon-X)}} e^{-\lambda_2 \left( \gamma + \text{Ln} \left( \frac{X-\varepsilon}{\lambda+\varepsilon-X} \right) \right)}$	(5)
$\varepsilon$ é parâmetro de localização; $\lambda$ é parâmetro de escala; $\delta$ é o parâmetro de forma; $\gamma$ é o parâmetro de curtose e $X$ variável aleatória.		
<b>Lognormal 2 e 3 parâmetros</b>	$f(X) = \frac{e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\text{Ln}(X-\mu)}{\sigma} \right)^2}}{(X)\sigma\sqrt{2\pi}}$	(6)
	$f(X) = \frac{e^{-\frac{1}{2} \left( \frac{\text{Ln}(X-\alpha)-\mu}{\sigma} \right)^2}}{(X-\alpha)\sigma\sqrt{2\pi}}$	(7)
$\mu$ é a média; $\sigma$ é o desvio-padrão; e $X$ variável aleatória.		

Quadro 1 – Distribuições de probabilidade beta, gama, SB Johnson, lognormal, log-logística, logística generalizada, hiperbólica, Nakagami e Weibull, com respectivas funções densidade de probabilidade (fdp) (Continua)

Distribuição	Função	Equação
Log-logística 2 e 3 parâmetros	$f(X) = \left\{ \frac{\gamma}{\beta} \left( \frac{X}{\beta} \right)^{(\gamma-1)} \left( 1 + \left( \left( \frac{X}{\beta} \right)^\gamma \right)^{-2} \right) \right\}$	(8)
	$f(X) = \left\{ \frac{\alpha}{\beta} \left( \frac{X-\alpha}{\beta} \right)^{(\gamma-1)} \left( 1 + \left( \left( \frac{X-\alpha}{\beta} \right)^\gamma \right)^{-2} \right) \right\}$	(9)
<p><math>\gamma</math> é o parâmetro de escala; <math>\beta</math> é o parâmetro de escala; <math>\alpha</math> é o parâmetro de locação; e <math>X</math> variável aleatória.</p>		
Logística Generalizada	$f(X) = \left\{ \frac{\left( 1 + \gamma \left( \frac{X-\alpha}{\beta} \right) \right)^{-1-\gamma^{-1}}}{\beta \left( 1 + \left( 1 + \gamma \left( \frac{X-\alpha}{\beta} \right)^{-\gamma^{-1}} \right) \right)^2} \right\}$	(10)
<p><math>\gamma</math> é o parâmetro de escala; <math>\beta</math> é o parâmetro de escala; <math>\alpha</math> é o parâmetro de locação; e <math>X</math> variável aleatória.</p>		
Hiperbólica 2 e 3 parâmetros	$f(X) = \left\{ \frac{\gamma}{\beta} \left( \frac{X}{\beta} \right)^{(\gamma-1)} \left( 1 - \tanh \left( \left( \frac{X}{\beta} \right)^\gamma \right)^2 \right) \right\}$	(11)
	$f(X) = \left\{ \frac{\gamma}{\beta} \left( \frac{X-\alpha}{\beta} \right)^{(\gamma-1)} \left( 1 - \tanh \left( \left( \frac{X-\alpha}{\beta} \right)^\gamma \right)^2 \right) \right\}$	(12)
<p><math>\gamma</math> é o parâmetro de escala; <math>\beta</math> é o parâmetro de escala; <math>\alpha</math> é o parâmetro de locação; e <math>X</math> variável aleatória.</p>		
Nakagami	$f(X) = \frac{2m^m}{\Gamma(m)\Omega^m} x^{2m-1} \exp\left(-\frac{m}{\Omega} X^2\right)$	(13)
<p><math>m</math> e <math>\Omega</math> são parâmetros contínuos (<math>m \geq 0,5</math> e <math>\Omega &gt; 0</math>).</p>		

Quadro 1 – Distribuições de probabilidade beta, gama, SB Johnson, lognormal, log-logística, logística generalizada, hiperbólica, Nakagami e Weibull, com respectivas funções densidade de probabilidade (fdp) (Conclusão)

Distribuição	Função	Equação
<b>Weibull</b> <b>2 e 3</b> <b>parâmetros</b>	$f(X) = \frac{\gamma}{\beta} \left( \frac{X}{\beta} \right)^{\gamma-1} e^{-\left( \frac{X}{\beta} \right)^\gamma}$	(14)
	$f(X) = \frac{\gamma}{\beta} \left( \frac{X-\alpha}{\beta} \right)^{\gamma-1} e^{-\left( \frac{X-\alpha}{\beta} \right)^\gamma}$	(15)
$\gamma$ é o parâmetro de forma; $\beta$ é o parâmetro de escala; $\alpha$ é o parâmetro de locação; e $X$ variável aleatória.		

A recuperação dos parâmetros da função densidade de probabilidade é realizada a partir dos parâmetros na idade atual e de atributos do plantio, reais ou estimados (LAAR; AKÇA, 2007). A capacidade em correlacionar os parâmetros da função com as características do povoamento é fator limitador para a construção do sistema que compõe o modelo da distribuição de diâmetros (BINOTI et al., 2011).

Mesmo com a boa correlação entre os parâmetros da função Weibull com as características da floresta, estudos vêm propondo o emprego de diferentes funções para a projeção da distribuição diamétrica de povoamentos equiâneos (BINOTI; BINOTI; LEITE, 2015a). Dessa maneira, se faz necessário a intensificação dos estudos que demonstrem a eficiência dessas outras funções para a modelagem florestal.

### 3.3.1 Função Weibull

A função Weibull foi apresentada em 1928 por Fisher e Tippett em estudos de valores extremos e foi desenvolvida de forma independente por Weibull em 1939, ao estudar a confiabilidade de materiais. Após a II Guerra Mundial, o trabalho de Weibull teve destaque e a distribuição passou a ser associada à este nome (BAILEY; DELL, 1973). Em 1973, esta função foi introduzida no setor florestal pelos autores Bailey e Dell e, desde então, vem sendo amplamente utilizada para descrever a distribuição de diâmetros em florestas (LEITE et al., 2010).

A função Weibull três parâmetros é representada na Equação 15. O parâmetro de locação  $\alpha$  controla a posição da curva sobre o eixo das abscissas, o

parâmetro de escala  $\beta$  se refere a dimensão que a curva pode assumir; e o parâmetro de forma  $\gamma$  está diretamente relacionado com as diferentes inclinações que a distribuição pode tomar (SANTOS, 2012). O parâmetro  $\alpha$  pode ser interpretado como o menor diâmetro obtido nos dados ou como o limite inferior da menor classe de diâmetro. A função Weibull três parâmetros considera a influência desse parâmetro, enquanto a função Weibull dois parâmetros o desconsidera (BAILEY; DELL, 1973), assumindo o início desde a origem. A função Weibull dois parâmetros é representada pela Equação 14.

As funções com dois e três parâmetros são as mais empregadas no ajuste da função Weibull. No entanto, com o intuito de aprimorar as estimativas das distribuições diamétricas, são inseridos pontos de truncamento. A função Weibull truncada é utilizada quando se deseja considerar que a distribuição estimada deve estar dentro de um intervalo determinado pelos diâmetros mínimo e/ou máximo. O truncamento à direita normalmente é representado pelo diâmetro máximo do povoamento e as medidas de diâmetro superiores e pelo diâmetro mínimo na função truncada à esquerda (SOARES et al., 2010).

### 3.3.2 Função log-logística

A função log-logística foi proposta por Tadikamalla e Jhonson (1982) e vem se apresentando como uma alternativa à função Weibull (MENDOZA, 2012). A representação dessa função pode ser observada nas Equações 8 e 9 (Quadro 1), com a supressão do parâmetro de locação ou na forma completa, respectivamente.

Diversos trabalhos vêm sendo publicados coma a utilização da função log-logística nas mais diversas áreas do conhecimento, como saúde e hidrologia, por exemplo (MENDOZA, 2012). Isso demonstra a importância do estudo dessa função na descrição de povoamentos florestais. Binoti, Binoti e Leite (2015b), estudando a função log-logística para a modelagem da distribuição diamétrica em povoamentos de eucalipto, concluíram que essa distribuição é capaz de descrever com eficiência os povoamentos, bem como, ser base para a construção dos modelos de projeção.

### 3.3.3 Função logística-generalizada

A função logística-generalizada (Equação 10) se destacou na estatística probabilística e em várias aplicações na segunda metade do século XX. Essa função vem sendo aplicada nos mais diversos setores. Seu uso tem ênfase na área de



saúde, sendo utilizada para modelar dados de ganhos de peso, sobrevivência de pacientes leucêmicos, doenças respiratórias, entre outros (NADARAJAH; KOTZ, 2005).

A função logística-generalizada apresenta distribuição de alta flexibilidade (GUIMARÃES, 2002), o que permite o uso em várias áreas da ciência. Na mensuração florestal, essa função vêm demonstrando desempenho satisfatório para descrever e projetar a distribuição de povoamentos de eucalipto (BINOTI; BINOTI; LEITE, 2015a; SOUZA et al, 2016).

### 3.3.4 Função hiperbólica

Guimarães (2002) apresentou a função hiperbólica como proposta de uma nova função densidade de probabilidade para descrever distribuições de diâmetros. Essa função gera distribuições com pontos de inflexão que variam de 0 até 0,76, o que confere à função maior flexibilidade se comparada com a função Weibull, com ponto de inflexão entre 0 e 0,63 (GUIMARÃES, 2002).

A função hiperbólica com três parâmetros está apresentada na Equação 12. A supressão do parâmetro de locação, assim como na função Weibull, configura a função hiperbólica com dois parâmetros (Equação 11).

## 3.4 Métodos de ajuste das funções densidade de probabilidade (*f<sub>dp</sub>*)

Para os ajustes das distribuições, os parâmetros das funções podem ser estimados de acordo diferentes métodos, tais como o método dos momentos, percentis e máxima verossimilhança (CLUTTER et al., 1983). Entretanto, a escolha do método a ser empregado dependerá da precisão determinada e da função que será utilizada (ARAÚJO JÚNIOR et al., 2010).

### 3.4.1 Método dos momentos

O método dos momentos, proposto em 1900 por Karl Pearson, infere que os momentos da distribuição amostral coincidem com os da população, podendo assim, obter-se um sistema de equações capaz de fornecer estimativas desejadas (NAGHETTINI; PINTO, 2007). Nesse método, são obtidos os momentos de primeira e segunda ordens centrados na origem (SILVA et al., 2002), em que, no caso de distribuições de diâmetros das árvores, o diâmetro médio aritmético e o diâmetro

médio quadrático são considerados o primeiro e segundo momento amostral, respectivamente (FIGURA, 2010).

Apesar de ser considerado um método mais simples e que exige menor esforço computacional, esse não é o método mais utilizado, pois em geral os estimadores têm qualidade inferior e menor eficiência que os estimadores do método da máxima verossimilhança. Entretanto, para amostras pequenas os estimadores dos momentos podem ser comparáveis ou superiores aos demais (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

#### 3.4.2 Método dos percentis

Os percentis são uma medida de posição que consiste em dividir a distribuição em cem partes iguais a fim de estimar os parâmetros nas posições desejadas. O método baseado nos percentis é indicado quando se deseja obter um modelo de distribuição para simulação de produção florestal no qual não se conhece a verdadeira distribuição que se deseja projetar (WENDLING, 2007). Esse método é considerado o mais simples, claro e independente para estimar parâmetros da *fdp* Weibull, pois necessita apenas de funções auxiliares para estimar os dois diâmetros percentis com a segurança similar às funções que estimam limites de diâmetros (WENDLING; EMERENCIANO; HOSOKAWA, 2011). No entanto, apesar de ser considerado como método bastante simples para estimação, esse método não é muito difundido no setor florestal.

Soares et al. (2007), estimando parâmetros de funções densidade de probabilidade pela metodologia de passo invariante, encontrou resultados satisfatórios com a utilização do método dos percentis. Esses autores recomendam a utilização da metodologia em povoamentos desbastados de eucalipto, principalmente por ser baseado apenas no método dos percentis da distribuição diamétrica, o qual é considerado simples no ajuste do modelo.

#### 3.4.3 Método da máxima verossimilhança

O método da máxima verossimilhança, desenvolvido por Gauss em 1821, redescoberto e formalizado por Fisher em 1950, é um método paramétrico considerado mais eficiente para estimação, porque produz os estimadores de menor variância (NAGHETTINI; PINTO, 2007).

Diversos autores empregam o método da máxima verossimilhança para ajustar as funções, indicando que esse permite estimativas superiores aos demais, com menor presença de viés. Esse método consiste em selecionar, entre os possíveis valores dos parâmetros populacionais, os que tornam mais provável a ocorrência de uma amostra idêntica a efetivamente observada (LOPES, 2007), ou seja, tal método consiste em obter estimadores que maximizem a função densidade de probabilidade das observações a respeito dos efeitos fixos e dos componentes de variância (FRAGA FILHO, 2016).

Os estimadores do método de máxima verossimilhança são consistentes, eficientes e assintoticamente não viesados. Entretanto, para amostras de pequeno tamanho, embora haja correção, os estimadores podem ser viesados (NAGHETTINI; PINTO, 2007). Apesar de o método exigir maior esforço computacional, com o avanço tecnológico esse método ganhou ainda maior destaque, pois os procedimentos computacionais otimizam a estimativa dos parâmetros (ARAÚJO JÚNIOR et al., 2010).

### **3.5 Aplicações das *fdp* na mensuração florestal**

As funções de probabilidade têm sido amplamente utilizadas em diversos estudos para explicar a estrutura dos povoamentos florestais. Esses trabalhos permitiram inferir o desempenho dessas funções para as mais variadas condições, possibilitando modelar e prognosticar o crescimento e a produção para espécies, sítios, idades e/ou espaçamentos distintos, utilizando os diferentes métodos de ajuste.

Scolforo e Thiersch (1998) descreveram que, dependendo da função a ser utilizada, um ou mais métodos de ajuste podem ser considerados. Esses autores desenvolveram uma pesquisa com povoamento de *Eucalyptus camaldulensis* no noroeste do estado de Minas Gerais, a fim de comparar e testar a eficiência da distribuição  $S_B$  Johnson pelos métodos dos momentos e da máxima verossimilhança. A distribuição ajustada pelo método dos momentos teve melhor desempenho para estimar as frequências que a da máxima verossimilhança. Silva et al. (2009) verificaram a eficiência dessa mesma distribuição, ajustada por meio do método dos momentos, em povoamento da mesma espécie, onde a função  $S_B$  Johnson permitiu estimar com eficiência a produção presente e futura de plantios homogêneos.

Binoti et al. (2011), em povoamentos do híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* na Bahia, avaliaram a eficiência da função hiperbólica nas diferentes formas, com dois e três parâmetros, truncada à direita e com o diâmetro mínimo em substituição ao parâmetro de locação. Esses autores verificaram que todas essas formas podem ser utilizadas para descrição e projeção da estrutura diamétrica, em que a não supressão do parâmetro de locação pode apresentar redução na eficiência das estimativas dos modelos. Souza et al. (2016), buscaram a função que melhor descrevesse a estrutura diamétrica de um povoamento do mesmo híbrido, em povoamentos desbastados, e testaram as funções Weibull, hiperbólica, log-logística, logística generalizada, Fatigue life e Frechet. As funções hiperbólica e logística generalizada se destacaram em relação às demais.

Binoti et al. (2012) em estudo com teca (*Tectona grandis*), afirmam que, além da função Weibull, outras funções como, Fatigue life, Frechet, gama, gama generalizada, logística generalizada, log-logística, Nakagami, beta, Burr, Dagum e hiperbólica, podem ser utilizadas para descrever a estrutura do diâmetro de povoamentos submetidos a desbaste, resultando em maior precisão. Esses autores sugerem ainda, que essas funções sejam testadas com outras espécies e em outras condições.

Araújo Júnior et al. (2013) verificaram que a função gama de dois parâmetros pode ser utilizada para descrever o comportamento de povoamentos do híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, resultando em estimativas com exatidão da distribuição diamétrica e ausência de viés.

Estudos desenvolvidos também com o mesmo híbrido, localizados no centro-oeste do estado de Minas Gerais, analisaram a aplicação das funções Nakagami (BINOTI et al., 2014), logística generalizada (BINOTI; BINOTI; LEITE, 2015a) e log-logística (BINOTI; BINOTI; LEITE, 2015b) para a descrição da estrutura diamétrica dos povoamentos. Comparadas à função Weibull, essas funções também podem ser utilizadas com eficiência para projetar a distribuição de diâmetros.

Apesar da eficiência comprovada das demais funções densidade de probabilidade, a Weibull ainda é a mais utilizada no setor florestal. Diversos autores afirmam a eficiência dessa função para descrever a distribuição dos diâmetros em plantios de diferentes espécies (ACERBI JÚNIOR et al., 2002; CASTRO et al., 2016; LEITE et al., 2006; RETSLAFF et al., 2012; SOARES et al., 2010), inclusive para floresta nativa (ORELLANA et al., 2014).

Ferraz Filho (2009) afirmou que a função Weibull é eficiente e flexível para descrever e prognosticar diâmetros em povoamentos de *Pinus taeda* L. sujeitos a regimes de desbaste e poda, propiciando estimativas precisas da distribuição diamétrica.

Araújo Júnior et al. (2012) utilizaram a função Weibull para descrever a área basal por classe diamétrica em um povoamento do híbrido de *Eucalyptus urophylla* com *Eucalyptus grandis* no noroeste do estado da Bahia. Essa função pode ser utilizada para esse fim e permite obter o número de indivíduos por classe de diâmetro com base na área basal por classe estimada, sem perda de informação.

Santos (2012), estudou a distribuição e projeção dos diâmetros para calcular a idade técnica de desbaste em povoamentos de paricá (*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*). A função Weibull foi utilizada para projetar a distribuição diamétrica futura e concluiu-se que o emprego dessa função foi consistente e teve estimativas semelhantes entre as frequências observadas e estimadas.

### 3.6 Testes de aderência

Os testes de aderência são utilizados com o intuito de avaliar a qualidade do ajuste da distribuição. Esses testes permitem verificar se a distribuição de probabilidade dos dados de uma variável em análise pode ser estudada por uma função densidade de probabilidade (CARGNELUTTI FILHO; MATZENAUER; TRINDADE, 2004).

Cada teste possui características estatísticas particulares, com critérios de decisão igualmente distintos. Entretanto, as hipóteses testadas são as mesmas, em que, a hipótese nula ( $H_0$ ) é que a variável aleatória adere à distribuição e a hipótese alternativa ( $H_a$ ) contraria a nula (TORMAN; COSTER; RIBOLDI, 2012). Assim, apesar dos diferentes métodos para testar as funções densidade de probabilidade, teoricamente deveriam apresentar resultados semelhantes entre si (BARRA, 2003).

Dentre os testes de aderência à distribuição, pode-se citar o qui-quadrado, Anderson-Darling, Shapiro-Wilk e Kolmogorov-Smirnov, sendo o último mais empregado no setor florestal (AZEVEDO et al., 2016; BINOTI; BINOTI; LEITE, 2015a; BINOTI et al., 2011; BINOTI et al., 2012; SOUZA et al., 2016).

O teste de aderência não-paramétrico Komolgorov-Smirnov tem grande sensibilidade a qualquer diferença no valor central da dispersão, tendo por base o módulo da maior diferença entre frequência acumulada estimada e observada. Essa

diferença corresponde a um valor  $D$  que é comparado a um valor tabelado, fundamentado no tamanho amostral e no nível de significância (BINOTI et al., 2012; FIGURA, 2010; NETTO, 2008). Ou seja, para a realização do teste é computado o maior valor comparando as frequências das distribuições estimadas e esperadas, acumuladas em cada classe (NETTO, 2008).

Na área florestal, o método de Kolmogorov-Smirnov tem uso recomendado para ajustes de distribuições diamétricas e para modelagem de crescimento e produção dos povoamentos florestais (BARRA, 2003).

## REFERÊNCIAS

- ABREU, E. C. R. et al. Modelagem para prognose precoce do volume por classe diamétrica para *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 61, p. 86-102, 2002.
- ACERBI JÚNIOR, F. W. et al. Modelo para prognose do crescimento e da produção e análise econômica de regimes de manejo para *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 26, n. 6, p. 699-713, 2002.
- ALVES, L. W. R., CARVALHO, E. J. M.; SILVA, L. G. T. **Diagnóstico agrícola do município de Paragominas, PA**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2014. 28 p. (Embrapa Amazônia Oriental. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 91)
- ARAÚJO JÚNIOR, C. A. et al. Modelagem da distribuição diamétrica de povoamentos de eucalipto utilizando a função gama. **Cerne**, Lavras, v. 19, n. 2, p. 307-314, 2013.
- ARAÚJO JÚNIOR, C. A. et al. Projeção da distribuição diamétrica de povoamentos de Eucalipto em diferentes amplitudes de classe. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 45, n. 11, p. 1275-1281, 2010.
- ARAÚJO JÚNIOR, C. A. et al. Uso da função Weibull para descrever a área basal por classe de diâmetro de um povoamento de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 95, p. 401-406, 2012.
- AZEVEDO, G. B. et al. Modelagem da produção em nível de povoamento e por distribuição diamétrica em plantios de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 44, n. 110, p. 383-392, 2016.
- BAILEY, T. R. L.; DELL, R. Quantifying diameter distributions with the Weibull function. **Forest Science**, Bethesda, v. 19, n. 2, p. 97-104, 1973.
- BARRA, O. S. V. **Sistema de simulação de crescimento e produção de *Populus* spp., no Chile (sistema sálca)**. 2003. 113 p. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal)–Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2003.
- BETTINGER, P. **Forest management and planning**. Academic Press, Amsterdam, 2009. 331 p.
- BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M. S.; LEITE, H. G. Análise da função log-logística para modelagem da distribuição de diâmetros. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 39, n. 5, p. 943 – 951, 2015b.
- BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M. S.; LEITE, H. G. Modelagem da distribuição diamétrica de povoamentos equiâneos de eucalipto utilizando a função logística generalizada. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 39, n. 4, p. 707-711, 2015a.
- BINOTI, D. H. B. et al. Modelos de distribuição diamétrica para povoamentos desbastados de eucalipto utilizando a função hiperbólica. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 35, n. 5, p. 1069-1076, 2011.

- BINOTI, D. H. B. et al. Probability density functions for description of diameter distribution in thinned stands of *Tectona grandis*. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 2, p. 185-196, 2012.
- BINOTI, D. H. B., BINOTI, M. L. M. S.; LEITE, H. G. Projeção de distribuição diamétrica de povoamentos equiâneos utilizando a função Nakagami e Weibull. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 5, n. 2, p. 103-110, 2014.
- BURKHART, H. E.; TOMÉ, M. **Modeling forest trees and stands**. New York: Springer, 2012. 457 p.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 5. ed., Viçosa, MG: UFV, 2017. 636 p.
- CAO, Q. V. Predicting parameters of a Weibull function for modeling diameter distribution. **Forest Science**, Oxford, v. 50, n. 4, p.682-685, 2004.
- CARGNELUTTI FILHO, A.; MATZENAUER, R.; TRINDADE, J. K. Ajuste de funções de distribuição de probabilidade à radiação solar global no estado do Rio Grande do Sul. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 39, n. 12, p. 1157-1166, 2004.
- CARVALHO, P. E. R. **Paricá (*Schizolobium amazonicum*)**. Colombo: Embrapa Florestas, 2007. 8p. (Embrapa Florestas. Circular Técnica, 142).
- CASTRO, R. V. O. et al. Crescimento e produção de plantios comerciais de eucalipto estimados por duas categorias de modelos. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 48, n. 3, p. 287-295, 2013.
- CASTRO, R. V. O. et al. Modelagem do crescimento e da produção de povoamentos de *Eucalyptus* em nível de distribuição diamétrica utilizando índice de local. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v.40, n.1, p.107-116, 2016.
- CLUTTER, J. L. et al. **Timber management: a quantitative approach**. New York: John Wiley and Sons, 1983. 333 p.
- CORDEIRO, I. M. C. C. et al. Avaliação de plantios de paricá (*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke)) Barneby de diferentes idades e sistemas de cultivo no município de Aurora do Pará – PA (Brasil). **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 3, p. 679-687, 2015.
- DAVIS, L. S. et al. **Forest management: to sustain ecological, economic and social values**. 4. ed., Boston: McGraw-Hill Book Company, 2001. 804 p.
- DIAS, A. N. et al. Emprego de um modelo de crescimento e produção em povoamentos desbastados de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, n. 5, p. 731-739, 2005.
- FERRAZ FILHO, A. C. et al. Modeling growth and yield of loblolly pine stands under intensive management. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 8, p. 707-717, 2015.
- FERRAZ FILHO, A. C. **Sistema de prognose do crescimento e produção para *Pinus taeda* L. sujeito a regimes de desbastes e podas**. 2009. 147 p. Dissertação



(Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 2009.

FIGURA, M. A. **A distribuição diamétrica de Weibull na descrição da estrutura diamétrica de *Eucalyptus grandis*: um enfoque sobre o método dos momentos.** 2010. 97 p. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2010.

FRAGA FILHO, C. V. **Modelagem para prognose do crescimento e produção de eucalipto em diferentes níveis de abordagem.** 2016. 280 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2016.

GUIMARÃES, D. P. **Desenvolvimento de um modelo de distribuição diamétrica de passo invariante para prognose e projeção da estrutura de povoamentos de eucalipto.** 1994. 178f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1994.

GUIMARÃES, D. P. **Uma função hiperbólica de distribuição probabilística de alta flexibilidade.** Planaltina: Embrapa Cerrados, 2002. 40 p. (Embrapa Cerrados. Documentos, 79).

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). **Relatório IBÁ 2017.** Brasília, 2017. 96 p. Disponível em: <[http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA\\_RelatorioAnual2017.pdf](http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf)>. Acesso em: 31 jan. 2018.

LANA, M. D. et al. Distribuição diamétrica de *Eschweilera ovata* em um fragmento de floresta ombrófila densa – Igarassu, PE. **Floresta**, Curitiba, v. 43, n. 1, p. 59-68, 2013.

LAAR, A. V.; AKÇA, A. **Forest mensuration.** New York: Springer, 2007. 383 p.

LEITE, H. G. et al. Avaliação do ajuste das funções Weibull e hiperbólica a dados de povoamentos de eucalipto submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 34, n. 2, p.305-311, 2010.

LEITE, H. G. et al. Comparação entre predição e projeção da distribuição de diâmetros de eucalipto submetidos a desbastes. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 37, n. 2, p. 321-328, 2013.

LEITE, H. G. et al. Um modelo de distribuição diamétrica para povoamentos de *Tectona grandis* submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v.30, n.1, p.89-98, 2006.

LOPES, P. F. **Modelo de distribuição de diâmetros para clones de eucalipto em sistema agroflorestal.** 2007. 32 f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2007.

MENDOZA, N. V. R. **A distribuição log-logística exponenciada geométrica: dupla ativação.** 2012. 100 f. Dissertação (Mestrado em Ciência) – Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2012.

MEHTÄTALO, L., MALTAMO, M.; KANGAS, A. The use of quantile trees in the prediction of the diameter distribution of a stand. **Silva Fennica**, Vantaa, v.40, n.3, p.501-516, 2006.

MONTEIRO, D. C. A. et al. Dinâmica espectro-temporal modis em plantios de paricá (*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex. Ducke) Barneby) associada a diferentes condições hídricas do solo na Amazônia brasileira. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 18, 2013, Belém. **Anais...** Belém: UFP, 2013, p. 1- 5.

NADARAJAH, S.; KOTZ, S. A Generalized logistic distribution. **International Journal of Mathematics and Mathematical Sciences**, Londres, v.19, p.3169-3174, 2005.

NAGHETTINI, M.; PINTO, E. J. A. **Hidrologia estatística**. Belo Horizonte: CRPM, 2007. 552 p.

NEGREIROS, J. M. M. et al. Superação de dormência de sementes de *Schizolobium amazonicum* Ducke. **Enciclopédia Biosfera**, Goiânia, v. 11, n. 22, p. 254-263, 2015.

NETTO, C. C. **Dinâmica da distribuição diamétrica de povoamentos de *Pinus taeda* L. em diferentes idades e espaçamentos**. 2008. 105 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2008.

NOGUEIRA, G. S. et al. Modelo de distribuição diamétrica para povoamentos de *Eucalyptus* sp. submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, n. 4, p. 579-589, 2005.

NORD-LARSEN, T.; CAO, Q. V. A diameter distribution model for even-aged beech in Denmark. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.2, n.31, p.218-225, 2006.

OHASHI, S. T.; YARED, J. A. G.; FARIAS NETO, J. T. Variabilidade entre procedências de paricá: *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber x Ducke) Barneby plantadas no município de Colares – PA. **Acta Amazonica**, Manaus, v. 40, n. 1, p. 81-88, 2010.

ORELLANA, E. et al. Modelagem da distribuição diamétrica de espécies florestais em um fragmento de Floresta Ombrófila Mista. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v.38, n.2, p.297-308, 2014.

RETSLAFF, F. A. S. et al. Prognose do crescimento e da produção em classes de diâmetro para povoamentos desbastados de *Eucalyptus grandis* no sul do Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v.36, n.4, p.719-732, 2012.

SANTOS, E. M. **Crescimento e produção de plantios de paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke) sob diferentes espaçamentos**. 2012. 74 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2012.

SCHNEIDER, P. R. et al. Estimativa dos parâmetros da função de densidade probabilística de Weibull por regressão aninhada em povoamentos desbastados de *Pinus taeda* L. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 18, n. 3, p. 375-385, 2008.

SCOLFORO, J. R. S.; THIERSCHI, A. Estimativas e testes da distribuição de frequência diamétrica para *Eucalyptus camaldulensis*, através da distribuição  $S_B$ , por diferentes métodos de ajuste. **Scientia Florestalis**, Piracicaba, v. 54, p. 93-106, 1998.

SILVA, B. B. et al. Potencial eólico na direção predominante do vento no nordeste brasileiro. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, Campina Grande, v. 6, n. 3, p. 431-439, 2002.

SILVA, G. F. Rendimento em laminação de madeira de paricá na região de Paragominas, Pará. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 2, p. 447-455, 2015.

SILVA, V. S. M. et al. Prognose da produção de *Eucalyptus camaldulensis* Dehnh. pela aplicação da função de distribuição  $S_B$  de Johnson. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 33, n. 5, p. 853-863, 2009.

SOARES, T. S. et al. Avaliação de um modelo de passo invariante na predição da estrutura de um povoamento de *Eucalyptus* sp. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 31, n. 2, p. 275-283, 2007.

SOARES, T. S. et al. Projeção da distribuição diamétrica e produção de povoamentos de eucalipto empregando diferentes formas da função Weibull. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 35, n. 5, p. 1027-1032, 2010.

SOUZA, C. R. et al. **Paricá: *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber x Ducke) Barneby**. Colombo: Embrapa Florestas, 2003. 12 p. (Embrapa Florestas. Circular Técnica, 18).

SOUZA, L. A. et al. Funções densidade de probabilidade para descrição da distribuição de diâmetros em povoamentos florestais desbastados. **Revista Brasileira de Biometria**, Lavras, v. 34, n. 3, p. 421-434, 2016.

TEREZO, R. F. **Avaliação tecnológica do paricá e seu uso em estruturas de madeira laminada colada**. 2010. 177 p. Tese (Doutorado em Engenharia Civil) – Universidade Federal de Santa Catarina, Florianópolis, 2010.

TORMAN, V. B. L.; COSTER, R.; RIBOLDI, J. Normalidade de variáveis: métodos de verificação e comparação de alguns testes não-paramétricos por simulação. **Revista HCPA**, Porto Alegre, v. 32, n. 2, p. 227-234, 2012.

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

VIANA, J.J. **Modelagem do crescimento e da produção em classes de diâmetro para plantios de *Pinus taeda* L. não desbastados**. 2016. 107 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Estadual do Centro-Oeste, Irati, 2016.

VIDAURRE, G.B. **Caracterização anatômica, química e físico-mecânica da madeira de paricá (*Shizolobium amazonicum*) para produção de energia e polpa celulósica**. 2010. 74 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2010.

WENDLING, W. T. **Sistema computacional e modelagem para simulação dinâmica da produção florestal**. 2007. 191 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2007.

WENDLING, W. T.; EMERENCIANO, D. B.; HOSOKAWA, R. T. Ajuste da função de distribuição diamétrica Weibull por planilha eletrônica. **Floresta**, Curitiba, v. 41, n. 2, p. 205-220, 2011.

## CAPÍTULO I - FUNÇÕES DENSIDADE DE PROBABILIDADE PARA A DESCRIÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE DIÂMETROS EM POVOAMENTOS DE *Schizolobium parahyba* VAR. *amazonicum*

### RESUMO

O paricá (*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*) apresenta grande potencial para produção de lâminas de madeira que abastecem a indústria de painéis compensados. O rendimento na produção de lâminas de madeira está diretamente ligado ao diâmetro e a forma das árvores. Isso faz com que o conhecimento à respeito do crescimento e da produção por classe de diâmetro de uma floresta seja essencial para a estimação dos multiprodutos originados por ela. Dessa forma, este estudo teve como objetivo avaliar diferentes funções densidade de probabilidade para estimar a distribuição diamétrica em povoamentos de paricá não desbastados, sob diferentes espaçamentos. Os dados utilizados neste trabalho são originários de povoamentos homogêneos de paricá, plantados sob os espaçamentos 3x2, 3x3, 3x4, 4x4 e 5x5 m, localizados entre os municípios de Dom Elizeu e Paragominas, Estado do Pará. Foram ajustadas, pelo método da máxima verossimilhança, as distribuições Weibull 2 e 3 parâmetros, Weibull 2 parâmetros com parâmetro de locação fixo no *DAP* mínimo, Weibull 3 parâmetros truncada à direita, hiperbólica 2 e 3 parâmetros, log-logística 2 e 3 parâmetros e logística-generalizada para a descrição da distribuição de diâmetros de paricá. As funções foram avaliadas de acordo o teste de aderência Kolmogorov-Sminov, a 5% de significância, análise gráfica das frequências observada e estimadas e pelo teste de correlação linear simples entre os parâmetros das funções e características dos povoamentos. Todas as funções avaliadas neste estudo demonstraram desempenho satisfatório para descrição de povoamentos de paricá. As funções, Weibull 2 parâmetros, Weibull 2 parâmetros com  $\alpha$  fixo no *DAP* mínimo, hiperbólica 2 parâmetros, log-logística 2 parâmetros e logística-generalizada apresentaram alta correlação linear entre os respectivos parâmetros e características dos povoamentos, para os cinco espaçamentos.

**Palavras chave:** Espaçamento, Função Densidade de Probabilidade, Paricá

CHAPTER I - PROBABILITY DENSITY FUNCTIONS FOR DESCRIPTION OF DIAMETERS DISTRIBUTION IN STANDS OF *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*

ABSTRACT

Paricá (*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*) presents great potential for the production of wood blade that supply the plywood industry. The income in production of the wood blade is directly linked to the diameter and shape of the trees. This makes the knowledge about the growth and yield by diameter class of a forest essential for the estimation of the multiproducts originated by it. Thus, this study had the objective of evaluating different probability density functions to estimate the diameters distribution in unthinned stands of the paricá, under different spacings. The data used in this work originate from stands homogeneous of the paricá, planted under the spacings 3x2, 3x3, 3x4, 4x4 and 5x5 m, located between the municipalities of Dom Elizeu and Paragominas, state of Pará. Were evaluated the functions Weibull 2 and 3 parameters, Weibull 2 parameters with fixed location parameter in the minimum DBH, Weibull 3 parameters truncated to the right, hyperbolic 2 and 3 parameters, log-logistic 2 and 3 parameters and logistic-generalized for the description of the diameters distribution. The functions were evaluated according to the Kolmogorov-Sminov adhesion test, at 5% of significance, graphical analysis of the observed and estimated frequencies and by the linear correlation test between the parameters of the functions and characteristics of the stands. All the functions evaluated in this study demonstrated satisfactory performance for the description of the diameters distribution of the paricá stands. The functions Weibull 2 parameters, Weibull 2 parameters with  $\alpha$  fixed in the minimum DBH, hyperbolic 2 parameters, log-logistic 2 parameters and logistic-generalized presented high linear correlation between the respective parameters and characteristics of the stands for the five spacings.

**Keywords:** Spacing, Probability Density Function, Paricá

## 1 INTRODUÇÃO

O planejamento e a gestão florestal demandam por informações que descrevam o estado atual da floresta, bem como o comportamento desta em idades futuras. Os métodos utilizados para estimar e projetar as características estruturais de um povoamento, constituem em um desafio para os manejadores florestais (BETTINGER et al., 2009). Dentre estes métodos, destaca-se o uso de modelos de crescimento e produção.

A modelagem do crescimento e produção de uma floresta consiste em uma importante ferramenta para o manejo e a pesquisa florestal, podendo ser classificada de acordo com o nível de detalhamento desejado, como do tipo povoamento total, de árvores individuais e de distribuição de diâmetros (DAVIS et al., 2000). Dentre estes, pode-se destacar o modelo de distribuição de diâmetros, por fornecer um maior detalhamento da estrutura do povoamento sem acarretar em custos adicionais de inventário (NORD-LARSEN; CAO, 2006).

Os modelos de distribuição de diâmetros (*MDD*) estimam o número de árvores por classe de diâmetro nas idades presente e futura e proporcionam a quantificação do crescimento e da produção de uma floresta (CAMPOS; LEITE, 2017). Essa modelagem permite a análise de multiprodutos de madeira, simulação de desbastes e avaliação econômica da produção (BINOTI; BINOTI; LEITE, 2015a). Dentre as formas de estimar a distribuição em classes de diâmetros, é comum a utilização das funções densidade de probabilidade (*fdp*) para descrever a estrutura horizontal do povoamento (KERSHAW JUNIOR; DUCEY; BEERS; HUSCH, 2016).

Dentre as *fdp*'s, a função Weibull é a mais difundida no setor florestal para estimar a distribuição de diâmetros em florestas equiâneas (BINOTI; BINOTI; LEITE, 2015a; CAMPOS; LEITE, 2017). No entanto, estudos vêm propondo o emprego de outras *fdp*'s para a descrição da distribuição de diâmetros destes povoamentos (BINOTI; BINOTI; LEITE, 2015a; BINOTI et al., 2012; GUIMARÃES, 2002; LEITE et al., 2010; STEPKA; LISBOA; KURCHAIDT, 2011). Além da função Weibull, destacam-se as funções hiperbólica, log-logística, logística-generalizada, lognormal, beta, gama e  $S_B$  Jonhson (BAILEY; DELL, 1973; BINOTI; BINOTI; LEITE, 2015a; GUIMARÃES, 2002; LEITE, et al. 2010; SOUZA et al., 2016).

Os estudos sobre a modelagem da distribuição de diâmetros para descrever crescimento e a produção em povoamentos florestais, em sua maioria, estão relacionados às espécies do gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*. Isso evidencia a

necessidade de pesquisas que tragam respostas sobre a estrutura diamétrica de espécies não convencionais, como para plantios de nativas que apresentam potencial produtivo, que é o caso do paricá.

O paricá, espécie nativa da região Amazônica, apresenta características que motivam o seu plantio em escala comercial, com rápido crescimento, fuste retilíneo e desrama natural (VIDAURRE, 2010). Apresenta potencial para produção de lâminas de madeira, devido à pouca incidência de defeitos e nós (MONTEIRO et al., 2013). As lâminas são utilizadas como matéria-prima para a indústria de compensado, em que os painéis são utilizados na construção civil na fabricação de móveis e pisos (SILVA et al, 2015).

Para o paricá, Santos (2012) ajustou um modelo de distribuição de diâmetros a partir da função Weibull 2 parâmetros. No entanto, estes autores não analisaram a eficiência de outras funções para descrever a distribuição de diâmetros da espécie. Diante do exposto, este capítulo teve como objetivo avaliar diferentes funções densidade de probabilidade para estimar a distribuição de diâmetros em povoamentos de paricá sob diferentes espaçamentos.

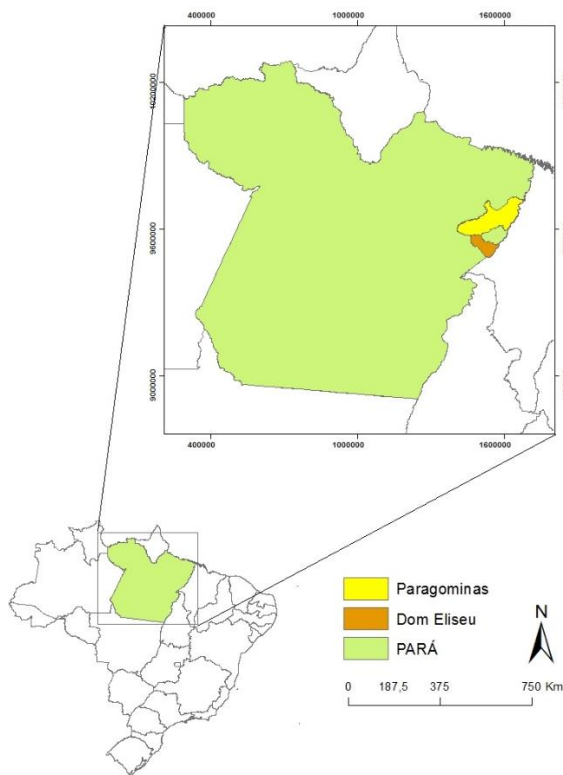


## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Descrição dos dados

Os dados utilizados neste estudo foram provenientes de povoadamentos puros de paricá (*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*) não desbastados situados entre os municípios de Dom Eliseu e Paragominas, no estado do Pará (Figura 1).

Figura 1 – Localização dos municípios de Paragominas e Dom Eliseu, PA.



O município de Dom Eliseu possui 5.268,81 km<sup>2</sup> em extensão territorial e está localizado entre as coordenadas 04° 17' 36" de latitude Sul e 47° 33' 15" de longitude a Oeste. O clima é do tipo mesotérmico úmido. A temperatura média anual está em torno de 25 °C, apresentando mínima média diária de 20°C. O regime pluviométrico anual está entre 2.250 mm e 2.500 mm, com período chuvoso de janeiro a maio. A umidade relativa do ar chega a 85%, em média. O solo de ocorrência predominante na região é o Latossolo Amarelo e a vegetação nativa predominante é a Floresta Ombrófila Densa (IBGE, 2017a; PIMENTEL et al., 2012).

O município de Paragominas possui área territorial de 19.342,25 km<sup>2</sup> e está situado a 2° 59' de latitude Sul e 47° 21' de longitude Oeste. O clima é classificado

como Aw, de acordo com Köppen, do tipo quente e úmido com temperatura média anual de 26,3°C. A pluviosidade média anual é de 1.743 mm, com período chuvoso entre os meses de dezembro e maio. A umidade relativa do ar é de 81%. O tipo de solo é predominantemente o Latossolo Amarelo com alto teor de argila e vegetação identificadas em três subtipos: Floresta Densa Submontana, Floresta Densa de Terras Baixas e Floresta Densa Aluvial (ALVES; CARVALHO; SILVA, 2014; IBGE, 2017b; PINTO et al., 2009).

Os povoamentos analisados foram implantados em espaçamentos 3x2, 3x3, 3x4, 4x4 e 5x5 metros, formados por 10 parcelas cada, com áreas de 504, 567, 756, 864 e 600 m<sup>2</sup>, respectivamente. As parcelas foram inventariadas nas idades 2, 3, 4 e 5 anos, considerando diâmetro mínimo de inclusão de 5 cm.

Os números de indivíduos por hectare (N), *DAP* médio (*D<sub>méd</sub>*), mínimo (*D<sub>mín</sub>*) e máximo (*D<sub>máx</sub>*), assim como o coeficiente de variação (CV%) do *DAP*, a área basal (G) dos povoamentos, assimetria e curtose, considerando cada espaçamento e idade estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Estatísticas descritivas das variáveis dos povoamentos de paricá implantados em diferentes espaçamentos

Espaçamento (m)	Idade (anos)	N médio	Dméd (cm)	Dmín (cm)	Dmáx (cm)	CV(%)	G (m <sup>2</sup> )	Assimetria	Curtose
3x2	2	1488	9,83	5,00	17,10	16,83	5,96	-0,3631	1,0577
	3	1482	12,91	5,05	19,85	19,70	10,17	-0,2721	-0,1016
	4	1444	13,72	6,20	22,45	20,90	11,23	-0,1163	-0,3571
	5	1276	14,11	6,75	24,65	20,00	10,47	0,0360	-0,3211
3x3	2	951	10,00	5,00	14,70	17,65	4,52	-0,4299	1,4510
	3	991	13,96	5,20	19,70	17,22	8,92	-0,5005	0,1654
	4	977	15,12	6,15	22,10	19,57	10,32	-0,4082	-0,0618
	5	940	15,50	6,35	25,50	18,44	10,44	-0,0899	0,0050
3x4	2	738	10,50	5,00	15,50	16,70	5,02	-0,5245	1,0702
	3	751	14,94	6,15	20,35	16,32	10,23	-0,6109	0,8145
	4	735	16,06	5,35	22,25	21,49	11,59	-0,3510	0,0025
	5	689	16,85	8,15	23,80	17,40	11,93	-0,1421	-0,1521
4x4	2	564	10,54	5,00	16,80	16,10	4,44	-0,8057	1,9080
	3	571	15,74	7,25	21,10	15,03	9,85	-0,5580	0,8103
	4	561	17,37	7,60	23,50	15,30	11,80	-0,5595	0,9078
	5	554	18,17	8,50	25,65	16,60	12,80	-0,3835	0,1401
5x5	2	348	10,75	5,25	17,75	18,30	2,01	-0,4796	1,2721
	3	355	17,05	7,35	23,50	14,84	5,04	-0,5705	1,8767
	4	355	19,26	8,50	25,55	12,49	6,38	-0,6373	1,6165
	5	353	20,59	8,70	28,45	16,15	7,26	-0,5702	0,8401

em que: N = número de indivíduos por hectare; Dméd = diâmetro médio; Dmín = diâmetro mínimo; Dmáx = diâmetro máximo; CV = coeficiente de variação do diâmetro a 1,3 m do solo; G = área basal.

## 2.2 Descrição e ajuste das funções densidade de probabilidade

As probabilidades de frequência de árvores foram estimadas em cada classe de diâmetro, para todas as combinações de espaçamentos, parcelas e idades. Assim, foram ajustadas e analisadas as funções densidade de probabilidade Weibull 2 e 3 parâmetros, Weibull 2 parâmetros com  $\alpha$  fixo no diâmetro mínimo, Weibull 3 parâmetros truncada à direita, hiperbólica 2 e 3 parâmetros, log-logística 2 e 3 parâmetros e logística-generalizada (Equações 1 a 9).

a) Weibull 2 parâmetros

$$f(X) = \frac{\gamma}{\beta} \left( \frac{X}{\beta} \right)^{\gamma-1} e^{-\left( \frac{X}{\beta} \right)^\gamma} \quad (1)$$

$$X \geq 0; \beta > 0; \gamma > 0$$

b) Weibull 3 parâmetros

$$f(X) = \frac{\gamma}{\beta} \left( \frac{X - \alpha}{\beta} \right)^{\gamma-1} e^{-\left( \frac{X - \alpha}{\beta} \right)^\gamma} \quad (2)$$

$$X \geq \alpha; \alpha \geq 0; \beta > 0; \gamma > 0$$

c) Weibull 2 parâmetros com  $\alpha$  fixo no diâmetro mínimo (Dmín)

$$f(X) = \frac{\gamma}{\beta} \left( \frac{X - Dmín}{\beta} \right)^{\gamma-1} e^{-\left( \frac{X - Dmín}{\beta} \right)^\gamma} \quad (3)$$

$$Dmín \geq 0; \beta > 0; \gamma > 0$$

d) Weibull 3 parâmetros truncada a direita pelo diâmetro máximo (Dmáx)

$$f(X) = \frac{\frac{\gamma}{\beta} \left( \frac{X - \alpha}{\beta} \right)^{\gamma-1} e^{-\left( \frac{X - \alpha}{\beta} \right)^\gamma}}{1 - e^{-\left[ \left( \frac{T - \alpha}{\beta} \right)^\gamma \right]}} \quad (4)$$

$$\alpha \leq X \leq T; T = Dmáx; \alpha \geq 0; \beta > 0; \gamma > 0$$

e) Hiperbólica 2 parâmetros

$$f(X) = \left\{ \frac{\gamma}{\beta} \left( \frac{X}{\beta} \right)^{(\gamma-1)} \left( 1 - \tanh \left( \left( \frac{X}{\beta} \right)^\gamma \right)^2 \right) \right\} \quad (5)$$

$$X \geq 0; \beta > 0; \gamma > 0$$

f) Hiperbólica 3 parâmetros

$$f(X) = \left\{ \frac{\gamma}{\beta} \left( \frac{X-\alpha}{\beta} \right)^{(\gamma-1)} \left( 1 - \tanh \left( \left( \frac{X-\alpha}{\beta} \right)^\gamma \right)^2 \right) \right\} \quad (6)$$

$$X \geq \alpha; \alpha \geq 0; \beta > 0; \gamma > 0$$

g) Log-logística 2 parâmetros

$$f(X) = \left\{ \frac{\gamma}{\beta} \left( \frac{X}{\beta} \right)^{(\gamma-1)} \left( 1 + \left( \left( \frac{X}{\beta} \right)^\gamma \right)^{-2} \right) \right\} \quad (7)$$

$$X \geq 0; \beta > 0; \gamma > 0$$

h) Log-logística 3 parâmetros

$$f(X) = \left\{ \frac{\alpha}{\beta} \left( \frac{X-\alpha}{\beta} \right)^{(\gamma-1)} \left( 1 + \left( \left( \frac{X-\alpha}{\beta} \right)^\alpha \right)^{-2} \right) \right\} \quad (8)$$

$$X \geq \alpha; \alpha \geq 0; \beta > 0; \gamma > 0$$

i) Logística-generalizada

$$f(X) = \left\{ \frac{\left( 1 + \gamma \left( \frac{X-\alpha}{\beta} \right)^{-\gamma-1} \right)}{\beta \left( 1 + \left( 1 + \gamma \left( \frac{X-\alpha}{\beta} \right)^{-\gamma-1} \right) \right)^2} \right\} \quad (9)$$

$$X \geq \alpha; \alpha \geq 0; \beta > 0; \gamma > 0$$

em que:  $\alpha$  é o parâmetro de locação;  $\beta$  é o parâmetro de escala;  $\gamma$  é o parâmetro de forma;  $X$  é o centro de classe de diâmetro e  $T$  é o ponto de truncamento à direita.

Os dados de *DAP* para cada espaçamento, parcela e idade foram agrupados em classes de diâmetro com amplitude de 1 cm. Os ajustes foram realizados com base no método da máxima verossimilhança, utilizando o software FitFD (BINOTI; LEITE; SILVA, 2017).

### 2.3 Avaliação do ajuste das funções densidade de probabilidade

A avaliação da qualidade do ajuste das funções densidade de probabilidade foi realizada por meio do teste de aderência de Komolgorov-Smirnov a 5% de significância. As hipóteses testadas foram:

$H_0$ : diâmetros estimados não diferem estatisticamente aos observados;

$H_a$ : diâmetros estimados diferem estatisticamente aos observados.

Neste teste, o valor em módulo da maior diferença entre as distribuições estimada e observada corresponde ao valor de  $D$  calculado de Komolgorov-Smirnov (Equação 10)

$$D = \text{MAX}|F(x) - S(x)| \quad (10)$$

em que:  $D$  é a maior diferença entre as distribuições acumuladas observada e estimada;  $F(x)$  é a frequência acumulada estimada e  $S(x)$  é a frequência acumulada observada.

Para análise das funções, foi levado em consideração a não rejeição de  $H_0$ , ou seja, a aderência da função aos dados observados, bem como, a análise gráfica entre valores observados e estimados. A análise gráfica foi realizada em todos os espaçamentos, parcelas e idades, a fim de representar a probabilidade de indivíduos observados e estimados distribuídos em cada classe de diâmetro. Essa análise permite verificar se houve discrepância entre as frequências observadas e estimadas pelas funções.

Em complemento à avaliação das funções, realizou-se uma análise de correlação linear simples, em cada espaçamento, entre os parâmetros das funções e características extraídas do povoamento como idade, número de indivíduos, *DAP* médio, mínimo e máximo, área basal, assimetria e curtose.

### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os índices de assimetria e curtose permitem inferir que os povoamentos estudados apresentam, em geral, comportamento assimétrico negativo ou à direita ( $\text{Assimetria} < 0$ ), considerado moderado ( $0,15 < |\text{Assimetria}| \leq 1$ ), e curtose ou grau de achatamento de Fisher, predominantemente leptocúrtica ( $\text{Curtose} > 0$ ) (FÁVERO et al., 2009). Esse comportamento, também pode ser observado por Sanquetta et al. (2014), ao analisar a distribuição de diâmetros em plantios de acácia-negra no estado do Rio Grande do Sul, Brasil.

Os valores estimados pelas funções estudadas propiciaram boa aderência aos dados, em que, aproximadamente 99,61% das parcelas obtiveram resultados não significativos pelo teste Kolmogorov-Smirnov ( $p > 0,05$ ). As funções Weibull 2 e 3 parâmetros, Weibull 2 parâmetros com parâmetro de locação fixo no *DAP* mínimo, Weibull 3 parâmetros truncada à direita, assim como, as funções hiperbólica 2 parâmetros e log-logística 2 parâmetros aderiram a 100% das parcelas estudadas. Contudo, as funções hiperbólica 3 parâmetros, log-logística 3 parâmetros e logística generalizada apresentaram aderência em 99, 98,5 e 99% das parcelas, respectivamente. Alguns autores consideram 86% de aderência como adequado para se proceder com a recuperação dos parâmetros (AZEVEDO et al., 2016). Os valores médios de *D* calculado estão apresentados na Tabela 2.

Tabela 2 – Valores médios de D calculado do teste Kolmogorov-Smirnov ao nível de 5% de significância para todas os espaçamentos nas referidas idades

Espaçamento (m)	Idade (anos)	W2P	W3P	W2PDmin	W3PT	H2P	H3P	LL2P	LL3P	LG
3x2	2	0,0494	0,0354	0,0486	0,0379	0,0550	0,0341	0,0675	0,0709	0,0358
	3	0,0454	0,0414	0,0535	0,0402	0,0477	0,0408	0,0879	0,0938	0,0468
	4	0,0503	0,0475	0,0581	0,0451	0,0594	0,0498	0,0922	0,1025	0,0644
	5	0,0547	0,0456	0,0607	0,0454	0,0644	0,0462	0,0811	0,0838	0,0582
	Média	0,0500	0,0425	0,0553	0,0422	0,0566	0,0427	0,0822	0,0877	0,0513
3x3	2	0,0727	0,0593	0,0815	0,0601	0,0737	0,0546	0,1050	0,1019	0,0492
	3	0,0672	0,0668	0,0934	0,0658	0,0657	0,0592	0,1066	0,1066	0,0549
	4	0,0604	0,0612	0,0942	0,0597	0,0603	0,0562	0,1061	0,1061	0,0519
	5	0,0666	0,0546	0,0841	0,0544	0,0726	0,0550	0,0900	0,0906	0,0569
	Média	0,0667	0,0605	0,0883	0,0600	0,0681	0,0562	0,1019	0,1013	0,0532
3x4	2	0,0670	0,0638	0,0748	0,0688	0,0706	0,0756	0,0973	0,0991	0,0631
	3	0,0613	0,0592	0,0794	0,0587	0,0644	0,0581	0,0952	0,0938	0,0518
	4	0,0721	0,0632	0,0914	0,0618	0,0747	0,0695	0,1055	0,1030	0,0637
	5	0,0623	0,0503	0,0775	0,0501	0,0700	0,0514	0,0841	0,0843	0,0560
	Média	0,0657	0,0591	0,0808	0,0599	0,0700	0,0636	0,0955	0,0950	0,0586
4x4	2	0,0706	0,0661	0,0823	0,0656	0,0714	0,0645	0,1076	0,1080	0,0624
	3	0,0678	0,0514	0,0770	0,0513	0,0708	0,0662	0,0850	0,1039	0,0762
	4	0,0708	0,0574	0,0873	0,0542	0,0739	0,0590	0,1051	0,1056	0,0762
	5	0,0629	0,0526	0,0830	0,0504	0,0673	0,0528	0,1001	0,1004	0,0652
	Média	0,0680	0,0569	0,0824	0,0554	0,0709	0,0607	0,0995	0,1045	0,0700
5x5	2	0,0986	0,0940	0,1138	0,0942	0,0965	0,0907	0,1155	0,1241	0,0864
	3	0,1044	0,0952	0,1014	0,0954	0,1073	0,0952	0,1044	0,1023	0,0845
	4	0,0896	0,0904	0,0998	0,0929	0,0913	0,0893	0,1047	0,1310	0,1088
	5	0,0682	0,0668	0,1026	0,0675	0,0705	0,0667	0,1095	0,1279	0,0848
	Média	0,0902	0,0866	0,1044	0,0875	0,0914	0,0855	0,1085	0,1213	0,0911

em que: W2P = Weibull 2 parâmetros; W3P = Weibull 3 parâmetros; W2PDmin = Weibull 2 parâmetros com  $\alpha$  fixo no *DAP* mínimo; W3PT = Weibull 3 parâmetros truncada à direita; H2P = Hiperbólica 2 parâmetros; H3P = Hiperbólica 3 parâmetros; LL2P = Log-logística 2 parâmetros, LL3P = Log-logística 3 parâmetros; LG = Logística generalizada.



Estatisticamente, as nove funções ajustadas obtiveram resultados satisfatórios em relação a aderência aos dados, indicando que todas são igualmente capazes de descrever a distribuição de diâmetros dos povoamentos. Binoti et al. (2012), ajustando funções densidade de probabilidade para povoamentos desbastados de *Tectona grandis*, obtiveram valores semelhantes ao presente estudo, em que todas as funções analisadas forneceram resultados satisfatórios para uso em modelos de crescimento e produção.

A função Weibull é, normalmente, a mais utilizada para descrever a distribuição dos diâmetros de povoamentos florestais, devido à alta flexibilidade, que permite moldar diferentes tendências de distribuição (CAMPOS; LEITE, 2017). As funções hiperbólica e logística-generalizada vêm ganhando espaço na modelagem de diâmetro, obtendo resultados satisfatórios, no que diz respeito a aderência aos dados (BINOTI; BINOTI; LEITE, 2015a; BINOTI et al., 2011; GUIMARÃES, 2002; LEITE et al., 2010; NOGUEIRA et al., 2005; SOUZA et al., 2010).

A função log-logística, com 2 e 3 parâmetros também teve resultado satisfatório em Binoti, Binoti e Leite (2015b), para povoamentos de espécies do gênero *Eucalyptus*. Estes autores afirmam que essas funções apresentam bom desempenho, se comparado com a função Weibull. Esses fatos corroboram com o encontrado no presente estudo, e contribuem para afirmar a eficiência dessas funções em descrever a estrutura de diâmetro em povoamentos florestais.

Para uma melhor visualização dos resultados, foram escolhidas uma parcela em cada espaçamento de forma aleatória, e apresentadas as análise gráfica das probabilidades observadas e estimadas no decorrer do tempo (Figuras 2 a 6). Nota-se que, as probabilidades de frequência estimadas por classe de diâmetro seguem uma distribuição semelhante para as nove funções ajustadas, evidenciando que todas são capazes de descrever a estrutura de diâmetro dos povoamentos de paricá.

A distribuição das árvores observadas por classes de diâmetros apresentaram uma tendência aproximadamente normal em todos os espaçamentos estudados, o que caracteriza um povoamento equiâneo (LAAR; AKÇA, 2007) e um deslocamento para à direita devido ao crescimento dos indivíduos.

Figura 2 – Distribuição das probabilidades observadas (barras) e estimadas (linha) pelas funções densidade e probabilidade para povoamentos de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*, no espaçamento 3x2 m em diferentes idades (Continua)

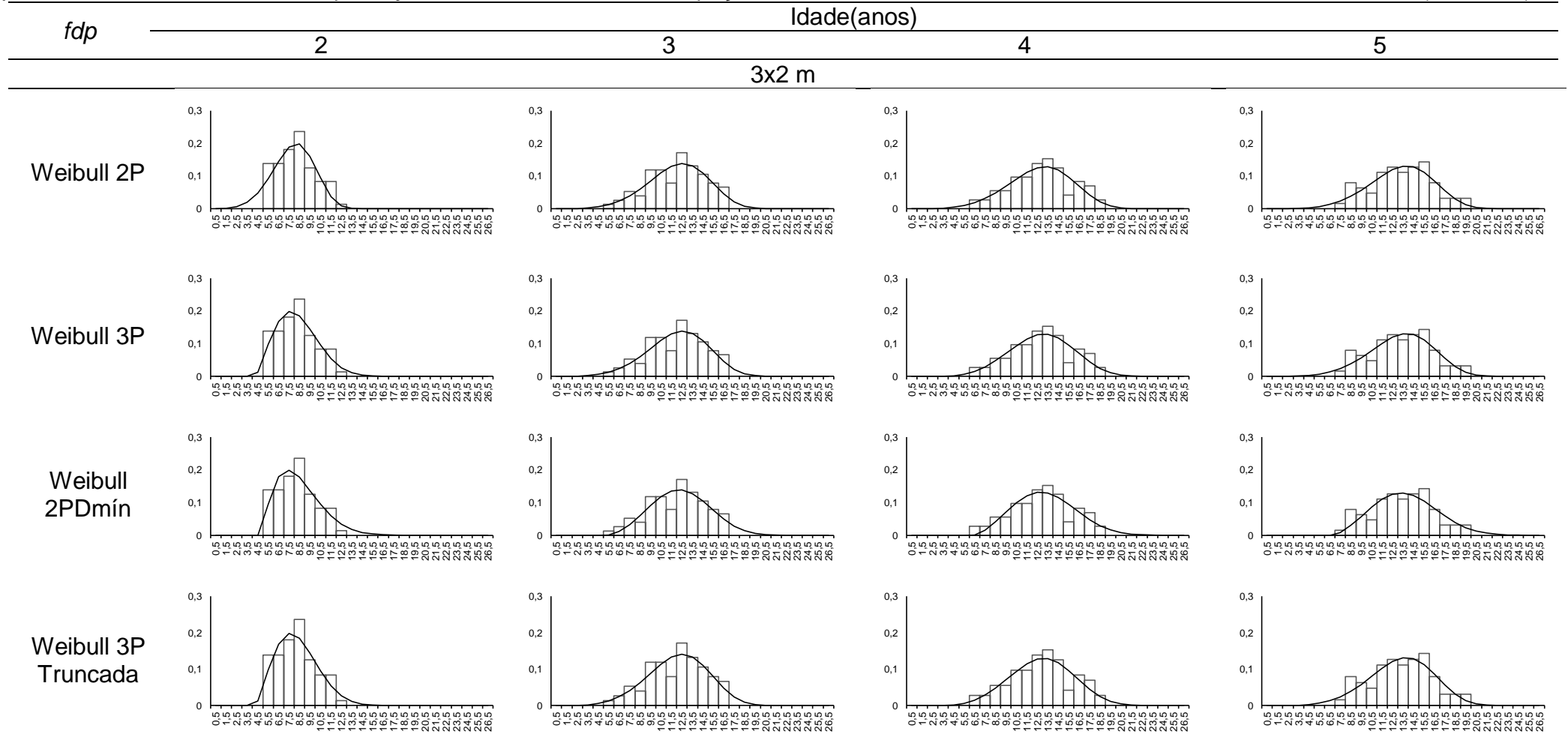


Figura 2 – Distribuição das probabilidades observadas (barras) e estimadas (linha) pelas funções densidade e probabilidade para povoamentos de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*, no espaçamento 3x2 m em diferentes idades (Conclusão)

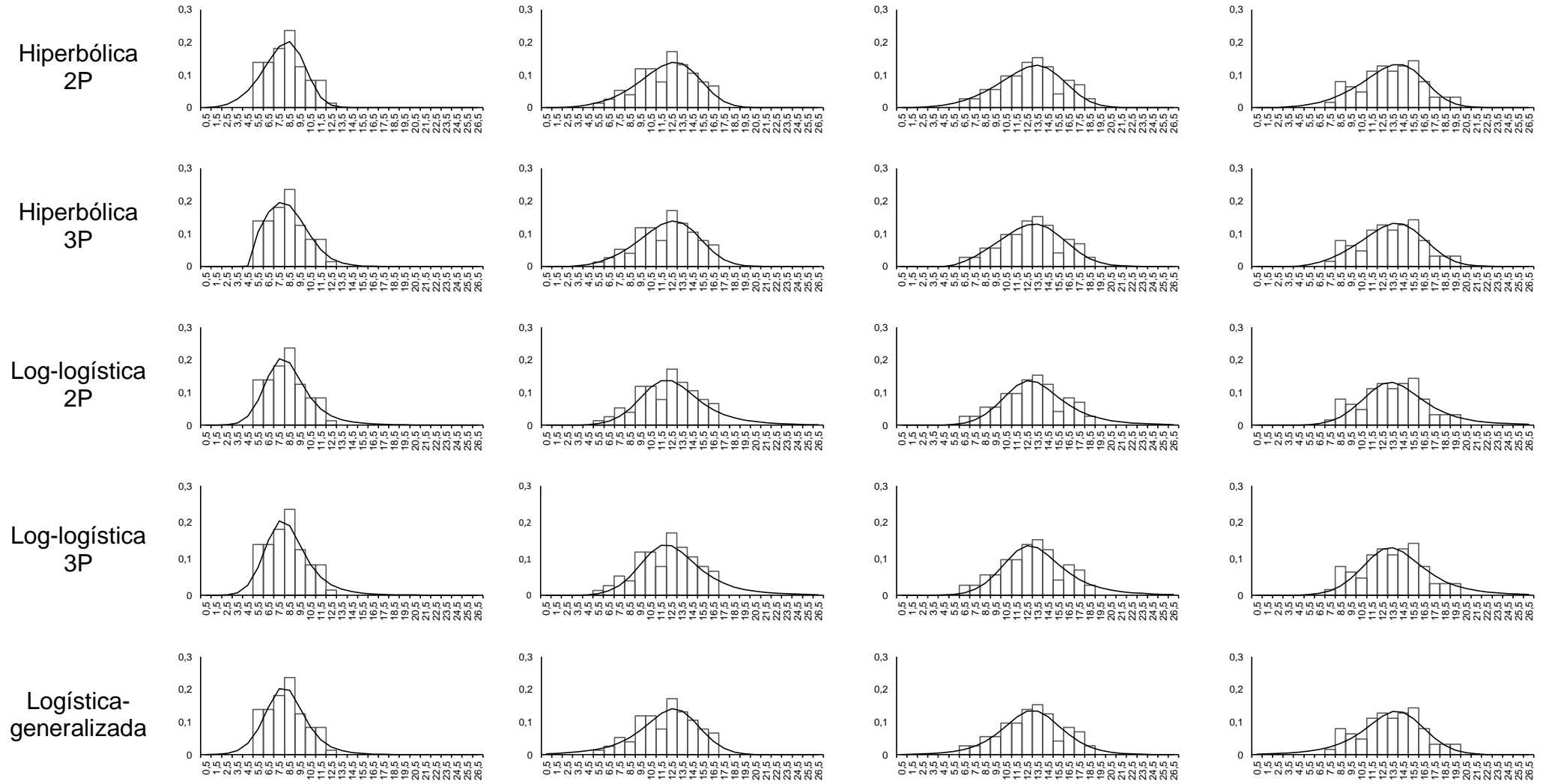


Figura 3 - Distribuição das probabilidades observadas (barras) e estimadas (linha) pelas funções densidade e probabilidade para povoamentos de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*, no espaçamento 3x3 m em diferentes idades (Continua)

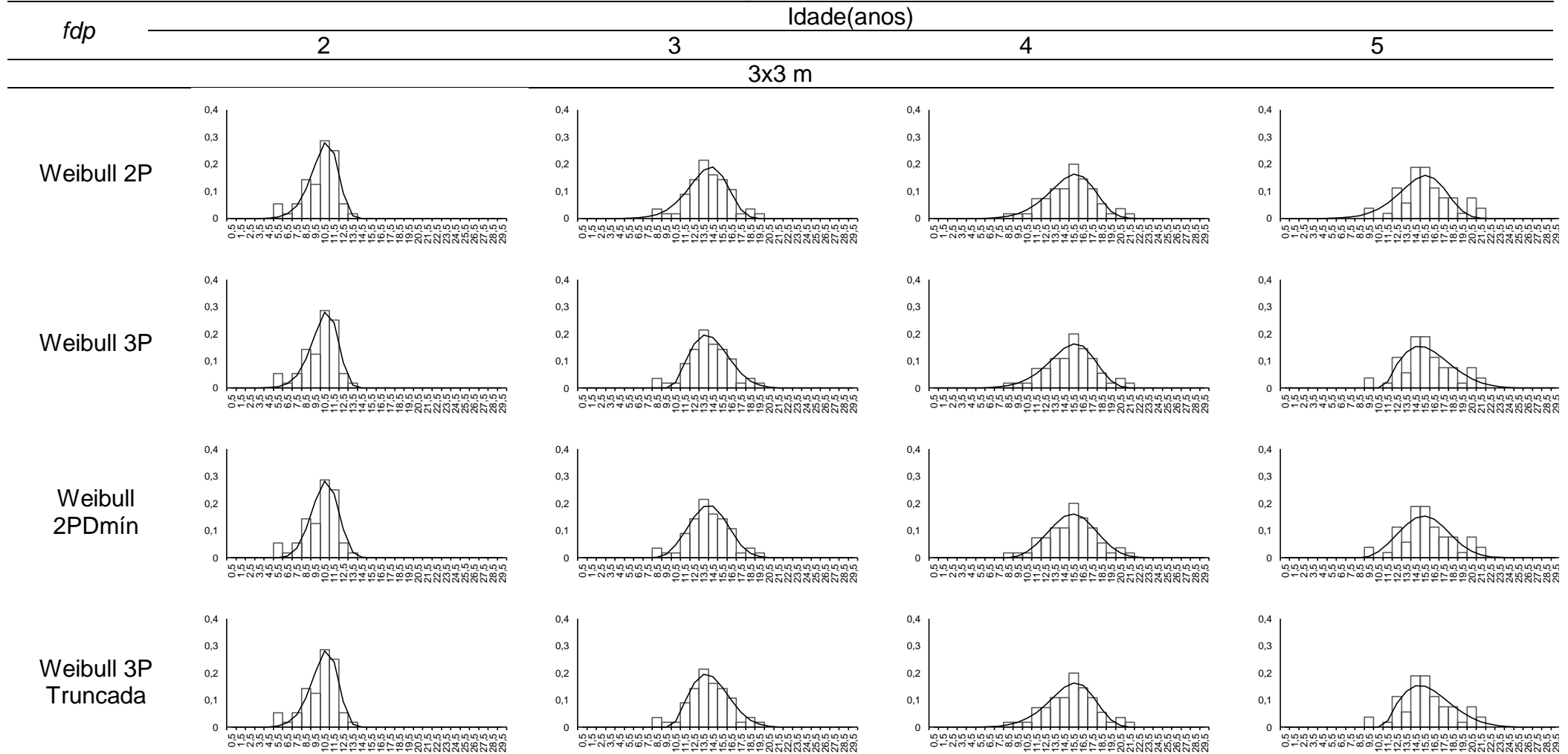


Figura 3 - Distribuição das probabilidades observadas (barras) e estimadas (linha) pelas funções densidade e probabilidade para povoamentos de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*, no espaçamento 3x3 m em diferentes idades (Conclusão)

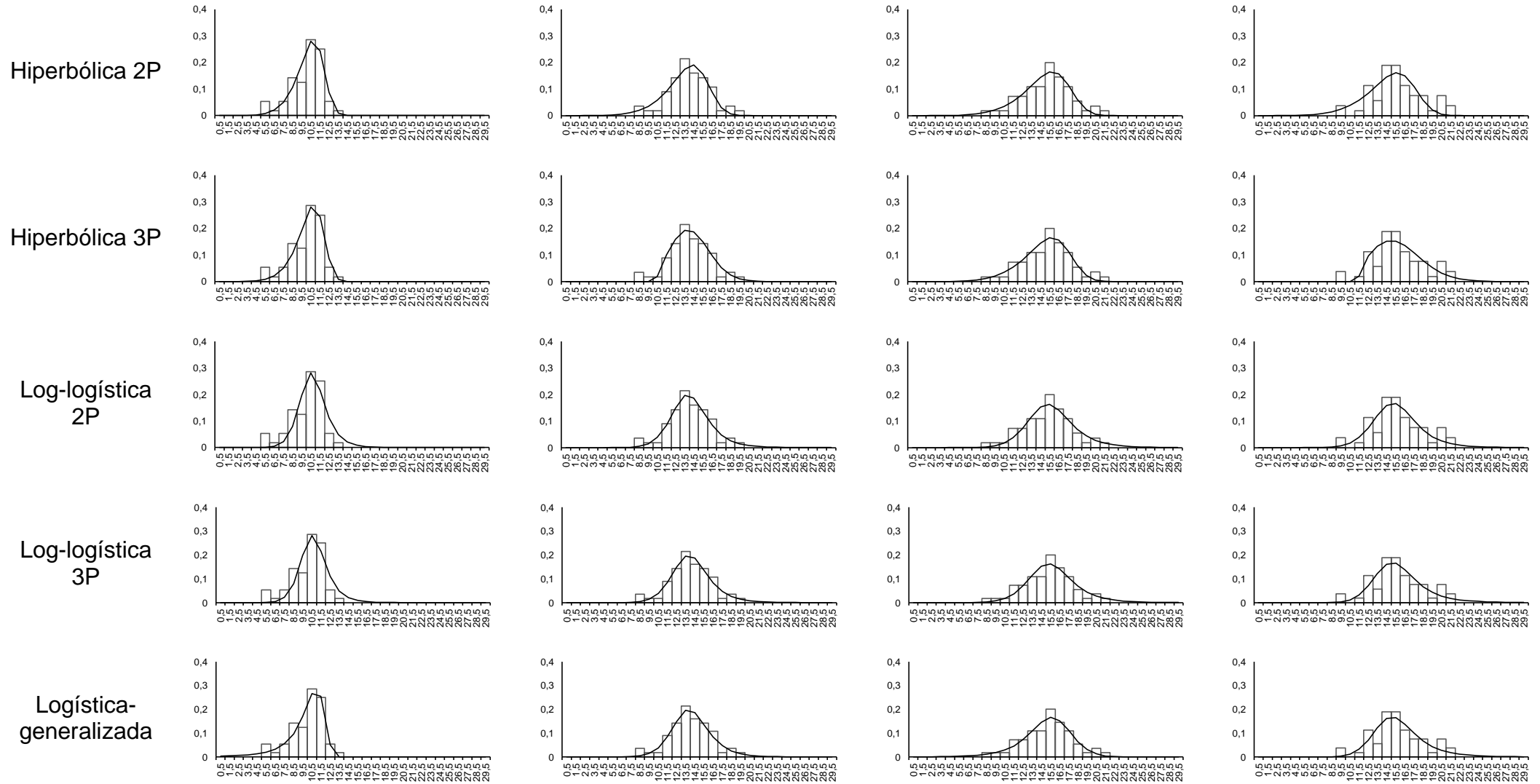


Figura 4 – Distribuição das probabilidades observadas (barras) e estimadas (linha) pelas funções densidade e probabilidade para povoamentos de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*, no espaçamento 3x4 m em diferentes idades (Continua)

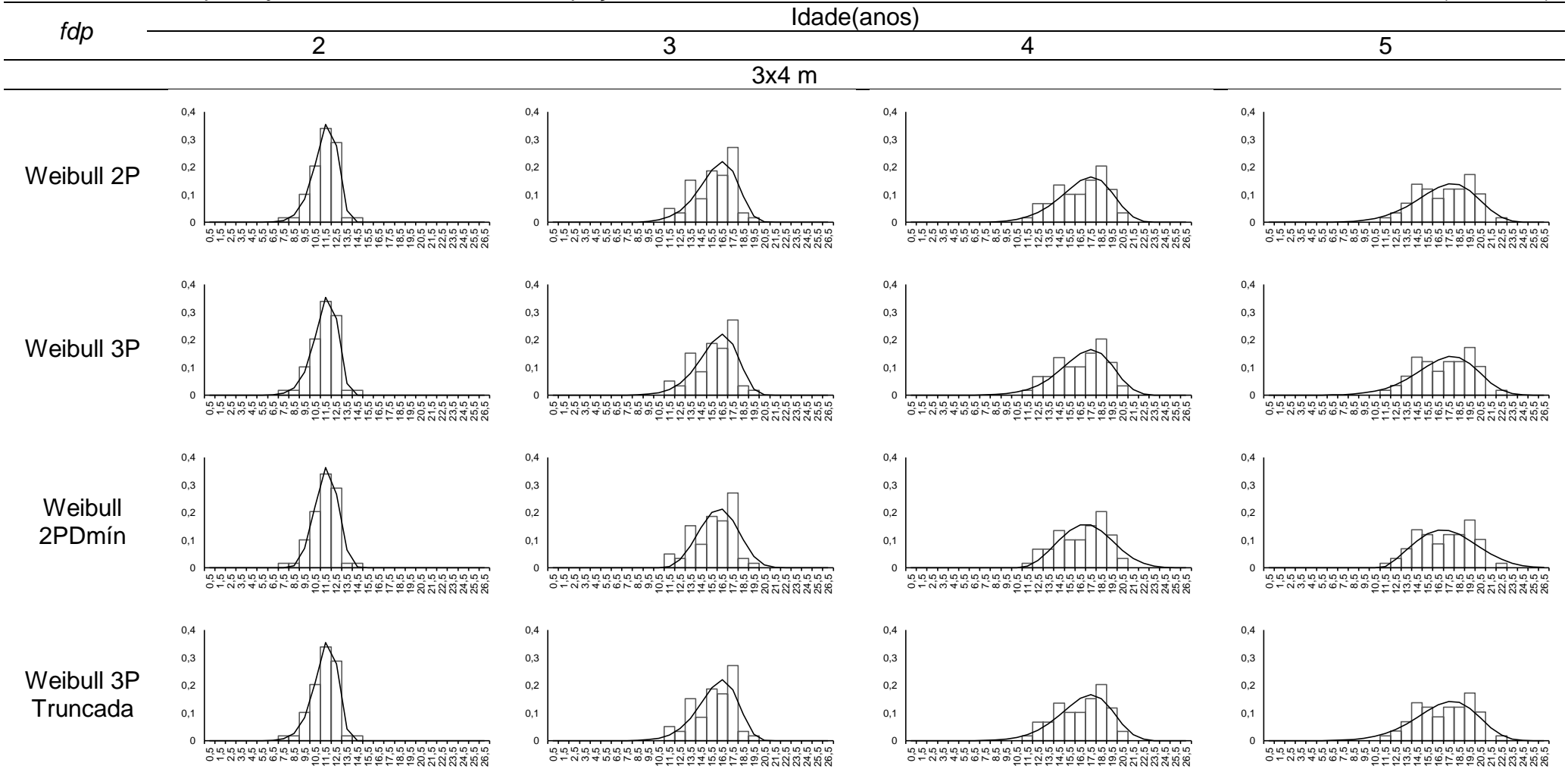


Figura 4 – Distribuição das probabilidades observadas (barras) e estimadas (linha) pelas funções densidade e probabilidade para povoamentos de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*, no espaçamento 3x4 m em diferentes idades (Conclusão)

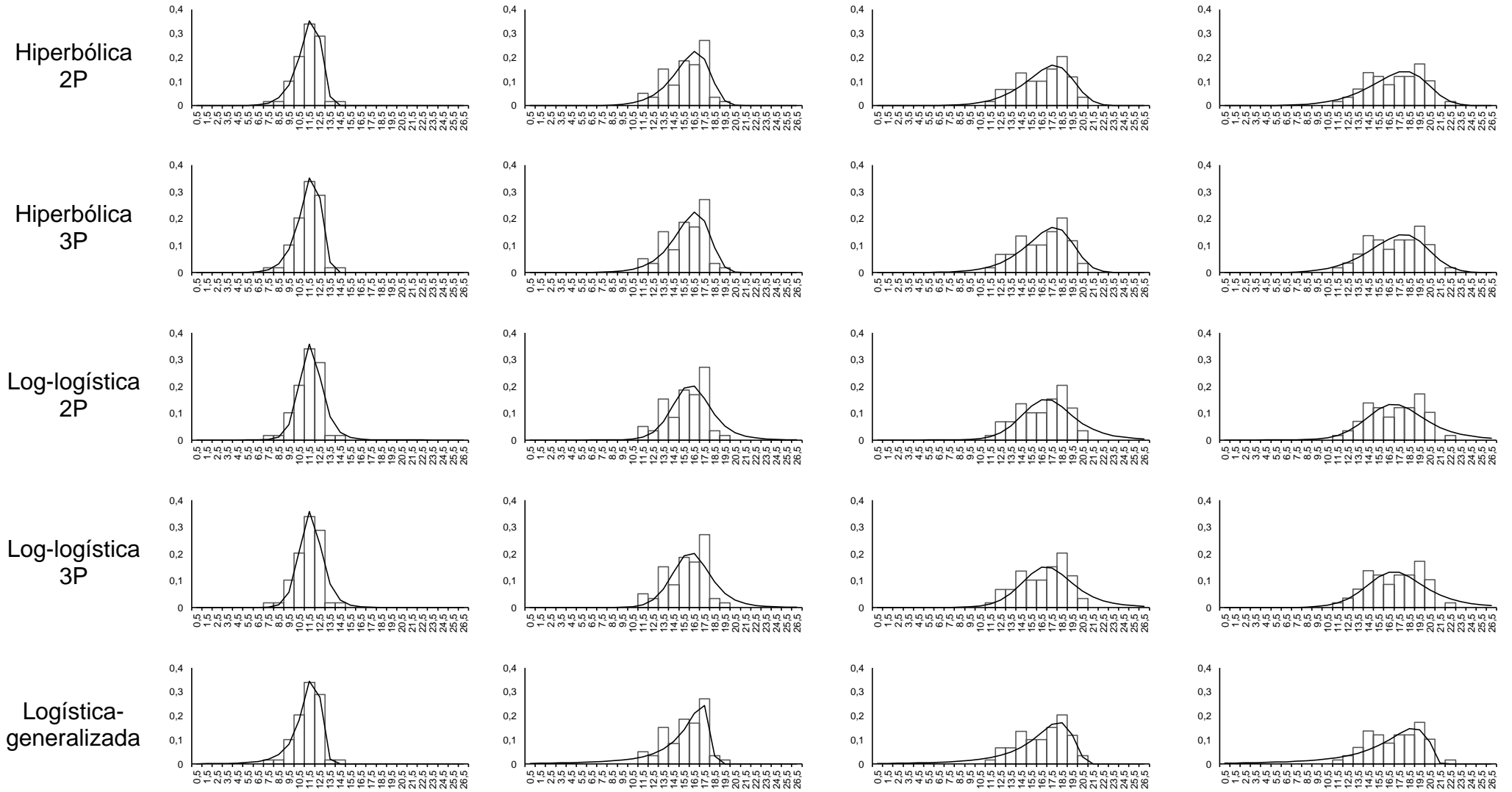


Figura 5 – Distribuição das probabilidades observadas (barras) e estimadas (linha) pelas funções densidade e probabilidade para povoamentos de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*, no espaçamento 4x4 m em diferentes idades (Continua)

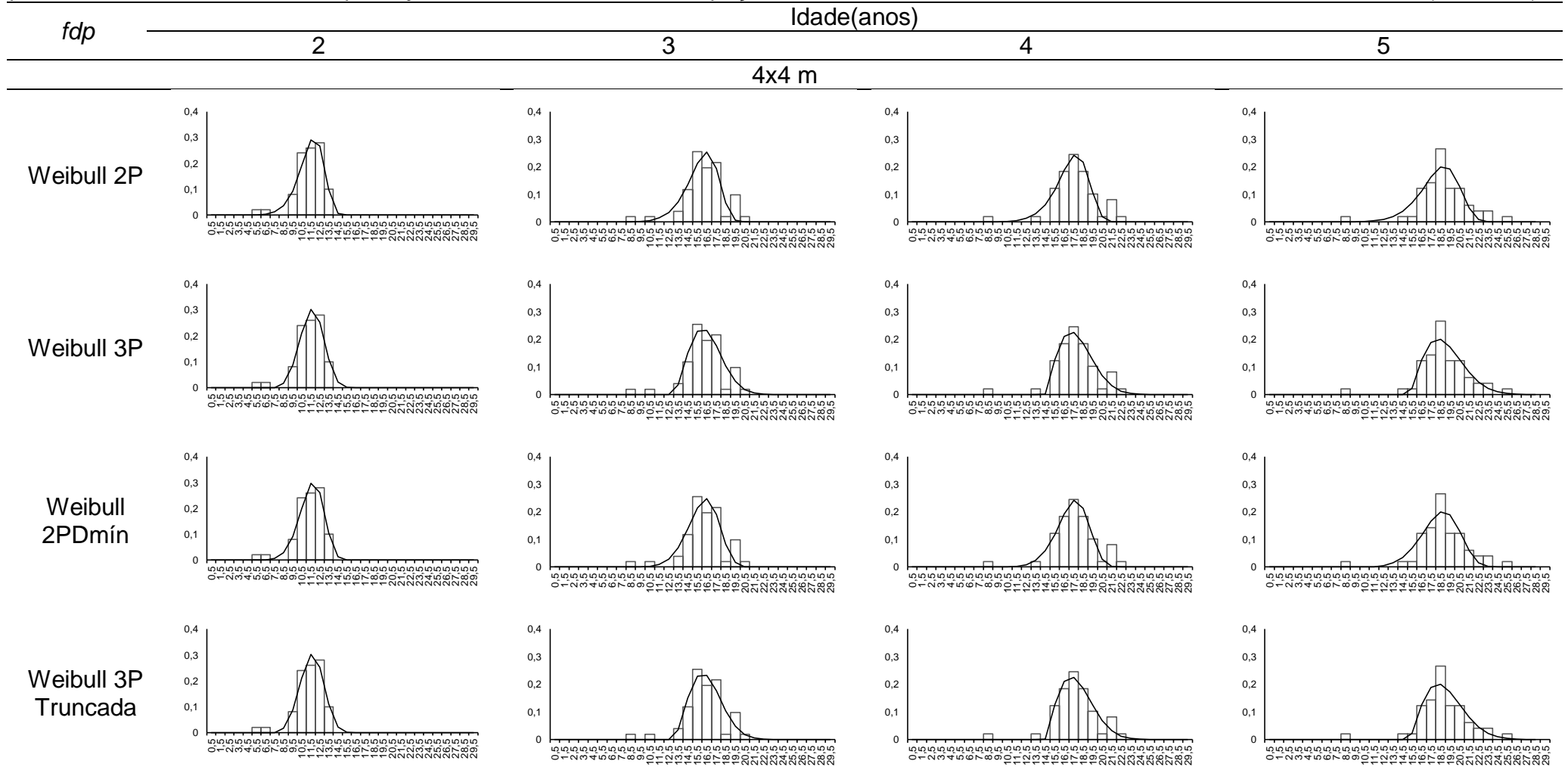




Figura 5 – Distribuição das probabilidades observadas (barras) e estimadas (linha) pelas funções densidade e probabilidade para povoamentos de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*, no espaçamento 4x4 m em diferentes idades (Conclusão)

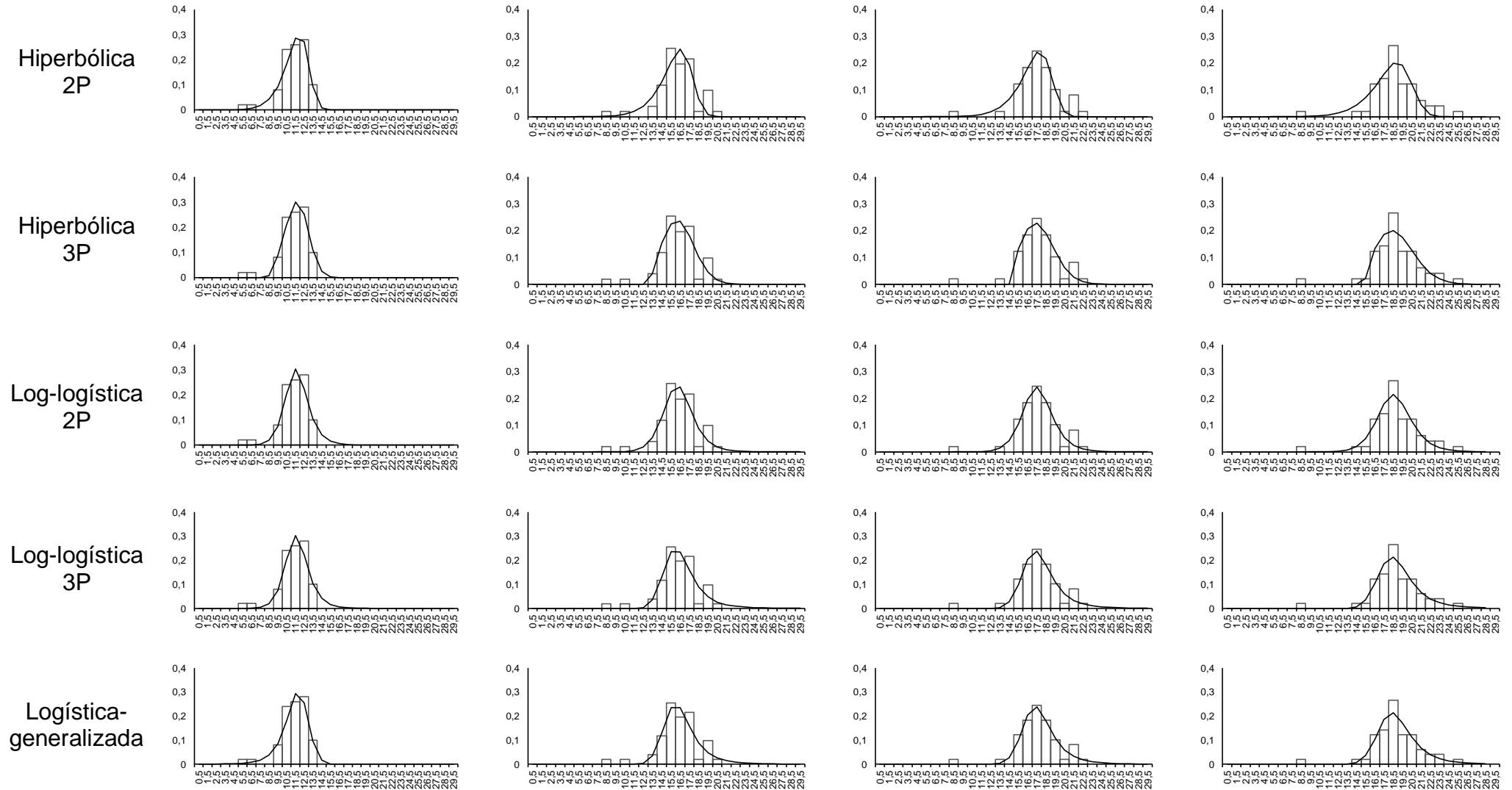


Figura 6 – Distribuição das probabilidades observadas (barras) e estimadas (linha) pelas funções densidade e probabilidade para povoamentos de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*, no espaçamento 5x5 m em diferentes idades (Continua)

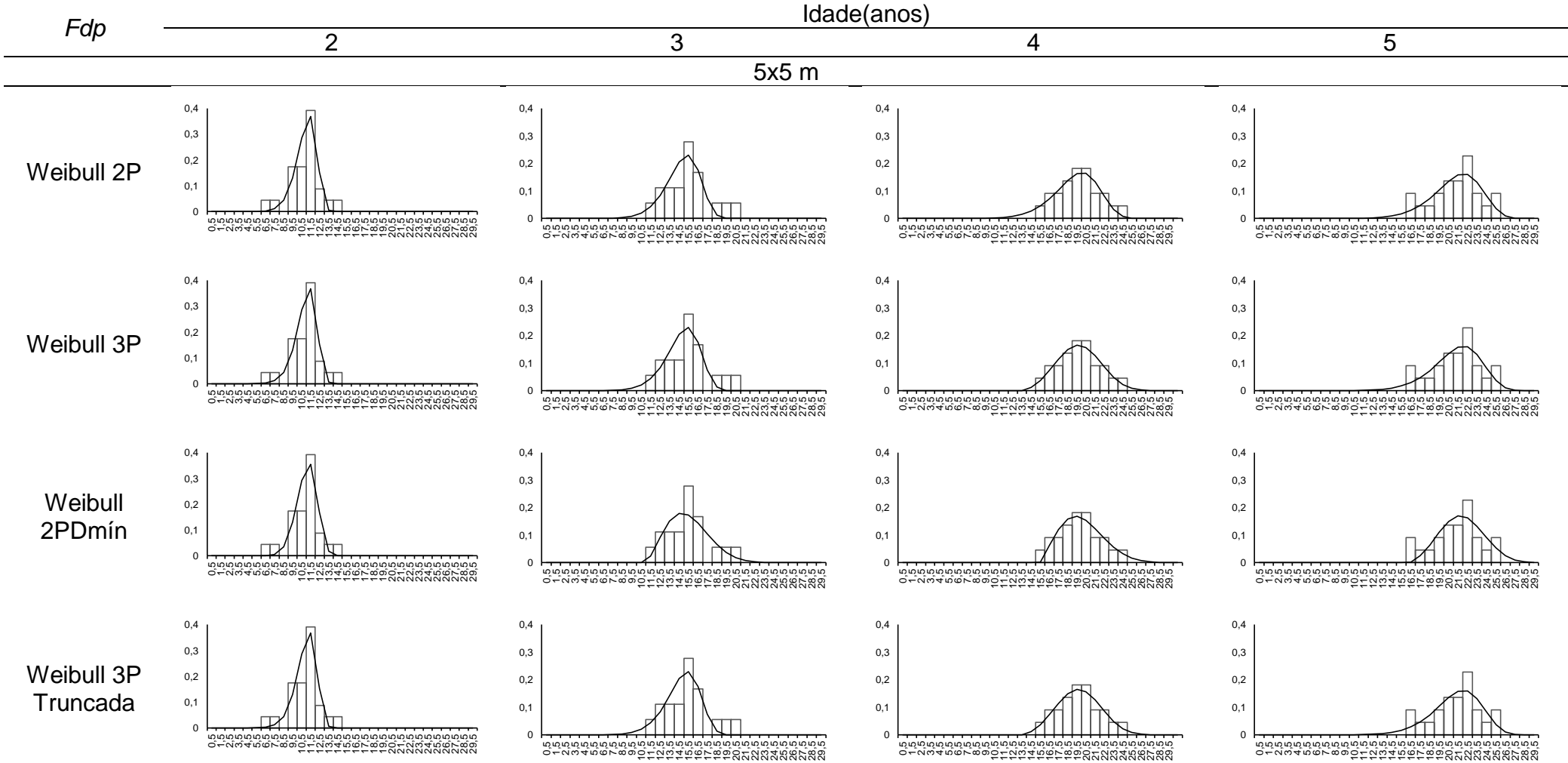
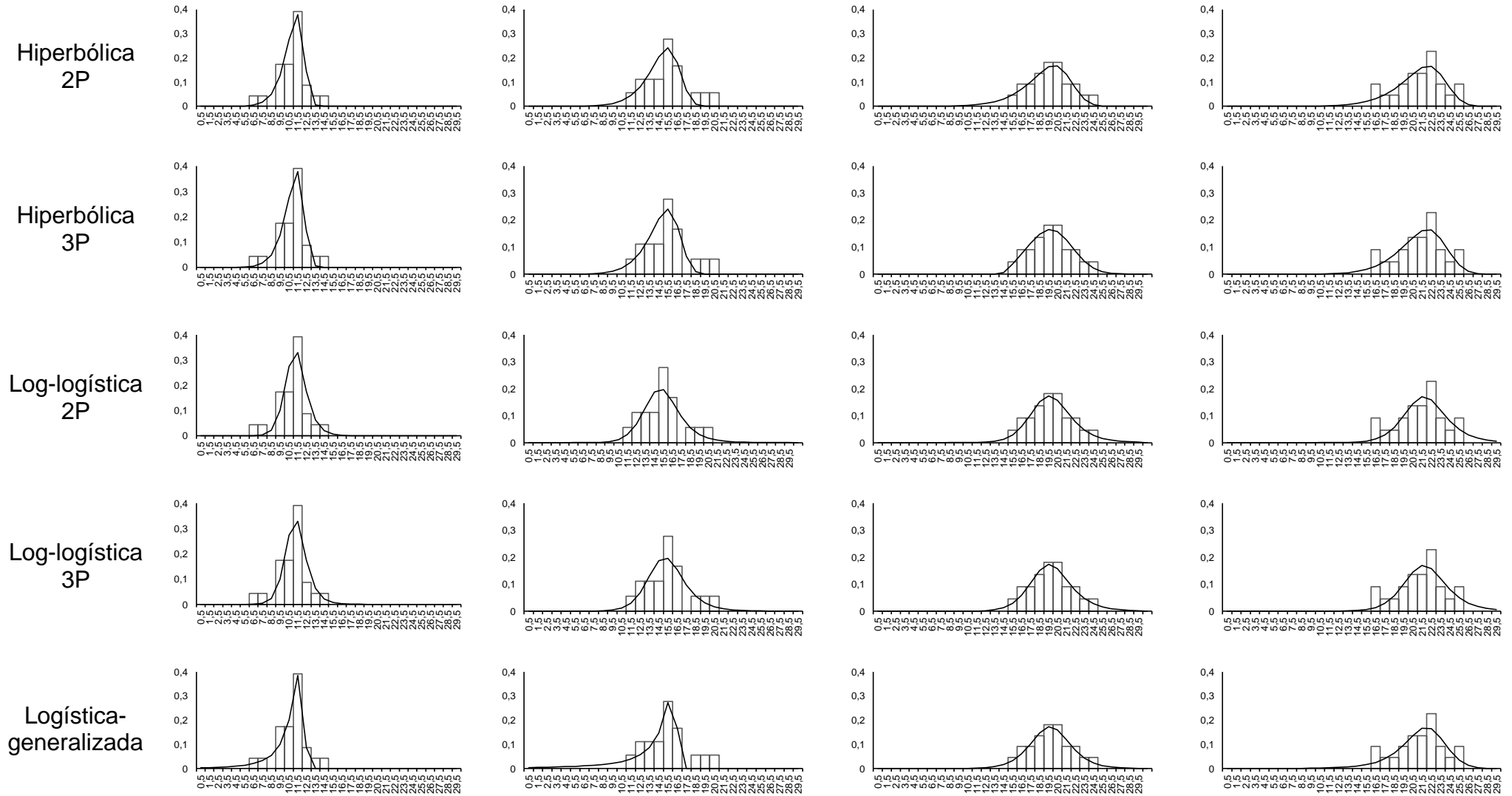


Figura 6 – Distribuição das probabilidades observadas (barras) e estimadas (linha) pelas funções densidade e probabilidade para povoamentos de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*, no espaçamento 5x5 m em diferentes idades (Conclusão)



Os resultados das correlações lineares simples, realizadas entre os parâmetros das funções e as variáveis dos povoamentos de paricá estão apresentados nas Tabelas 3 a 7.

Foi possível observar que as funções com dois parâmetros se destacam, apresentando maior correlação com as variáveis dos povoamentos, com exceção da função logística-generalizada. Essa distribuição demonstrou alta correlação linear para os cinco espaçamentos estudados, assim como as funções Weibull 2 parâmetros, Weibull 2 parâmetros com  $\alpha$  fixo no *DAP* mínimo, hiperbólica 2 parâmetros e log-logística 2 parâmetros. A distribuição logística-generalizada também obteve destaque no trabalho de Souza et al. (2016), em estudos com povoamentos desbastados do gênero *Eucalyptus*, indicando a função como de grande potencial para descrever a distribuição de diâmetros de povoamentos florestais.

Os resultados de correlações lineares apresentados demonstram que a inclusão do parâmetro de locação em uma função pode reduzir a relação entre os parâmetros das *fdp*'s e as características dos povoamentos. Porém, correlações não lineares podem ser encontradas e utilizadas com maior eficiência para construção de modelos de distribuição de diâmetros (BINOTI et al., 2012).

Observou-se uma correlação positiva dos parâmetros de escala com a idade, indicando que o crescimento do valor de  $\beta$  é diretamente proporcional ao aumento da idade, que por consequência, altera o achatamento da curva de distribuição. O mesmo comportamento pode ser observado para a correlação do parâmetro de locação com a idade. Com o passar do tempo aumenta o valor de  $\alpha$  e consequentemente, desloca a curva para a direita (GUIMARÃES, 1994). No que diz respeito ao parâmetro de forma, a correlação com a idade tende a ser negativa, em que, quanto maior a idade, menor o valor de  $\gamma$ . À medida que cresce o valor de  $\gamma$ , a distribuição tende a se tornar assimétrica negativa (BAILEY; DELL, 1973). Esse comportamento pode ser observado para todas as *fdp*, em todos os espaçamentos, exceto para o parâmetro de forma da função logística-generalizada, em que a correlação com a idade é positiva.

Para as funções com dois parâmetros, pode ser notado uma maior correlação dos parâmetros de escala com as variáveis dos povoamentos, se comparado aos parâmetros de forma que, em geral, obtiveram correlações baixas. Observou-se, também para estas funções, que quanto maior o *DAP*, maiores os valores de  $\beta$  e menores os de  $\gamma$ , comportamento semelhante ao que ocorre com o aumento da

idade. Ainda foi possível notar que, as maiores correlações puderam ser vistas entre os parâmetros e os diâmetros médio e máximo e que as menores taxas foram para o número de indivíduos por hectare.

Tabela 3 – Correlação entre características do povoamento de paricá no espaçamento 3x2 m e os parâmetros das funções ajustadas

<i>Fdp</i>	Parâmetro	Idade (anos)	N	Dméd (cm)	Dmín (cm)	Dmáx (cm)	G (m <sup>2</sup> )	Assimetria	Curtose
W2P	$\gamma$	-0,6372	0,3459	-0,4282	-0,3155	-0,5731	-0,4313	-0,7012	0,8182
	$\beta$	0,7919	-0,3227	0,9935	0,6896	0,8970	0,9462	0,0602	-0,4367
W3P	$\gamma$	-0,3848	0,3525	-0,1850	-0,2697	-0,3416	-0,1496	-0,7498	0,4279
	$\beta$	0,2371	0,0753	0,4161	0,0964	0,2627	0,4483	-0,4262	-0,1887
	$\alpha$	0,2383	-0,2949	0,1627	0,3308	0,2779	0,0955	0,5298	-0,0680
W2PDmin	$\gamma$	-0,5811	0,3756	-0,2534	-0,4587	-0,4101	-0,2314	-0,8438	0,8061
	$\beta$	0,5848	-0,1685	0,8489	0,2625	0,7687	0,8512	-0,1191	-0,3222
W3PT	$\gamma$	-0,3775	0,3579	-0,1803	-0,2543	-0,3260	-0,1442	-0,7203	0,4190
	$\beta$	0,2612	0,0697	0,4393	0,1226	0,2970	0,4705	-0,3918	-0,2083
	$\alpha$	0,2414	-0,3044	0,1714	0,3277	0,2726	0,1024	0,4986	-0,0595
H2P	$\gamma$	-0,6335	0,3485	-0,4251	-0,3129	-0,5749	-0,4279	-0,7060	0,8091
	$\beta$	0,8127	-0,3340	0,9899	0,6909	0,9087	0,9448	0,1076	-0,4773
H3P	$\gamma$	-0,3993	0,3659	-0,2070	-0,2983	-0,3427	-0,1607	-0,7176	0,4235
	$\beta$	0,2288	0,0985	0,4094	0,0819	0,2745	0,4584	-0,3970	-0,2026
	$\alpha$	0,3315	-0,3512	0,2550	0,4032	0,3513	0,1693	0,5323	-0,1284
LL2P	$\gamma$	-0,6438	0,3427	-0,4503	-0,3307	-0,5787	-0,4540	-0,6748	0,8216
	$\beta$	0,7636	-0,3042	0,9879	0,6728	0,8730	0,9385	-0,0068	-0,3893
LL3P	$\gamma$	-0,5075	0,3113	-0,3439	-0,2863	-0,4812	-0,3651	-0,7254	0,7458
	$\beta$	0,4701	-0,1620	0,5819	0,3444	0,4644	0,5177	-0,2720	-0,1134
	$\alpha$	0,0385	-0,0491	0,0836	0,1257	0,1398	0,1257	0,3540	-0,1863
LG	$\gamma$	0,0727	-0,1759	-0,0552	0,1337	0,0983	-0,0591	0,6091	-0,1714
	$\beta$	0,7953	-0,3175	0,7633	0,5499	0,7970	0,7629	0,4425	-0,7287
	$\alpha$	0,7732	-0,3209	0,9964	0,6992	0,8924	0,9439	0,0365	-0,3899

em que: N = número de indivíduos; Dméd = diâmetro médio (cm); Dmín = diâmetro mínimo (cm); Dmáx = diâmetro máximo (cm); G = área basal (m<sup>2</sup>); : W2P = Weibull 2 parâmetros; W3P = Weibull 3 parâmetros; W2PDmin = Weibull 2 parâmetros com  $\alpha$  fixo no *DAP* mínimo; W3PT = Weibull 3 parâmetros truncada à direita; H2P = Hiperbólica 2 parâmetros; H3P = Hiperbólica 3 parâmetros; LL2P = Log-logística 2 parâmetros, LL3P = Log-logística 3 parâmetros; LG = Logística generalizada.

Tabela 4 – Correlação entre características do povoamento de paricá no espaçamento 3x3 m e os parâmetros das funções ajustadas

<i>f<sub>dp</sub></i>	Parâmetro	Idade (anos)	N	D <sub>méd</sub> (cm)	D <sub>mín</sub> (cm)	D <sub>máx</sub> (cm)	G (m <sup>2</sup> )	Assimetria	Curtose
W2P	$\gamma$	-0,5229	-0,0527	-0,2495	-0,1618	-0,4609	-0,3583	-0,6292	0,5366
	$\beta$	0,7890	-0,1737	0,9927	0,7706	0,8864	0,8842	-0,0797	-0,4261
W3P	$\gamma$	-0,3179	-0,0285	-0,0784	0,0099	-0,2871	-0,1582	-0,5577	-0,0303
	$\beta$	0,2861	-0,0930	0,4804	0,4158	0,3258	0,4080	-0,2720	-0,4496
	$\alpha$	0,1833	-0,0066	0,0841	0,0144	0,2009	0,0979	0,2796	0,2541
W2PDmin	$\gamma$	-0,4486	0,1390	-0,1626	-0,3756	-0,3561	-0,1736	-0,7889	0,5329
	$\beta$	0,6284	0,1095	0,7952	0,2683	0,7383	0,8448	-0,2436	-0,2811
W3PT	$\gamma$	-0,3098	-0,0167	-0,0724	0,0152	-0,2714	-0,1477	-0,5430	-0,0292
	$\beta$	0,3133	-0,0834	0,5014	0,4336	0,3609	0,4342	-0,2439	-0,4625
	$\alpha$	0,1832	-0,0250	0,0967	0,0215	0,1947	0,1003	0,2470	0,2580
H2P	$\gamma$	-0,5225	-0,0620	-0,2470	-0,1534	-0,4608	-0,3605	-0,6289	0,5204
	$\beta$	0,8081	-0,1551	0,9877	0,7625	0,8978	0,8942	-0,0428	-0,4534
H3P	$\gamma$	-0,3128	-0,0729	-0,0705	0,0220	-0,2704	-0,1660	-0,5394	-0,0191
	$\beta$	0,2760	-0,1301	0,4808	0,4228	0,3309	0,3943	-0,2689	-0,4280
	$\alpha$	0,2392	0,0445	0,1163	0,0296	0,2365	0,1544	0,3031	0,1873
LL2P	$\gamma$	-0,4934	-0,0831	-0,2332	-0,1437	-0,4306	-0,3581	-0,5974	0,5550
	$\beta$	0,7590	-0,1977	0,9892	0,7750	0,8637	0,8626	-0,1236	-0,4037
LL3P	$\gamma$	-0,3980	-0,0023	-0,1177	-0,0643	-0,3571	-0,2292	-0,6905	0,2500
	$\beta$	0,5174	-0,1133	0,7273	0,5701	0,5567	0,6141	-0,3032	-0,4331
	$\alpha$	0,0426	-0,0456	-0,0304	-0,0239	0,0999	0,0063	0,3473	0,2298
LG	$\gamma$	0,1201	0,0606	-0,0970	-0,1247	0,1027	-0,0123	0,4750	0,2697
	$\beta$	0,7358	0,0357	0,6589	0,4848	0,7356	0,7253	0,3205	-0,6110
	$\alpha$	0,7763	-0,1932	0,9969	0,7761	0,8822	0,8737	-0,0991	-0,3795

em que: N = número de indivíduos; D<sub>méd</sub> = diâmetro médio (cm); D<sub>mín</sub> = diâmetro mínimo (cm); D<sub>máx</sub> = diâmetro máximo (cm); G = área basal (m<sup>2</sup>); : W2P = Weibull 2 parâmetros; W3P = Weibull 3 parâmetros; W2PDmin = Weibull 2 parâmetros com  $\alpha$  fixo no *DAP* mínimo; W3PT = Weibull 3 parâmetros truncada à direita; H2P = Hiperbólica 2 parâmetros; H3P = Hiperbólica 3 parâmetros; LL2P = Log-logística 2 parâmetros, LL3P = Log-logística 3 parâmetros; LG = Logística generalizada.

Tabela 5 – Correlação entre características do povoamento de paricá no espaçamento 3x4 m e os parâmetros das funções ajustadas

<i>fdp</i>	Parâmetro	Idade (anos)	N	Dméd (cm)	Dmín (cm)	Dmáx (cm)	G (m <sup>2</sup> )	Assimetria	Curtose
W2P	$\gamma$	-0,4496	-0,0953	-0,1224	-0,0139	-0,3379	-0,2319	-0,5576	0,6007
	$\beta$	0,7941	-0,2218	0,9918	0,7710	0,9022	0,9119	-0,0339	-0,3623
W3P	$\gamma$	-0,2886	-0,0101	-0,0319	0,0643	-0,2093	-0,0882	-0,4706	0,0399
	$\beta$	0,2989	-0,0750	0,4605	0,3820	0,3604	0,4244	-0,2018	-0,4249
	$\alpha$	0,1754	-0,0615	0,1132	0,0589	0,1745	0,1025	0,2226	0,2594
W2PDmin	$\gamma$	-0,4117	0,0885	-0,1360	-0,3694	-0,2922	-0,1626	-0,7697	0,6739
	$\beta$	0,5921	0,0699	0,6838	0,1178	0,6898	0,7336	-0,2568	-0,1605
W3PT	$\gamma$	-0,2761	-0,0056	-0,0170	0,0814	-0,1847	-0,0716	-0,4422	0,0469
	$\beta$	0,3187	-0,0709	0,4822	0,4064	0,3921	0,4483	-0,1719	-0,4306
	$\alpha$	0,1782	-0,0741	0,1186	0,0536	0,1663	0,1024	0,1892	0,2591
H2P	$\gamma$	-0,4480	-0,0983	-0,1198	-0,0071	-0,3369	-0,2304	-0,5563	0,5869
	$\beta$	0,8133	-0,2043	0,9852	0,7591	0,9115	0,9169	-0,0019	-0,3966
H3P	$\gamma$	-0,3042	-0,0341	-0,0602	0,0167	-0,2283	-0,1233	-0,4779	0,0724
	$\beta$	0,2763	-0,0916	0,4346	0,3355	0,3406	0,3945	-0,2222	-0,3931
	$\alpha$	0,2562	-0,0442	0,1878	0,1436	0,2498	0,1860	0,2712	0,1637
LL2P	$\gamma$	-0,4432	-0,1157	-0,1347	-0,0229	-0,3333	-0,2549	-0,5294	0,6214
	$\beta$	0,7697	-0,2402	0,9908	0,7746	0,8869	0,8983	-0,0699	-0,3335
LL3P	$\gamma$	-0,3543	0,0248	-0,0693	0,0721	-0,2888	-0,1467	-0,5519	0,2092
	$\beta$	0,5233	-0,0799	0,6810	0,5814	0,5620	0,6294	-0,1666	-0,4815
	$\alpha$	0,0203	-0,1304	0,0139	-0,0613	0,0836	-0,0050	0,1776	0,3666
LG	$\gamma$	0,0740	-0,0092	-0,0983	-0,1375	0,0688	-0,0704	0,3941	0,3017
	$\beta$	0,7300	0,0227	0,5952	0,3823	0,6975	0,6646	0,3149	-0,6356
	$\alpha$	0,7766	-0,2448	0,9975	0,7829	0,8972	0,9042	-0,0509	-0,3053

em que: N = número de indivíduos; Dméd = diâmetro médio (cm); Dmín = diâmetro mínimo (cm); Dmáx = diâmetro máximo (cm); G = área basal (m<sup>2</sup>); : W2P = Weibull 2 parâmetros; W3P = Weibull 3 parâmetros; W2PDmin = Weibull 2 parâmetros com  $\alpha$  fixo no *DAP* mínimo; W3PT = Weibull 3 parâmetros truncada à direita; H2P = Hiperbólica 2 parâmetros; H3P = Hiperbólica 3 parâmetros; LL2P = Log-logística 2 parâmetros, LL3P = Log-logística 3 parâmetros; LG = Logística generalizada.

..



Tabela 6 – Correlação entre características do povoamento de paricá no espaçamento 4x4 m e os parâmetros das funções ajustadas

<i>fdp</i>	Parâmetro	Idade (anos)	N	Dméd (cm)	Dmín (cm)	Dmáx (cm)	G (m <sup>2</sup> )	Assimetria	Curtose
W2P	$\gamma$	-0,3992	-0,1408	-0,0438	0,0172	-0,2608	-0,1537	-0,6142	0,6590
	$\beta$	0,7881	-0,2787	0,9924	0,8109	0,9089	0,9080	-0,0552	-0,2765
W3P	$\gamma$	-0,2068	-0,0113	0,0285	0,1345	-0,1382	-0,0081	-0,4169	-0,0391
	$\beta$	0,3495	-0,0811	0,4636	0,4435	0,3819	0,4435	-0,1288	-0,4623
	$\alpha$	0,1195	-0,0931	0,1202	0,0215	0,1625	0,0873	0,1215	0,3590
W2PDmin	$\gamma$	-0,3973	-0,0121	-0,1165	-0,3418	-0,2776	-0,1745	-0,7916	0,7591
	$\beta$	0,5955	-0,0405	0,6800	0,1674	0,6806	0,6869	-0,2680	-0,0586
W3PT	$\gamma$	-0,1982	0,0010	0,0380	0,1461	-0,1179	0,0061	-0,3936	-0,0294
	$\beta$	0,3695	-0,0689	0,4810	0,4621	0,4119	0,4671	-0,0998	-0,4700
	$\alpha$	0,1264	-0,1188	0,1374	0,0296	0,1624	0,0938	0,0866	0,3614
H2P	$\gamma$	-0,3986	-0,1409	-0,0457	0,0205	-0,2637	-0,1549	-0,6113	0,6457
	$\beta$	0,8076	-0,2630	0,9861	0,8012	0,9166	0,9107	-0,0227	-0,3143
H3P	$\gamma$	-0,2197	-0,0256	-0,0020	0,0838	-0,1595	-0,0413	-0,4223	-0,0070
	$\beta$	0,3325	-0,0933	0,4392	0,4022	0,3621	0,4174	-0,1449	-0,4295
	$\alpha$	0,1869	-0,0806	0,1836	0,0977	0,2285	0,1566	0,1681	0,2690
LL2P	$\gamma$	-0,3953	-0,1474	-0,0567	0,0061	-0,2584	-0,1721	-0,5858	0,6693
	$\beta$	0,7672	-0,2920	0,9921	0,8130	0,8970	0,8995	-0,0885	-0,2464
LL3P	$\gamma$	-0,3226	0,0097	-0,0779	0,0396	-0,2842	-0,1360	-0,5950	0,2516
	$\beta$	0,5072	-0,0804	0,6012	0,5485	0,5039	0,5719	-0,1670	-0,4439
	$\alpha$	0,0259	-0,1602	0,1059	0,0133	0,1490	0,0605	0,1443	0,3642
LG	$\gamma$	0,0320	0,0174	-0,0808	-0,1271	0,0689	-0,0614	0,3552	0,3123
	$\beta$	0,7189	-0,0256	0,5597	0,4111	0,6606	0,6080	0,3457	-0,6473
	$\alpha$	0,7682	-0,2975	0,9978	0,8181	0,9050	0,9028	-0,0762	-0,2148

em que: N = número de indivíduos; Dméd = diâmetro médio (cm); Dmín = diâmetro mínimo (cm); Dmáx = diâmetro máximo (cm); G = área basal (m<sup>2</sup>); : W2P = Weibull 2 parâmetros; W3P = Weibull 3 parâmetros; W2PDmin = Weibull 2 parâmetros com  $\alpha$  fixo no *DAP* mínimo; W3PT = Weibull 3 parâmetros truncada à direita; H2P = Hiperbólica 2 parâmetros; H3P = Hiperbólica 3 parâmetros; LL2P = Log-logística 2 parâmetros, LL3P = Log-logística 3 parâmetros; LG = Logística generalizada.

..

Tabela 7 – Correlação entre características do povoamento de paricá no espaçamento 5x5 m e os parâmetros das funções ajustadas

<i>fdp</i>	Parâmetro	Idade (anos)	N	Dméd (cm)	Dmín (cm)	Dmáx (cm)	G (m <sup>2</sup> )	Assimetria	Curtose
W2P	$\gamma$	-0,3170	-0,4016	0,1201	0,1803	-0,0807	-0,3126	-0,4940	0,6213
	$\beta$	0,7623	-0,3790	0,9933	0,7952	0,9264	0,5600	-0,1335	-0,0743
W3P	$\gamma$	-0,1744	-0,2709	0,1276	0,1335	-0,0022	-0,1642	-0,3945	0,2176
	$\beta$	0,3661	-0,1924	0,5137	0,3780	0,4630	0,2911	-0,2231	-0,1596
	$\alpha$	0,1226	-0,0453	0,1122	0,1283	0,1266	0,0645	0,1766	0,1388
W2PDmin	$\gamma$	-0,3323	-0,0932	-0,0593	-0,3359	-0,1740	-0,1800	-0,7597	0,8081
	$\beta$	0,5332	0,0392	0,5474	-0,0139	0,5891	0,5540	-0,4343	0,2094
W3PT	$\gamma$	-0,1660	-0,2626	0,1340	0,1418	0,0147	-0,1522	-0,3673	0,2264
	$\beta$	0,3859	-0,1805	0,5285	0,3949	0,4891	0,3150	-0,1942	-0,1656
	$\alpha$	0,1329	-0,0780	0,1387	0,1446	0,1362	0,0590	0,1369	0,1436
H2P	$\gamma$	-0,3157	-0,4018	0,1222	0,1837	-0,0799	-0,3116	-0,4958	0,6141
	$\beta$	0,7838	-0,3546	0,9877	0,7844	0,9330	0,5809	-0,1075	-0,1097
H3P	$\gamma$	-0,1974	-0,2541	0,0820	0,0693	-0,0355	-0,1815	-0,4011	0,2433
	$\beta$	0,3329	-0,1859	0,4673	0,3133	0,4265	0,2650	-0,2418	-0,1197
	$\alpha$	0,2032	-0,0515	0,1958	0,2229	0,2053	0,1263	0,2112	0,0533
LL2P	$\gamma$	-0,3135	-0,3850	0,1004	0,1722	-0,0928	-0,3172	-0,4730	0,6137
	$\beta$	0,7412	-0,3981	0,9936	0,7990	0,9172	0,5398	-0,1591	-0,0462
LL3P	$\gamma$	-0,2510	-0,1791	0,0578	0,0996	-0,1303	-0,1813	-0,5720	0,3175
	$\beta$	0,4660	-0,1290	0,5966	0,4407	0,5251	0,4130	-0,2864	-0,1577
	$\alpha$	0,0634	-0,1967	0,1223	0,1537	0,1433	-0,0550	0,2282	0,1593
LG	$\gamma$	0,0390	0,0837	-0,1101	-0,0499	-0,0104	-0,0142	0,3762	0,0807
	$\beta$	0,6427	0,0129	0,4709	0,3326	0,5517	0,4818	0,2302	-0,4859
	$\alpha$	0,7379	-0,4098	0,9948	0,8094	0,9157	0,5277	-0,1465	-0,0287

em que: N = número de indivíduos; Dméd = diâmetro médio (cm); Dmín = diâmetro mínimo (cm); Dmáx = diâmetro máximo (cm); G = área basal (m<sup>2</sup>); : W2P = Weibull 2 parâmetros; W3P = Weibull 3 parâmetros; W2PDmin = Weibull 2 parâmetros com  $\alpha$  fixo no *DAP* mínimo; W3PT = Weibull 3 parâmetros truncada à direita; H2P = Hiperbólica 2 parâmetros; H3P = Hiperbólica 3 parâmetros; LL2P = Log-logística 2 parâmetros, LL3P = Log-logística 3 parâmetros; LG = Logística generalizada.

A correlação dos parâmetros das funções com características do plantio, consiste em um fator importante na construção dos *MDD*. Um cenário com alta correlação, fornece evidências de que há chances em projetar com sucesso a distribuição de probabilidades por meio da recuperação dos parâmetros da função (SANQUETTA et al., 2014).

Santos (2012), utilizando a mesma base de dados deste estudo, propôs um modelo de crescimento e produção do paricá, considerando os cinco espaçamentos analisados, e determinou as idades técnicas de desbaste, a partir da função Weibull 2 parâmetros. Entretanto, percebe-se pela presente pesquisa, que à respeito da descrição do comportamento dos povoamentos ao longo do tempo, existem funções igualmente indicadas para descrever a estrutura dos povoamentos. O estudo sobre a distribuição de diâmetros de uma floresta é uma ferramenta de grande importância para estimar o número de árvores por classe de diâmetro, inferir sobre o desenvolvimento do povoamento, definir a quantidade de produto que a floresta dispõe em cada classe, simular regimes de manejo e auxiliar as análises técnicas e econômicas dos projetos florestais (GUIMARÃES, 1994; CAMPOS; LEITE, 2017). Dessa maneira, a simples descrição da frequência de indivíduos por classe de diâmetro, possibilita ao manejador tomar decisões sobre como conduzir o povoamento de forma adequada e que garantam produção satisfatória.

É importante ressaltar que apesar da grande quantidade de pesquisas relacionadas aos modelos de crescimento e produção, boa parte estão relacionadas aos povoamentos de espécies do gênero *Eucalyptus* e *Pinus*. Esse fato evidencia a importância deste trabalho em testar a eficiência de funções densidade e probabilidade para descrever o comportamento da espécie *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* e, conseqüentemente, servir como base para propor um modelo de distribuição, capaz de projetar a produção de madeira desta espécie em plantios puros.

## 4 CONCLUSÃO

As funções densidade de probabilidade Weibull 2 e 3 parâmetros, Weibull 2 parâmetros com  $\alpha$  fixo no *DAP* mínimo, Weibull 3 parâmetros truncada, hiperbólica 2 e 3 parâmetros, log-logística 2 e 3 parâmetros e logística-generalizada, demonstraram desempenho satisfatório para descrição de povoamentos de paricá.

As funções Weibull 2 parâmetros, Weibull 2 parâmetros com  $\alpha$  fixo no *DAP* mínimo, hiperbólica 2 parâmetros, log-logística 2 parâmetros e logística-generalizada apresentaram evidências de sucesso para a recuperação dos parâmetros em cada um dos cinco espaçamentos, devido à alta correlação linear entre os respectivos parâmetros e características dos povoamentos.

## REFERÊNCIAS

- ALVES, L. W. R., CARVALHO, E. J. M.; SILVA, L. G. T. **Diagnóstico agrícola do município de Paragominas, PA**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2014. 28 p. (Embrapa Amazônia Oriental. Boletim de Pesquisa e Desenvolvimento, 91).
- ARAÚJO JÚNIOR, C. A. et al. Uso da função Weibull para descrever a área basal por classe de diâmetro de um povoamento de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 40, n. 95, p. 401-406, 2012.
- AZEVEDO, G. B. et al. Modelagem da produção em nível de povoamento e por distribuição diamétrica em plantios de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 44, n. 110, p. 383-392, 2016.
- BAILEY, T. R. L.; DELL, R. Quantifying diameter distributions with the weibull function. **Forest Science**, Oxford, v. 19, n. 2, p. 97-104, 1973.
- BETTINGER, P. et al. **Forest management and planning**. Elsevier, 2009.331p.
- BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M. S.; LEITE, H. G. Análise da função log-logística para modelagem da distribuição de diâmetros. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 39, n. 5, p. 943 – 951, 2015b.
- BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M. S.; LEITE, H. G. Modelagem da distribuição diamétrica de povoamentos equiâneos de eucalipto utilizando a função logística generalizada. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 39, n. 4, p. 707-711, 2015a.
- BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M. S.; LEITE, H. G. Projeção de distribuição diamétrica de povoamentos equiâneos utilizando a função Nakagami e Weibull. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 5, n. 2, p. 103-110, 2014.
- BINOTI, D. H. B. et al. Modelos de distribuição diamétrica para povoamentos desbastados de eucalipto utilizando a função hiperbólica. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 35, n. 5, p. 1069-1076, 2011.
- BINOTI, D. H. B. et al. Probability density functions for description of diameter distribution in thinned stands of *Tectona grandis*. **Cerne**, Lavras, v. 18, n. 2, p. 185-196, 2012.
- BINOTI, D. H. B.; LEITE, H. G.; SILVA, M. L. M. Sistema computacional para ajuste de funções densidade de probabilidade. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 24, p. 1-8, 2017.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração Florestal: perguntas e respostas**. 5. ed., Viçosa, MG: UFV, 2017. 636 p.
- FÁVERO, L. P. et al. **Análise de dados: modelagem multivariada para tomada de decisões**. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009. 646 p.
- GUIMARÃES, D. P. **Desenvolvimento de um modelo de distribuição diamétrica de passo invariante para prognose e projeção da estrutura de povoamentos de eucalipto**. 1994. 178f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1994.

GUIMARÃES, D. P. **Uma função hiperbólica de distribuição probabilística de alta flexibilidade**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2002. 40 p. (Embrapa Cerrados. Documentos, 79).

GUJARATI, D. N.; PORTER, D. C. **Econometria Básica**. 5 ed., McGraw Hill Brasil, 2011. 920 p.

KERSHAW JUNIOR, J. A.; DUCEY, M. J.; BEERS, T.W.; HUSCH, B. **Forest mensuration**. 5.ed. Malabar: Wiley-Blackwell, 2016. 630p.

INSTITUTO BRASILEIRO DE GEOGRAFIA E ESTATÍSTICA (IBGE). **Pará**: Paragominas, 2017. Disponível em: <  
<http://cidades.ibge.gov.br/xtras/perfil.php?lang=&codmun=150550&search=para|paragominas>>. Acesso em: 27 maio 2017.

LEITE, H. G. et al. Avaliação do ajuste das funções Weibull e hiperbólica a dados de povoamentos de eucalipto submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 34, n. 2, p.305-311, 2010.

MONTEIRO, D. C. A. et al. Dinâmica espectro-temporal modis em plantios de paricá (*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex. Ducke) Barneby) associada a diferentes condições hídricas do solo na Amazônia brasileira. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE AGROMETEOROLOGIA, 18., 2013, Belém. **Anais...** Belém: UFP, 2013, p. 1- 5.

NOGUEIRA, G. S. et al. Modelo de distribuição diamétrica para povoamentos de *Eucalyptus* sp. submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, n. 4, p. 579-589, 2005.

NORD-LARSEN, T.; CAO, Q. V. A diameter distribution model for even-aged beech in Denmark. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.2, n.31, p.218-225, 2006.

PIMENTEL, A. R. C. et al. **Estatística municipal**: Dom Eliseu. Belém: Instituto de desenvolvimento econômico, social e ambiental do Pará, 2012. 46 p.

PINTO, A. et al. **Diagnóstico socioeconômico e florestal do município de Paragominas**. Belém: Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia – Imazon, 2009. 65 p. (Instituto do Homem e Meio Ambiente da Amazônia – Imazon. Relatório Técnico).

SANQUETTA, C. R. et al. A model based on environmental factors for diameter distribution in Black Wattle in Brazil. **Plos One**, Califórnia, v. 9, n. 6, 2014.

SANTOS, E. M. **Crescimento e produção de plantios de paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke) sob diferentes espaçamentos**. 2012. 74 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais)–Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2012.

SILVA, G. F. Rendimento em laminação de madeira de paricá na região de Paragominas, Pará. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 25, n. 2, p. 447-455, 2015.

SOUZA, L. A. et al. Funções densidade de probabilidade para descrição da distribuição de diâmetros em povoamentos florestais desbastados. **Revista Brasileira de Biometria**, Lavras, v. 34, n. 3, p. 421-434, 2016.

STEPKA, T. F.; LISBOA, G. S.; KURCHAIT, S. M. Funções densidade de probabilidade para a estimativa da distribuição diamétrica em povoamento de *Eucalyptus* sp na região centro-sul do Paraná. **Ambiência**, Guarapuava, v. 7, n. 3, p. 429 – 439, 2011.

VIDAURRE, G.B. **Caracterização anatômica, química e físico-mecânica da madeira de paricá (*Shizolobium amazonicum*) para produção de energia e polpa celulósica**. 2010. 74 f. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2010.

## CAPÍTULO II - SISTEMA DE PROJEÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DE DIÂMETROS EM POVOAMENTOS DE *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* SOB DIFERENTES ESPAÇAMENTOS

### RESUMO

A projeção do crescimento e produção de uma floresta, por meio da modelagem da distribuição de diâmetros, está diretamente relacionado com a recuperação dos parâmetros das funções densidade de probabilidade (*fdp*). A projeção dos parâmetros das *fdps* para idades futuras possibilita estimar a frequência de indivíduos por classe e, conseqüentemente, prognosticar a produção do plantio em anos subsequentes. Dessa maneira, objetivou-se nesse estudo propor modelos para projeção da distribuição de diâmetros para povoamentos de paricá sob diferentes espaçamentos. Como visto no capítulo I, todas as funções testadas foram capazes de descrever bem a estrutura de diâmetros dos plantios em questão. No entanto, para a projeção escolheu-se a função Weibull devido a flexibilidade e fácil aplicação. Foram ajustados sete modelos de regressão para recuperação dos parâmetros da função Weibull, nos cinco espaçamentos, assim como para a projeção dos diâmetros máximos e número de indivíduos por hectare. Ajustou-se também, para o conjunto de dados de todos os espaçamentos, modelos com acréscimo da variável área útil por planta. As equações foram escolhidas de acordo com os coeficientes de determinação ajustado ( $\bar{R}^2$ ), viés (*V*), raiz do quadrado médio do erro (*RQME*) e análise gráfica dos resíduos. Após a escolha dos sistemas, realizou-se a análise de aderência pelo teste Kolmogorov-Smirnov, a 5% de significância. Foi possível obter sistemas de equações capazes de projetar as variáveis desejadas. Contudo, verificou-se uma baixa correlação do parâmetro de forma com as variáveis dos povoamentos. Para o maior espaçamento (5x5), foi verificado um ajuste com baixa exatidão. O acréscimo da variável área útil por planta não trouxe melhoria aos ajustes. Dessa maneira, obteve-se sistemas de equações capazes de projetar as variáveis desejadas, exceto para o maior espaçamento (5x5).

**Palavras-chave:** Paricá, Prognose, Weibull



## CHAPTER II - PROJECTION SYSTEM OF DIAMETERS DISTRIBUTION IN STANDS OF *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* IN DIFFERENT SPACINGS

### ABSTRACT

The projection of the growth and yield of a forest, through the modeling of the diameters distribution, is directly related to the recovery of the parameters of the probability density functions (*pdf*). The projection of the *pdf* parameters for future ages makes it possible to estimate the frequency of individuals per class and, consequently, to predict planting yield in subsequent years. In this way, the objective of this study was to propose models for projecting the diameters distribution to paricá stands under different spacings. As seen in Chapter I, all the functions tested were able to describe well the diameter structure of the plantations in question. However, for the projection was choosed the Weibull function due to the flexibility and easy application. Seven regression models were adjusted for the recovery of Weibull function parameters in the five spacings, as well as for the projection of maximum diameters and number of individuals per hectare. Also, for the data set with all spacings, models with an insert of the useful area variable were also fitted. The equations were chosen according to the adjusted determination coefficients ( $\bar{R}^2$ ), bias (*B*), root mean square error (*RMSE*) and graphical analysis of the residuals. After the choice of systems, the Kolmogorov-Smirnov adherence test was performed, at 5% significance. It was possible to obtain systems of equations capable of designing the desired variables. However, there was a low correlation of the shape parameter with the variables of the stands. For the greater spacing (5x5), an fit with low accuracy was verified. The addition of the useful area per plant did not bring improvement to the fit. In this way, were obtained systems of equations capable of project the diameters distribution, except for the largest spacing (5x5).

**Keywords:** Paricá, Prognosis, Weibull

## 1 INTRODUÇÃO

A quantificação do crescimento e da produção dos povoamentos florestais é ferramenta essencial para definir a utilização dos produtos advindos da floresta, além de fornecer informações necessárias para tomadas de decisão ligadas ao setor (GUIMARÃES, 1994). Essa quantificação é feita normalmente por meio de modelos de crescimento e produção.

Dentre os modelos de crescimento e produção, é possível destacar os modelos de distribuição de diâmetros, que fornecem informações mais detalhadas sobre a estrutura diamétrica da floresta, permitindo análise de multiprodutos, simulação de desbastes e análise econômica (BINOTI; BINOTI; LEITE, 2015a). O ajuste dos modelos de distribuição de diâmetros se baseiam na estimação dos parâmetros de funções densidade de probabilidade (*fdp*). Essas funções permitem estimar o número de indivíduos pertencentes a cada classe de diâmetro e, a partir daí, inferir a produção dentro de cada classe (CAMPOS; LEITE, 2017). A projeção ou recuperação dos parâmetros da *fdp* para idades futuras, possibilita a estimação da frequência de indivíduos por classe e, conseqüentemente, prognosticar a produção do plantio em anos subsequentes (VANCLAY, 1994)

A recuperação dos parâmetros da *fdp* pode ser realizada por meio de modelos de regressão, podendo estas serem lineares ou não lineares. Os modelos utilizam parâmetros na idade atual e características do povoamento a fim de prever cenários futuros. A capacidade dos modelos em correlacionar os parâmetros das funções com as variáveis dos povoamentos é fator limitante para obtenção do sistema de equações que irão compor o modelo da distribuição de diâmetros (BINOTI et al., 2011).

Diversos estudos, utilizando modelos de distribuição de diâmetros, foram desenvolvidos a fim de descrever e modelar o crescimento e a produção de plantios florestais. Vários deles são direcionados aos povoamentos de espécies dos gêneros *Eucalyptus* e *Pinus*, podendo-se citar os trabalhos de Binoti, Binoti e Leite (2015a), Binoti, Binoti e Leite (2015b), Binoti et al. (2011), Dias et al. (2005), Ferraz Filho et al. (2015), Leite et al. (2013), Nogueira et al. (2005), Schneider et al. (2008). Entretanto, ainda são escassos as pesquisas desenvolvidas a respeito da modelagem do crescimento e da produção de plantios comerciais de espécies não convencionais, como é o caso de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (paricá).

Sendo assim, este trabalho teve como objetivo ajustar modelos de projeção da distribuição de diâmetros para povoamentos de paricá sob diferentes espaçamentos de plantio. Além disso, avaliar a inclusão da variável área útil aos modelos, com o intuito de selecionar um sistema capaz de projetar os diâmetros para todos os espaçamentos.

## 2 METODOLOGIA

### 2.1 Descrição dos dados

Os dados dos povoamentos de paricá utilizados neste capítulo estão descritos no item 2.2 do Capítulo I. As variáveis dos povoamentos nas quatro idades disponíveis, juntamente com os parâmetros de cada *fdp* (Capítulo I), foram pareados em idades presente e futura, criando assim, uma base de dados para a realização da projeção. A variação dos valores estimados para os parâmetros da função Weibull estão apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 – Valores máximos e mínimos de  $\gamma$  e  $\beta$  estimados pela função Weibull para cada espaçamento e idade, em povoamentos de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*

Espaçamento (m)	Idade (anos)	$\gamma$		$\beta$	
		Mínimo	Máximo	Mínimo	Máximo
3x2	2	4,5893	10,5929	7,9567	11,9332
	3	4,8516	6,9769	12,5733	15,7505
	4	4,5220	6,7766	13,9408	16,7335
	5	4,6085	6,4588	14,3096	16,4053
3x3	2	5,0029	13,2138	7,8580	12,4141
	3	6,1706	10,2329	13,6245	16,9848
	4	5,7015	8,6413	15,1461	18,2188
	5	5,0268	7,4184	15,5074	18,2414
3x4	2	4,7582	12,6499	9,3594	13,0613
	3	5,8624	13,3586	15,2855	17,2828
	4	5,6361	11,8870	16,3623	18,7703
	5	5,3795	9,7121	17,5996	19,4872
4x4	2	5,9010	15,2582	9,1291	12,7263
	3	6,5713	12,2962	15,7117	18,0183
	4	6,5782	11,8765	17,8960	19,9421
	5	5,1570	10,8422	18,9726	21,0375
5x5	2	4,3992	16,7300	8,1659	13,1990
	3	7,0905	14,8945	15,5367	19,7278
	4	7,7460	15,9170	18,4073	22,3447
	5	7,5583	14,7251	19,9247	23,5199

em que:  $\gamma$  = parâmetro de forma e  $\beta$  = parâmetro de escala.

## 2.2 Modelos de distribuição de diâmetros por espaçamento

Como indicado no Capítulo I, as distribuições de probabilidade Weibull 2 e 3 parâmetros, Weibull 2 parâmetros com  $\alpha$  fixo no diâmetro mínimo, Weibull 3 parâmetros truncada à direita, hiperbólica 2 e 3 parâmetros, log-logística 2 e 3 parâmetros e logística-generalizada ofereceram resultados satisfatórios para a descrição dos povoamentos. No que diz respeito a correlação linear, as funções com 2 parâmetros e a logística generalizada, se destacaram em relação às demais. Visto que a função Weibull 2 parâmetros é de simples aplicação (BAILEY; DELL, 1973) e que as demais funções estudadas obtiveram resultados semelhantes a esta, optou-se pela utilização da mesma para a construção dos sistemas de projeção.

Assim, procedeu-se os ajustes dos modelos para recuperação dos parâmetros de forma ( $\gamma$ ) e escala ( $\beta$ ) da função Weibull 2 parâmetros para os espaçamentos 3x2, 3x3, 3x4, 4x4 e 5x5 m. A obtenção dos sistemas para projeção da distribuição de diâmetros foi realizada a partir da recuperação dos parâmetros das *fdp* utilizando as variáveis dos povoamentos em idades presentes e futuras (NOGUEIRA et al., 2005). Então, foram também projetados o diâmetro máximo ( $D_{máx}$ ) e número de indivíduos por hectare ( $N$ ) de cada um dos espaçamentos.

As equações analisadas para projeção dos parâmetros das *fdps* ( $\gamma$  e  $\beta$ ), em cada espaçamento, estão na Tabela 2 (Equações 1 a 7). Para estimar as variáveis dos povoamentos ( $D_{máx}$  e  $N$ ), foram ajustadas as Equações de 1 a 4.

Tabela 2 - Modelos analisados para recuperação dos parâmetros das funções e projeção dos diâmetros máximo e número de indivíduos por hectare de povoamentos de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*

Modelo	Equação	Nº
1	$Y_2 = Y_1 e^{-\alpha_1(I_2^{\alpha_2} - I_1^{\alpha_2})} + \varepsilon$	(1)
2	$Y_2 = Y_1 \left( \frac{I_1}{I_2} \right) + \alpha_1 \left( 1 - \frac{I_1}{I_2} \right) + \varepsilon$	(2)
3	$Y_2 = Y_1 + e^{(\alpha_1 - \alpha_2 I_2)} - e^{(\alpha_1 - \alpha_2 I_1)} + \varepsilon$	(3)
4	$Y_2 = Y_1 e^{\alpha_1(I_2 - I_1) + \alpha_2 \ln \left( \frac{I_2}{I_1} \right)} + \varepsilon$	(4)
5	$Y_2 = Y_1 \left( \frac{I_1}{I_2} \right) + \alpha_1 \left( 1 - \frac{I_1}{I_2} \right) Dmax_2 + \varepsilon$	(5)
6	$Y_2 = Y_1 \left( \frac{I_1}{I_2} \right) + \alpha_1 \left( 1 - \frac{I_1}{I_2} \right) Ass_1 + \varepsilon$	(6)
7	$Y_2 = Y_1 \left( \frac{I_1}{I_2} \right) + \alpha_1 \left( 1 - \frac{I_1}{I_2} \right) G_1 + \varepsilon$	(7)

em que:  $I_1$  = idade atual (anos);  $I_2$  = idade futura (anos);  $Y_1$  = variável dependente em  $I_1$ ;  $Y_2$  = variável dependente em  $I_2$ ;  $Dmax_2$  = diâmetro (cm) a 1,3m do solo (*DAP*) máximo em  $I_2$ ;  $Ass_1$  = assimetria do povoamento em  $I_1$ ;  $G_1$  = área basal ( $m^2$ ) em  $I_1$ ;  $e$  = base do logaritmo neperiano;  $Ln$  = logaritmo neperiano;  $\varepsilon$  = erro associado e  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$  = coeficientes da equação.

### 2.3 Modelos de distribuição de diâmetros com inclusão da variável área útil

Para avaliar se é possível obter um único sistema de projeção da distribuição de diâmetros para os povoamentos de paricá considerando os diferentes espaçamentos, avaliou-se o acréscimo de uma variável para representar o espaçamento nos modelos analisados (Tabela 2). Desse modo, associou-se cada espaçamento à área útil por planta ( $A$ ) (Tabela 3), ou seja, para o espaçamento 3x2 m utilizou-se o valor 6  $m^2$ , para 3x3 m o valor 9  $m^2$ , 4x3 m o valor 12  $m^2$ , 4x4 m o valor 16  $m^2$  e 5x5 m o valor 25  $m^2$ . Para a obtenção dos novos modelos, foi considerada consistência do sistema, garantindo que ao igualar as idades  $I_1$  e  $I_2$  os parâmetros nas idades futuras sejam iguais aos parâmetros na idade atual (CAMPOS; LEITE, 2017).

Assim, sete equações (Equações 8 a 14) foram ajustadas para recuperação dos parâmetros das funções e para as variáveis dos povoamentos ( $D_{\text{máx}}$  e  $N$ ) ajustou-se somente as equações 8 a 11.

Tabela 3 – Modelos de regressão analisados para recuperação dos parâmetros das funções e projeção dos diâmetros máximo e número de indivíduos por hectare de povoamentos de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*, com acréscimo da área útil

Modelo	Equação	Nº
8	$Y_2 = Y_1 e^{-\alpha_1 (I_2^{\alpha_2} - I_1^{\alpha_2}) A} + \varepsilon$	(8)
9	$Y_2 = Y_1 \left( \frac{I_1}{I_2} \right) + \alpha_1 \left( 1 - \frac{I_1}{I_2} \right) A + \varepsilon$	(9)
10	$Y_2 = Y_1 + e^{(\alpha_1 - \alpha_2 I_2) A} - e^{(\alpha_1 - \alpha_2 I_1) A} + \varepsilon$	(10)
11	$Y_2 = Y_1 e^{\alpha_1 (I_2 - I_1) + \alpha_2 \text{Ln} \left( \frac{I_2}{I_1} \right) A} + \varepsilon$	(11)
12	$Y_2 = Y_1 \left( \frac{I_1}{I_2} \right) + \alpha_1 \left( 1 - \frac{I_1}{I_2} \right) D_{\text{max}_2} A + \varepsilon$	(12)
13	$Y_2 = Y_1 \left( \frac{I_1}{I_2} \right) + \alpha_1 \left( 1 - \frac{I_1}{I_2} \right) A_{\text{ass}_1} A + \varepsilon$	(13)
14	$Y_2 = Y_1 \left( \frac{I_1}{I_2} \right) + \alpha_1 \left( 1 - \frac{I_1}{I_2} \right) G_1 A + \varepsilon$	(14)

em que:  $I_1$  = idade atual (anos);  $I_2$  = idade futura (anos);  $Y_1$  = variável dependente em  $I_1$ ;  $Y_2$  = variável dependente em  $I_2$ ;  $D_{\text{max}_2}$  = diâmetro (cm) a 1,3m do solo ( $DAP$ ) máximo em  $I_2$ ;  $A_{\text{ass}_1}$  = assimetria do povoamento em  $I_1$ ;  $G_1$  = área basal ( $\text{m}^2$ ) em  $I_1$ ;  $A$  = área útil por planta;  $e$  = base do logaritmo neperiano;  $\text{Ln}$  = logaritmo neperiano;  $\varepsilon$  = erro associado e  $\alpha_0, \alpha_1, \alpha_2$  = coeficientes da equação.

## 2.4 Avaliação dos modelos de distribuição

Para avaliar a exatidão das estimativas obtidas pelas equações que compõem o sistema de projeção de distribuição de diâmetros, com ou sem a variável área útil, foram utilizados o coeficiente de determinação ajustado ( $\bar{R}^2$ ), viés ( $V$ ) e raiz do quadrado médio do erro ( $RQME$ ) (Equações 15 a 17).

a) Coeficiente de determinação ajustado ( $\bar{R}^2$ )

$$\bar{R}^2 = 1 - \frac{(n-1)}{(n-p)} \left( 1 - \left( 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y}_i)^2} \right) \right) \quad (15)$$

b) Viés (V)

$$V(\%) = \frac{\left( \frac{\sum_{i=1}^n Y_i - \sum_{i=1}^n \hat{Y}_i}{n} \right)}{\bar{Y}} 100 \quad (16)$$

c) Raiz do Quadrado Médio do Erro (RQME)

$$RQME(\%) = \frac{100}{\bar{Y}} \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n}} \quad (17)$$

em que:  $Y_i$  = variável dependente observada;  $\hat{Y}_i$  = variável dependente estimada;  $\bar{Y}$  = média da variável dependente observada;  $n$  = número de observações e  $p$  = número de parâmetros da equação.

Também foi realizada a análise gráfica dos resíduos. Para cálculo dos resíduos foi utilizada a Equação 18.

$$E(\%) = \left( \frac{Y_i - \hat{Y}_i}{Y_i} \right) 100 \quad (18)$$

em que:  $E(\%)$  = resíduo (%).

Após a escolha das equações para compor o sistema de projeção dos diâmetros, em cada um dos espaçamentos ou com a inserção da variável área útil, aplicou-se o teste de aderência Kolmogorov-Smirnov a 5% de significância para avaliar a aderência das estimativas. Também foram realizadas análises gráficas entre valores observados e projetados pelo sistema, que foram construídos para todos os espaçamentos, parcelas e idades, a fim de representar a probabilidade de indivíduos, observados e estimados distribuídos em cada classe de diâmetro. A projeção da probabilidade foi realizada para as idades futuras a partir da idade inicial, ou seja, foram projetadas as distribuições para as idades três, quatro e cinco anos a partir do observado na idade de dois anos.



### 3 RESULTADOS E DISCUSSÃO

#### 3.1 Modelos de distribuição de diâmetros por espaçamento

Foram ajustados sete modelos de regressão para recuperação de duas variáveis dependentes ( $\gamma$  e  $\beta$ ) e quatro modelos para outras duas variáveis ( $D_{m\acute{a}x}$  e  $N$ ), em cinco espaçamentos, totalizando 110 ajustes (Apêndice A a E). Os resultados dos melhores ajustes compõem os sistemas de equações por espaçamento. Os sistemas de equações com os respectivos valores de  $\bar{R}^2$  (%),  $RQME$  (%) e  $V\acute{i}e$ s (%), estão apresentados na Tabela 4. Os resultados das equações para projeção do diâmetro máximo não estão apresentados neste momento, visto que as equações escolhidas para recuperação dos parâmetros das funções não utilizam o  $D_{m\acute{a}x}$  como variável independente.

Tabela 4 – Modelos de distribuições de diâmetros obtidos para os espaçamentos analisados para povoamentos de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*

(Continua)

Equação	$\bar{R}^2$ (%)	$RQME$ (%)	$V$ (%)
3x2 m			
$N_2 = N_1 e^{-0,2253(I_2 - I_1) + 0,5704 \ln\left(\frac{I_2}{I_1}\right)}$	64,54	5,61	0,04
$\gamma_2 = \gamma_1 \left(\frac{I_1}{I_2}\right) + 3,3291 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) G_1$	55,80	13,20	0,77
$\beta_2 = \beta_1 e^{-4,2(I_2^{-3,5} - I_1^{-3,5})}$	83,59	3,95	0,27
3x3 m			
$N_2 = N_1 e^{-0,1197(I_2 - I_1) + 0,3619 \ln\left(\frac{I_2}{I_1}\right)}$	65,92	6,66	0,55
$\gamma_2 = \gamma_1 \left(\frac{I_1}{I_2}\right) + 5,5353 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right)$	13,44	18,98	-0,86
$\beta_2 = \beta_1 \left(\frac{I_1}{I_2}\right) + 21,8537 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right)$	76,54	4,83	-0,83

Tabela 3 – Modelos de distribuições de diâmetros obtidos para os espaçamentos analisados para povoamentos de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*

(Conclusão)

Equação	$\bar{R}^2$ (%)	RQME(%)	V(%)
3x4 m			
$N_2 = N_1 e^{-0,1515(I_2-I_1)+0,4159Ln\left(\frac{I_2}{I_1}\right)}$	57,25	5,14	0,17
$\gamma_2 = \gamma_1 \left(\frac{I_1}{I_2}\right) + 6,3143 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right)$	58,30	15,59	-0,87
$\beta_2 = \beta_1 \left(\frac{I_1}{I_2}\right) + 23,6133 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right)$	83,83	4,03	-0,64
4x4 m			
$N_2 = N_1 \left(\frac{I_1}{I_2}\right) + 558,90 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right)$	86,91	3,23	-0,25
$\gamma_2 = \gamma_1 \left(\frac{I_1}{I_2}\right) + 6,6906 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right)$	62,52	14,55	-1,00
$\beta_2 = \beta_1 \left(\frac{I_1}{I_2}\right) + 26,0520 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right)$	90,27	3,28	-0,51
5x5 m			
$N_2 = N_1 \left(\frac{I_1}{I_2}\right) + 360,27 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right)$	1,20	13,15	-0,13
$\gamma_2 = \gamma_1 \left(\frac{I_1}{I_2}\right) + 9,3360 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right)$	3,05	27,78	-1,38
$\beta_2 = \beta_1 \left(\frac{I_1}{I_2}\right) + 29,6311 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right)$	76,84	5,26	-0,39

em que:  $I_1$  = idade atual (anos);  $I_2$  = idade futura (anos);  $G_1$  = área basal ( $m^2$ ) em  $I_1$ ;  $N_1$  = número de indivíduos por hectare em  $I_1$ ;  $N_2$  = número de indivíduos por hectare em  $I_2$ ;  $\gamma_1$  = parâmetro de forma em  $I_1$ ;  $\gamma_2$  = parâmetro de forma em  $I_2$ ;  $\beta_1$  = parâmetro de escala em  $I_1$ ;  $\beta_2$  = parâmetro de escala em  $I_2$ ;  $e$  = base do logaritmo neperiano;  $\bar{R}^2$  = coeficiente de determinação ajustado; RQME = raiz quadrada média do erro e V = viés.

Visto que a equação para estimar  $\gamma_2$ , no espaçamento 3x2 tem como variável independente  $G_1$ , fez-se necessário a estimação desta variável para as idades 3 e 4 anos. Observa-se que  $G_2$  com  $I_1$  igual a 2 anos e  $I_2$  igual a 3 anos, corresponde a  $G_1$  com  $I_1$  igual a 3 anos e  $I_2$  igual a 4 anos, assim sucessivamente. Equações para estimação de área basal são populares na literatura, cabendo ao usuário a escolha

daquela que melhor se ajustar aos dados. Desse modo, foram ajustados os modelos representados pelas equações de 1 a 4, a fim de obter a mais adequada para obtenção da área basal. O melhor resultado está representado na Equação 19, tendo os valores do  $\bar{R}^2$  de 76 %,  $RQME$  de 8,93 % e  $V$  de 1,18 %.

$$G_2 = G_1 e^{-0,8036(I_2 - I_1) + 3,2033 \ln\left(\frac{I_2}{I_1}\right)} \quad (19)$$

em que:  $I_1$  = idade atual (anos);  $I_2$  = idade futura (anos);  $G_1$  = área basal ( $m^2$ ) em  $I_1$  e  $G_2$  = área basal ( $m^2$ ) em  $I_2$ .

Todos os coeficientes das equações selecionadas foram significativos ( $p < 0,05$ ), indicando que a variação das variáveis independentes influenciam no comportamento da variável dependente (FÁVERO et al., 2009). De modo geral, foi possível observar que para a recuperação do parâmetro de escala ( $\beta$ ) foram obtidos maiores valores de  $\bar{R}^2$  e menores valores de  $RQME(\%)$  e  $V(\%)$ , obtendo estimativas com maior exatidão em relação ao parâmetro de forma. Isto indica que para o parâmetro forma houve menor exatidão na estimação, principalmente para os espaçamentos 3x3m e 5x5m. A análise gráfica dos resíduos estão apresentadas nas Figuras 1 a 5.

Analisando as equações selecionadas, notou-se que, de forma geral, o modelo 2 foi o que melhor estimou as variáveis  $\beta$  e  $\gamma$ , e o modelo 4 se destacou na estimação das variáveis  $N$  e  $G$ . Resultados semelhantes foram obtidos por Binoti et al. (2014) e Binoti, Binoti e Leite (2015b), em que o modelo 2 foi o que melhor estimou o parâmetro  $\beta$ . No entanto, para a modelagem da sobrevivência em plantios de *Eucalyptus grandis*, o modelo 4 não se mostrou eficiente (RETSALFF et al. 2012).

A variável diâmetro é bastante correlacionada com os parâmetros das *fdp*. Leite (1990) concluiu que para estudos de projeção de parâmetros da função Weibul em povoamentos de *Eucalyptus saligna*, os diâmetros máximo e médio foram suficientes como variáveis independentes para os modelos testados. Em contrapartida, no presente estudo observou-se que a área basal ( $G$ ) foi a única variável do povoamento utilizada como variável independente na estimação do parâmetro de forma, e apenas para o espaçamento 3x2. Isso demonstra que para os dados utilizados neste estudo, as variáveis dos povoamentos de paricá não demonstraram bons resultados para recuperar os parâmetros das funções.

Figura 1 – Gráficos dos resíduos obtidas para projeção da distribuição de diâmetros para os parâmetros das funções e número de indivíduos por hectare, no espaçamento 3x2m, em um povoamento de paricá.

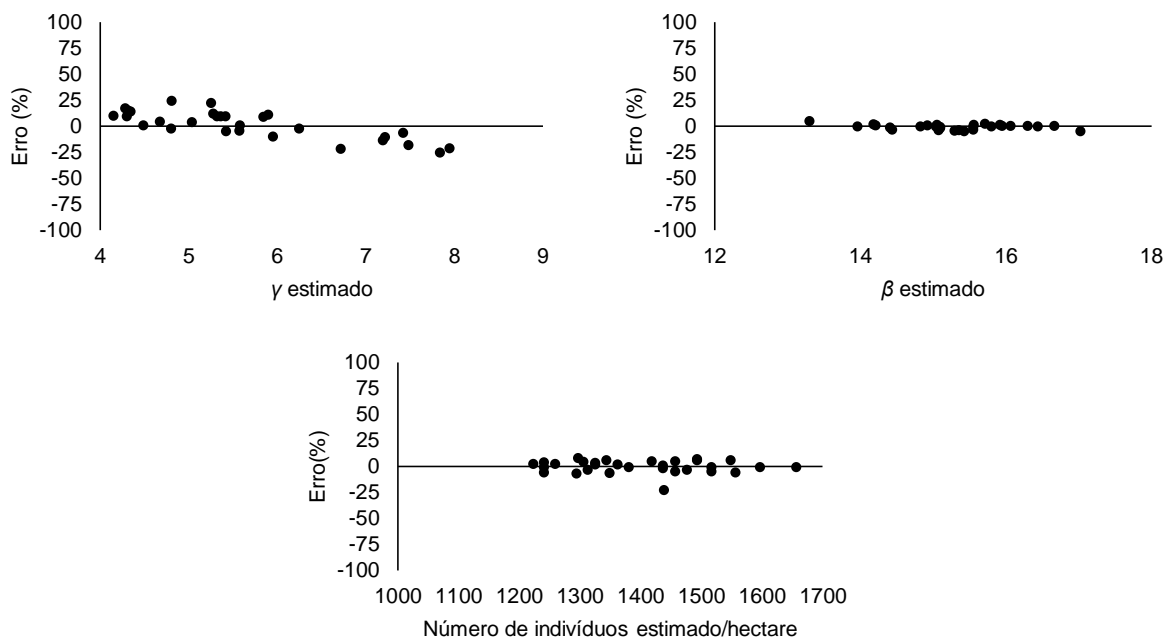


Figura 2 – Gráficos dos resíduos para as equações de regressão obtidas das projeções da distribuição de diâmetros para os parâmetros das funções e número de indivíduos por hectare, no espaçamento 3x3, em povoamentos de paricá.

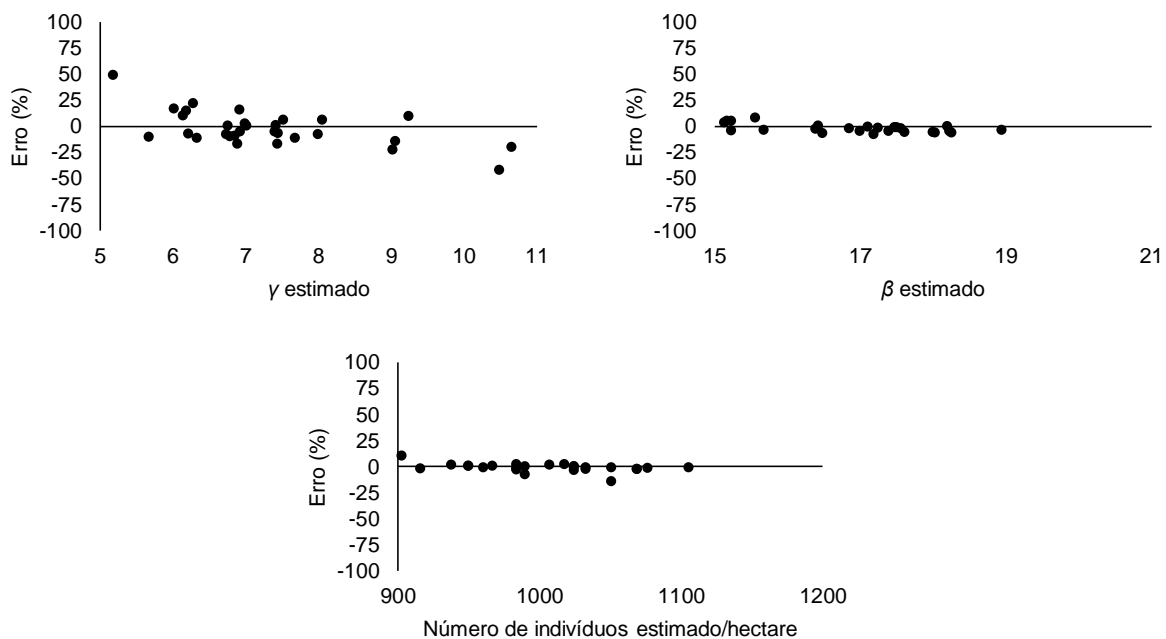


Figura 3 – Gráficos dos resíduos para as equações de regressão obtidas das projeções da distribuição de diâmetros para os parâmetros das funções e número de indivíduos por hectare, no espaçamento 3x4, em povoamentos de paricá.

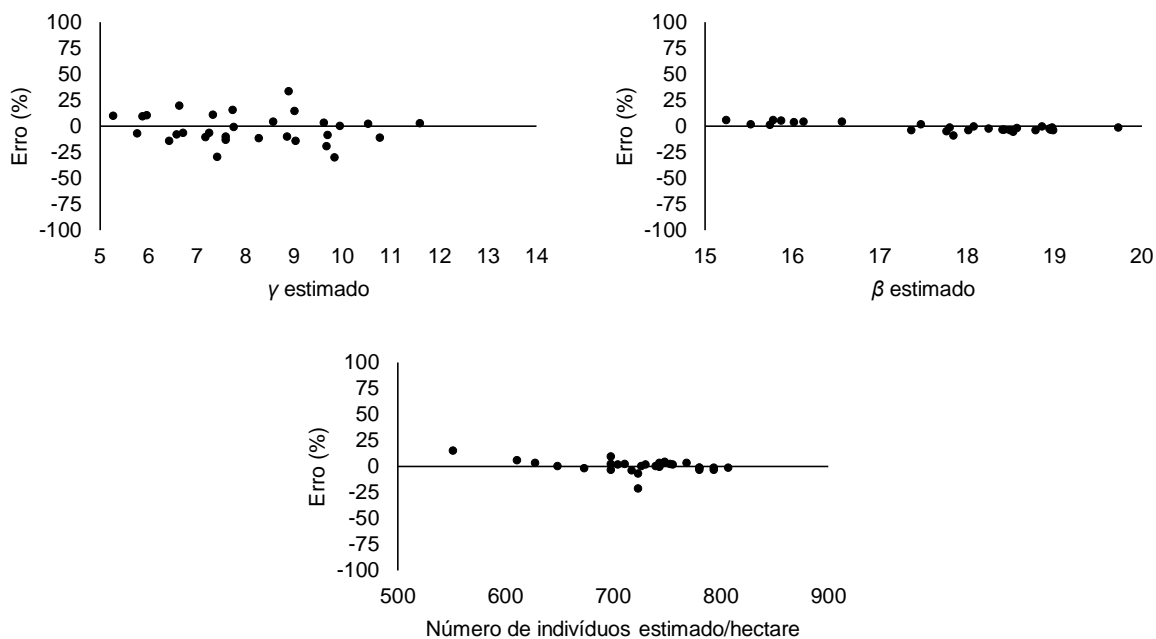


Figura 4 – Gráficos dos resíduos para as equações de regressão obtidas das projeções da distribuição de diâmetros para os parâmetros das funções e número de indivíduos por hectare, no espaçamento 4x4, em povoamentos de paricá.

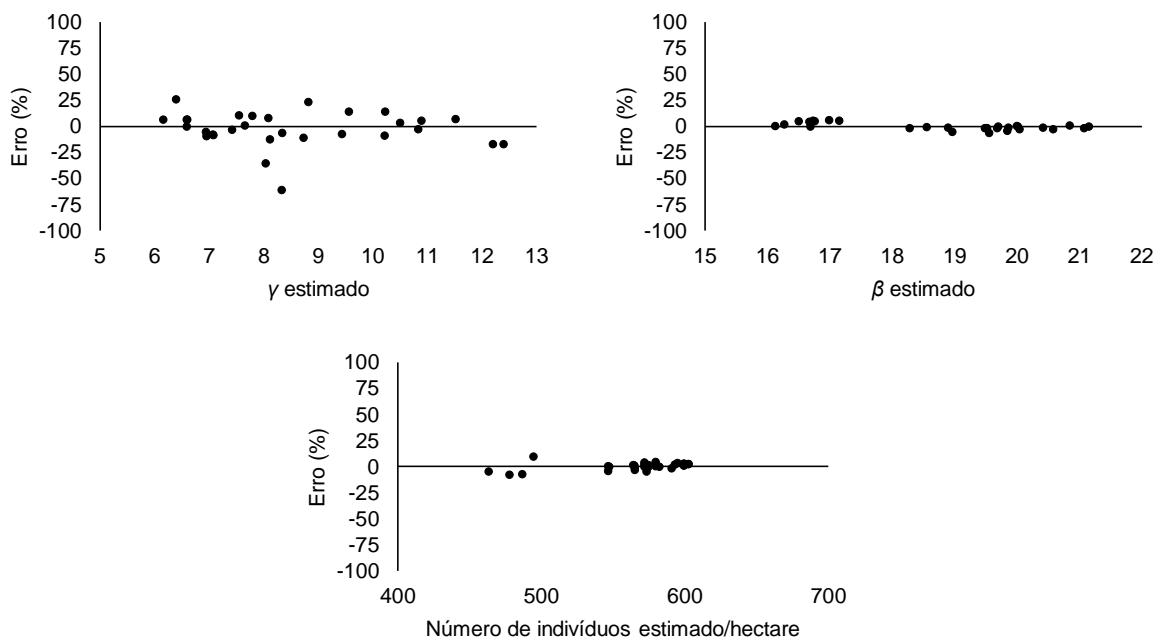
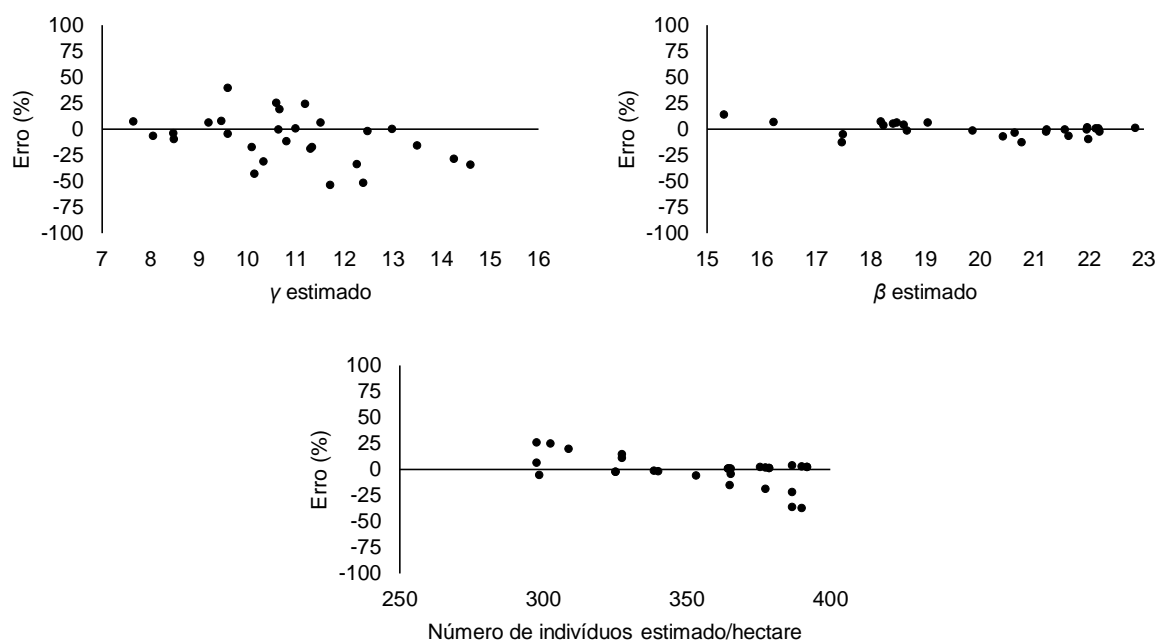


Figura 5 – Gráficos dos resíduos para as equações de regressão obtidas das projeções da distribuição de diâmetros para os parâmetros das funções e número de indivíduos por hectare, no espaçamento 5x5, em povoamentos de paricá.



Assim como observado nas estatísticas de exatidão (Tabela 4), os gráficos de resíduos indicam que não houveram bons ajustes no que diz respeito à recuperação do parâmetro  $\gamma$  em todos os espaçamentos, notando-se uma maior dispersão dos resíduos. Este comportamento é visto com maior evidência nos espaçamentos 3x3 e 5x5. Para o espaçamento 5x5 m, pode-se observar também, que para a modelagem da sobrevivência ( $M$ ), o modelo escolhido apresenta comportamento de subestimação dos menores e superestimação dos maiores valores de número de indivíduos. Neste espaçamento, ainda notou-se uma pequena variação de indivíduos dentro das parcelas no decorrer dos anos, não havendo mortalidade em três das dez parcelas mensuradas, o que indica que a idade não influenciou na sobrevivência dos indivíduos e conseqüentemente não houve boas estimativas pelos modelos.

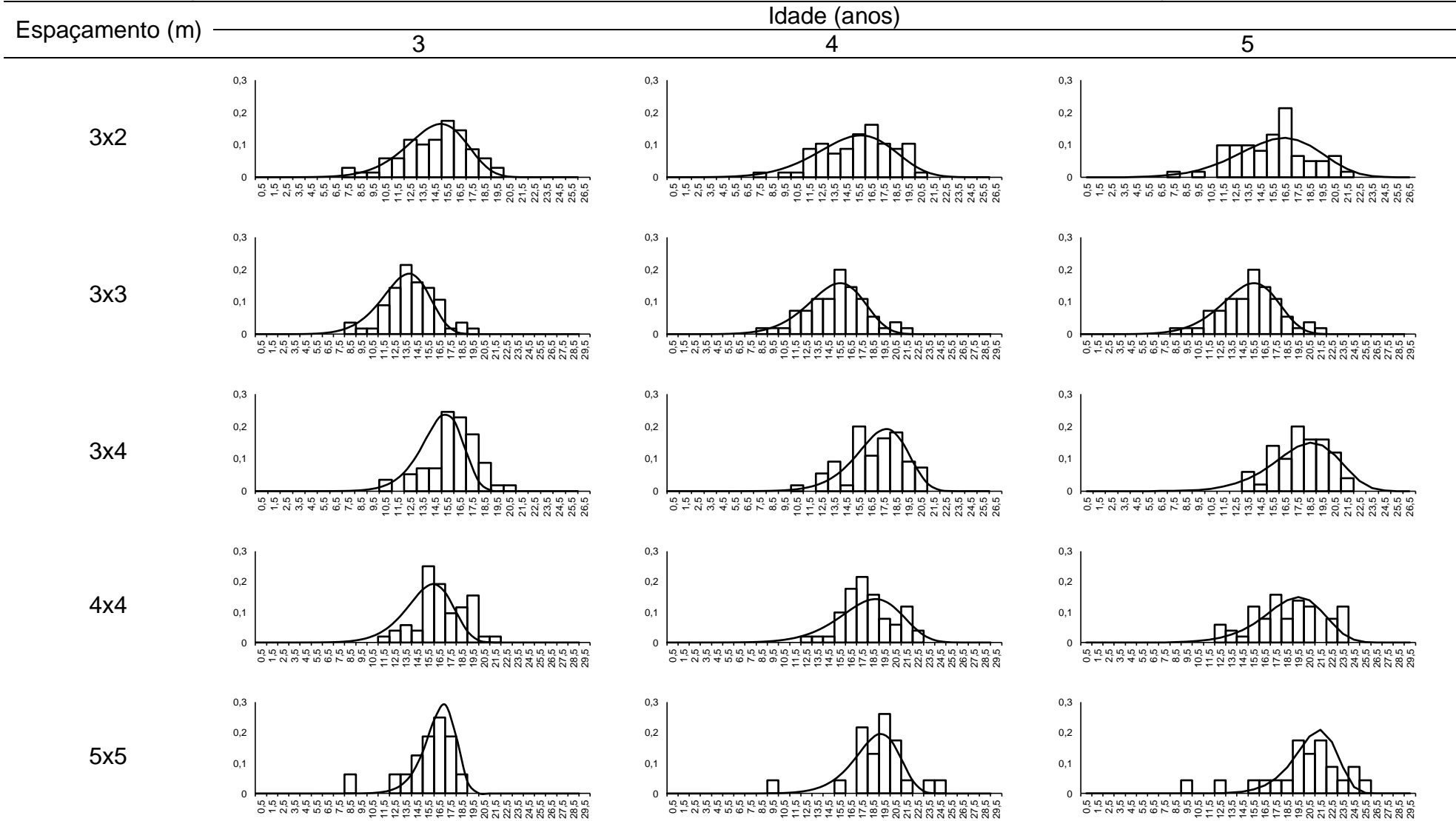
A recuperação dos parâmetros da função Weibull, assim como a projeção das variáveis dos povoamentos, possivelmente, foram prejudicados devido ao pouco número de parcelas medidas em cada um dos espaçamentos. Para o espaçamento 5x5, ainda é possível notar a presença de poucos indivíduos (média de 20 árvores) por parcela, o que talvez tenha dificultado o modelo em obter uma relação entre as variáveis independentes e dependentes, apresentando assim, baixa exatidão.

Estudos de crescimento e produção em florestas plantadas indicam resultados com maior exatidão que os encontrados no presente estudo (BINOTI et al., 2010; BINOTI et al., 2014; CASTRO et al, 2016; LEITE et al., 2013; NOGUEIRA et al., 2005; RETSALFF et al., 2012). Diferentemente do que se ocorre em espécies de *Eucalyptus*, os plantios do paricá são heterogêneos (CARVALHO, 2007), devido a produção com conhecimento limitado e pouca tecnologia envolvida na produção (SILVA et al., 2013). O presente estudo teve como base, dados provenientes de plantio seminal, em que há maior heterogeneidade da plantação. Essa heterogeneidade entre os indivíduos de um mesmo povoamento, talvez tenha implicado em resultados pouco satisfatórios para a modelagem da distribuição de diâmetros.

Ao avaliar a eficiência das equações em projetar a frequência de indivíduos por classe de diâmetro, pode-se observar que, em geral, houve uma leve tendência em subestimar as frequências das classes com maior número de indivíduos, em todos os espaçamentos (Figura 6). Contudo, essa subestimação não acarretou em prejuízos à aderência. De acordo com os resultados do teste Kolmogorov-Smirnov, os valores estimados foram estatisticamente iguais aos valores observados ( $p < 0,05$ ), obtendo-se aderência de 93,3, 86,6, 80, 76,7 e 73,3% para os espaçamentos 3x2, 4x4, 3x3, 3x4 e 5x5 m, respectivamente.

O percentual de aderência aos dados após a projeção, seguiu uma tendência de redução de acordo a diminuição do número de indivíduos nos espaçamentos. Ou seja, o número de indivíduos presentes em cada parcelas dos espaçamentos pode ter contribuído com os resultados encontrados neste estudo.

Figura 6 – Distribuição das probabilidades observadas (barras) e projetadas (linhas), para as idades 3, 4 e 5 anos, após a recuperação dos parâmetros da função Weibull para povoamentos de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*, nos cinco espaçamentos estudados





Azevedo et al. (2016), estudando a modelagem do crescimento e produção para plantios de eucaliptos, encontraram percentual de aderência às parcelas de 86% antes da projeção, considerando esse valor como bom e suficiente para prosseguir com a recuperação dos parâmetros. Visto que, os dados utilizados por Azevedo et al. (2016) foram provenientes de plantios clonais de uma espécie com vasto conhecimento, e que os dados de paricá utilizados no presente estudo são de origem seminal e ainda há pouco conhecimento para a produção da espécie, os valores percentuais de aderência encontrados aqui foram considerados satisfatórios para os modelos de distribuição de diâmetros.

Entretanto, é importante destacar que neste estudo foi realizada a projeção das probabilidades de frequência dos indivíduos dentro de cada classe de diâmetro, ou seja, não se utilizou os valores de  $N$  estimados pelas equações para a análise de aderência. Desse modo, apesar das probabilidades estimadas se assemelharem as probabilidades observadas, no espaçamento 5x5 m, a equação para a projeção de  $N$  apresentou tendência em toda amplitude, indicando não ser exato para estimar o número de indivíduos total deste espaçamento, o que prejudica o uso do sistema para projeção da distribuição de diâmetros neste espaçamento.

### **3.2 Modelos de distribuição de diâmetros com inclusão da variável área útil**

Após o ajuste por espaçamento, realizou-se o ajuste das equações, considerando o conjunto de dados medidos dos cinco espaçamentos, incluindo aos modelos analisados, a variável área útil por planta (Apêndice F). Dentre as equações ajustadas, escolheu-se àquelas que apresentaram melhores resultados (Tabela 5). O novo sistema obteve parâmetros significativos à 5% de significância. Contudo, apesar de ter ocorrido um aumento no coeficiente de determinação ajustado para as três variáveis dependentes, as equações apresentaram valor de  $RQME$  superior aos encontrados quando ajustados por espaçamento, para as variáveis  $N$  e  $\beta$ , em quatro dos espaçamentos estudados. No que diz respeito à projeção, ao realizar a recuperação dos parâmetros e projetar a distribuição dos diâmetros, observou-se que houve baixa aderência aos dados observados em campo (47,3% das parcelas). Assim, foi possível inferir que o acréscimo da variável área útil não proporcionou melhoria nas estimativas e não foi capaz de projetar com exatidão as probabilidades de indivíduos em cada classe de diâmetro.

Tabela 5 - Modelo de distribuição de diâmetros, considerando os dados dos cinco espaçamentos, conjuntamente, para povoamentos de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum*

Equação	$\bar{R}^2$ (%)	RQME(%)	V(%)
$N_2 = N_1 e^{-0,0745(I_2 - I_1) - 0,0157 L \ln\left(\frac{I_2}{I_1}\right)} A$	97,16	7,73	-0,03
$\gamma_2 = \gamma_1 \left(\frac{I_1}{I_2}\right) + 0,4221 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) A$	55,09	21,94	0,55
$\beta_2 = \beta_1 e^{-0,2(I_2^{-2,7} - I_1^{-2,7})} A$	84,79	7,53	2,45

em que:  $I_1$  = idade atual (anos);  $I_2$  = idade futura (anos);  $A$  = área útil por espaçamento em  $m^2$ ;  $N_1$  = número de indivíduos por hectare em  $I_1$ ;  $N_2$  = número de indivíduos por hectare em  $I_2$ ;  $\gamma_1$  = parâmetro de forma em  $I_1$ ;  $\gamma_2$  = parâmetro de forma em  $I_2$ ;  $\beta_1$  = parâmetro de escala em  $I_1$ ;  $\beta_2$  = parâmetro de escala em  $I_2$ ;  $e$  = base do logaritmo neperiano;  $\bar{R}^2$  = coeficiente de determinação ajustado; RQME = raiz quadrada média do erro e  $V$  = viés.

A obtenção de resultados não satisfatórios no ajuste dos modelos com a união dos dados dos cinco espaçamentos, deve-se possivelmente, ao fato de que a junção acarretou em maior variabilidade dos dados, corroborando com o discutido anteriormente.

As informações à respeito do paricá, por ser uma espécie com pouco conhecimento e ainda produzido sem muita tecnologia, são fundamentais para o desenvolvimento de técnicas apropriadas para melhoria do processo de produção da espécie (SILVA et al., 2013). Assim, os resultados obtidos acerca do comportamento e crescimento do paricá, são relevantes para auxiliar os produtores da espécie na tomada de decisões e no planejamento da produção.

## 4 CONCLUSÃO

Os sistemas de equações selecionados foram capazes de projetar a distribuição de diâmetros dos espaçamentos estudados, com exceção para o maior espaçamento (5x5m).

A estimação do parâmetro  $\gamma$  foi menos exato que a estimação do parâmetro  $\beta$  para todos os espaçamentos estudados. Os modelos 2 e 4 foram o que mais se destacaram para estimação das variáveis  $\gamma$ ,  $\beta$  e  $N$ .

Os modelos selecionados, de modo geral, relaciona os parâmetros apenas com as idades atual e futura, exceto para a estimação do  $\gamma$  no espaçamento 3x2, em que, a variável  $G$  foi a única variável do povoamento que influenciou na recuperação dos parâmetros.

A inclusão da variável área útil não proporcionou melhoria das estimativas, não sendo capaz de projetar com exatidão as probabilidades de indivíduos em cada classe de diâmetro.

## REFERÊNCIAS

- AZEVEDO, G. B. et al. Modelagem da produção em nível de povoamento e por distribuição diamétrica em plantios de eucalipto. **Scientia Forestalis**, Piracicaba, v. 44, n. 110, p. 383-392, 2016.
- BAILEY, T. R. L.; DELL, R. Quantifying diameter distributions with the Weibull function. **Forest Science**, v. 19, n. 2, p. 97-104, 1973.
- BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M. S.; LEITE, H. G. Análise da função Log-logística para modelagem da distribuição de diâmetros. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 39, n. 5, p. 943 – 951, 2015b.
- BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M. S.; LEITE, H. G. Modelagem da distribuição diamétrica de povoamentos equiâneos de eucalipto utilizando a função Logística generalizada. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 39, n. 4, p. 707-711, 2015a.
- BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M. S.; LEITE, H. G. Projeção de distribuição diamétrica de povoamentos equiâneos utilizando a função Nakagami e Weibull. **Ciência da Madeira**, Pelotas, v. 5, n. 2, p. 103-110, 2014.
- BINOTI, D. H. B. et al. Modelos de distribuição diamétrica para povoamentos desbastados de eucalipto utilizando a função hiperbólica. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 35, n. 5, p. 1069-1076, 2011.
- BINOTI, D. H. B. et al. Uso da função Weibull de três parâmetros em um modelo de distribuição diamétrica para plantios de eucalipto submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 34, n. 1, p. 147-156, 2010.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração Florestal**: perguntas e respostas. 5. ed., Viçosa, MG: UFV, 2017. 636 p.
- CARVALHO, P. E. R. **Paricá (*Schizolobium amazonicum*)**. Colombo: Embrapa Florestas, 2007. 8p. (Embrapa Florestas. Circular Técnica, 142).
- CASTRO, R. V. O. et al. Modelagem do crescimento e da produção de povoamentos de *Eucalyptus* em nível de distribuição diamétrica utilizando índice de local. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v.40, n.1, p.107-116, 2016.
- DIAS, A. N. et al. Emprego de um modelo de crescimento e produção em povoamentos desbastados de eucalipto. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, n. 5, p. 731-739, 2005.
- FÁVERO, L. P. et al. **Análise de dados**: modelagem multivariada para tomada de decisões. Rio de Janeiro: Elsevier, 2009. 646 p.
- FERRAZ FILHO, A. C. et al. Modeling growth and yield of loblolly pine stands under intensive management. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v. 50, n. 8, p. 707-717, 2015.
- INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES (IBÁ). **Relatório IBÁ 2017**. Brasília, 2017. 96 p. Disponível em:

<[http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA\\_RelatorioAnual2017.pdf](http://iba.org/images/shared/Biblioteca/IBA_RelatorioAnual2017.pdf)>. Acesso em: 31 jan. 2018.

GUIMARÃES, D. P. **Desenvolvimento de um modelo de distribuição diamétrica de passo invariante para prognose e projeção da estrutura de povoamentos de eucalipto**. 1994. 178f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1994.

LEITE, H. G. **Ajuste de um modelo de estimação de frequência e produção por classe de diâmetro, para povoamentos de *Eucalyptus saligna* Smith**. 1990. 81f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 1990.

LEITE, H. G. et al. Comparação entre predição e projeção da distribuição de diâmetros de eucalipto submetidos a desbastes. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 37, n. 2, p. 321-328, 2013.

NOGUEIRA, G. S. et al. Modelo de distribuição diamétrica para povoamentos de *Eucalyptus* sp. submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 29, n. 4, p. 579-589, 2005.

RETSALFF, F. A. S. Prognose do crescimento e da produção em classes de diâmetro para povoamentos desbastados de *Eucalyptus grandis* no sul do Brasil. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 36, n. 4, p. 719-732, 2012.

RONDON, E. V. Produção de biomassa e crescimento de árvores de *Schizolobium amazonicum* (Huber) Ducke sob diferentes espaçamentos na região da mata. **Revista Árvore**, Viçosa, MG, v. 26, n. 5, p. 573-576, 2002.

SANTOS, E. M. **Crescimento e produção de plantios de paricá (*Schizolobium amazonicum* Huber ex Ducke) sob diferentes espaçamentos**. 2012. 74 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, 2012.

SCHNEIDER, P. R. et al. Estimativa dos parâmetros da função de densidade probabilística de Weibull por regressão aninhada em povoamentos desbastados de *Pinus taeda* L. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v. 18, n. 3, p. 375-385, 2008.

SILVA, G. F. et al. Modeling growth and yield of *Schizolobium amazonicum* under different spacings. **International Journal of Forestry Research**, Nova York, v. 2013, p. 1-10, 2013.

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

## 4 CONCLUSÕES GERAIS

As funções densidade de probabilidade Weibull 2 e 3 parâmetros, Weibull 2 parâmetros com  $\alpha$  fixo no *DAP* mínimo, Weibull 3 parâmetros truncada, hiperbólica 2 e 3 parâmetros, log-logística 2 e 3 parâmetros e logística-generalizada, demonstraram desempenho satisfatório para descrição dos povoamentos de paricá.

Os sistemas de equações selecionados foram capazes de projetar a distribuição de diâmetros dos espaçamentos estudados, com exceção para o maior espaçamento (5x5m).

A estimação do parâmetro  $\gamma$  foi menos exato que a estimação do parâmetro  $\beta$  para todos os espaçamentos estudados. Os modelos 2 e 4 foram o que mais se destacaram para estimação das variáveis  $\gamma$ ,  $\beta$  e  $N$ .

Os modelos selecionados, de modo geral, relaciona os parâmetros apenas com as idades atual e futura, exceto para a estimação do  $\gamma$  no espaçamento 3x2, em que, a variável  $G$  foi a única variável do povoamento que influenciou na recuperação dos parâmetros.

A inclusão da variável área útil não proporcionou melhoria nas estimativas, não sendo capaz de projetar com exatidão as probabilidades de indivíduos em cada classe de diâmetro.

**APÊNDICE A** – Resultados dos ajustes dos modelos para projeção da distribuição de diâmetros de povoamentos de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* referente ao espaçamento 3x2m

Modelo	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\bar{R}^2$ (%)	RQME(%)	V(%)
<i>Dm<sub>áx</sub></i>					
1	2,3000*	-2,3000*	52,36	6,69	0,57
2	1,5524*	-	59,04	9,98	0,07
3	2,8000 <sup>ns</sup>	0,1000 <sup>ns</sup>	56,71	10,73	0,44
4	-0,26650*	1,3196 <sup>ns</sup>	49,24	7,19	0,39
<i>N</i>					
1	0,1000 <sup>ns</sup>	0,7000 <sup>ns</sup>	38,82	7,35	-0,06
2	10,8571*	-	36,10	7,74	-1,12
3	3,8000 <sup>ns</sup>	0,1000 <sup>ns</sup>	42,27	8,61	-4,83
4	-0,2253*	10,5704*	64,54	5,61	0,04
$\gamma$					
1	4,8000 <sup>ns</sup>	-3,200*	51,81	11,88	1,58
2	2,6664*	-	53,69	14,09	1,75
3	4,2000*	1,5000*	48,04	16,90	1,01
4	0,4716*	1,5000*	51,20	12,12	1,50
5	0,0686*	-	54,40	15,36	7,82
6	-0,6879*	-	56,01	18,92	4,54
7	3,3291*	-	55,80	13,20	0,77
$\beta$					
1	4,2000*	-3,5000*	83,59	3,95	0,27
2	19,5656*	-	77,30	4,24	-0,74
3	2,3000 <sup>ns</sup>	0,1000 <sup>ns</sup>	64,63	10,66	2,89
4	-0,3343*	1,4796*	78,59	4,68	0,34
5	0,1573*	-	58,08	29,63	27,86
6	-21,9680*	-	8,15	81,66	70,33
7	20,9320*	-	68,97	14,14	1,79

em que: *Dm<sub>áx</sub>* = diâmetro máximo; *N* = número de indivíduos por hectare;  $\gamma$  e  $\beta$  = parâmetros das funções; ns = valor não significativo à 5%; \* = valor significativo;  $\bar{R}^2$  = coeficiente de determinação ajustado; RQME = raiz quadrada média do erro e V = viés.

**APÊNDICE B** – Resultados dos ajustes dos modelos para projeção da distribuição de diâmetros de povoamentos de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* referente ao espaçamento 3x3m

Modelo	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\bar{R}^2$ (%)	RQME(%)	V(%)
<i>Dmáx</i>					
1	2,1000*	-1,8000*	53,38	6,90	0,43
2	1,6551*	-	61,07	9,75	0,10
3	3,000 <sup>ns</sup>	0,1000 <sup>ns</sup>	60,96	10,48	0,14
4	-0,2364*	1,2084*	51,01	7,36	0,26
<i>N</i>					
1	0,9000*	-5,0000*	61,24	7,11	-1,28
2	0,9870*	-	58,51	7,24	-0,02
3	2,7000 <sup>ns</sup>	0,1000 <sup>ns</sup>	57,30	7,25	-0,26
4	-0,1197*	0,3619*	65,92	6,66	0,55
$\gamma$					
1	1,7000 <sup>ns</sup>	0,2000 <sup>ns</sup>	8,92	22,29	3,61
2	5,5353*	-	13,44	18,98	-0,86
3	2,3000 <sup>ns</sup>	0,1000 <sup>ns</sup>	11,06	24,67	-0,41
4	-0,0259 <sup>ns</sup>	-0,3464 <sup>ns</sup>	8,91	22,29	3,61
5	0,0889*	-	7,36	23,70	12,70
6	-1,3710 <sup>ns</sup>	-	8,19	27,98	6,02
7	5,7820*	-	2,66	22,88	3,65
$\beta$					
1	3,8000*	-3,1000*	70,69	5,20	0,14
2	21,8537*	-	76,54	4,83	-0,83
3	2,5000 <sup>ns</sup>	0,1000 <sup>ns</sup>	68,00	12,06	2,97
4	-0,3647*	1,6833*	70,70	5,2967	0,38
5	0,1606*	-	64,42	30,96	28,97
6	-12,2800*	-	4,66	80,99	72,73
7	25,9270*	-	72,02	17,30	3,41

em que: *Dmáx* = diâmetro máximo; *N* = número de indivíduos por hectare;  $\gamma$  e  $\beta$  = parâmetros das funções; ns = valor não significativo à 5%; \* = valor significativo;  $\bar{R}^2$  = coeficiente de determinação ajustado; RQME = raiz quadrada média do erro e V = viés.



**APÊNDICE C** – Resultados dos ajustes dos modelos para projeção da distribuição de diâmetros de povoamentos de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* referente ao espaçamento 3x4m

Modelo	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\bar{R}^2$ (%)	RQME(%)	V(%)
<i>Dm</i> <sub>máx</sub>					
1	2,8000*	-2,4000*	62,66	4,62	0,60
2	28,7440*	-	76,85	3,95	-0,32
3	3,0000 <sup>ns</sup>	0,1000 <sup>ns</sup>	75,67	10,57	0,17
4	-0,5220*	1,3242*	54,12	5,66	0,26
<i>N</i>					
1	0,1000 <sup>ns</sup>	0,4000 <sup>ns</sup>	36,28	6,20	-0,28
2	52,9340*	-	1,49	24,50	22,54
3	2,7000 <sup>ns</sup>	0,1000 <sup>ns</sup>	38,67	6,46	-2,10
4	-0,1515*	0,4159*	57,25	5,14	0,17
$\gamma$					
1	0,1000 <sup>ns</sup>	1,0000 <sup>ns</sup>	58,51	16,67	1,02
2	6,3143*	-	58,30	15,60	-0,87
3	2,4000 <sup>ns</sup>	0,1000 <sup>ns</sup>	57,93	17,92	0,30
4	-0,1254 <sup>ns</sup>	-0,0584 <sup>ns</sup>	58,80	16,65	1,74
5	-0,0911*	-	52,00	21,53	13,51
6	-7,1590*	-	51,02	19,95	3,63
7	6,2700*	-	41,27	19,44	2,60
$\beta$					
1	4,1000*	-3,1000*	71,42	3,88	0,36
2	23,6133*	-	83,83	4,03	-0,64
3	2,7000 <sup>ns</sup>	0,0001 <sup>ns</sup>	80,06	16,73	28,22
4	-0,3647*	1,6833*	60,73	5,27	0,32
5	0,1599*	-	79,10	31,57	29,91
6	23,8000*	-	17,93	25,70	16,71
7	25,1760*	-	79,41	16,79	3,21

em que: *Dm*<sub>máx</sub> = diâmetro máximo; *N* = número de indivíduos por hectare;  $\gamma$  e  $\beta$  = parâmetros das funções; ns = valor não significativo à 5%; \* = valor significativo;  $\bar{R}^2$  = coeficiente de determinação ajustado; RQME = raiz quadrada média do erro e V = viés.

**APÊNDICE D** – Resultados dos ajustes dos modelos para projeção da distribuição de diâmetros de povoamentos de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* referente ao espaçamento 4x4m

Modelo	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\bar{R}^2$ (%)	RQME (%)	V (%)
<i>D</i> <sub>máx</sub>					
1	2,8000*	-2,2000*	68,51	4,80	0,39
2	31,0080*	-	80,42	3,96	-0,31
3	3,1000*	0,1000*	79,30	11,10	0,72
4	-0,2463 <sup>ns</sup>	2,3317*	60,28	5,84	0,30
<i>N</i>					
1	0,3000*	-5,0000*	86,01	3,34	-0,86
2	558,9000*	-	86,91	3,23	-0,25
3	3,6000 <sup>ns</sup>	-0,1000 <sup>ns</sup>	84,98	3,33	-0,09
4	-0,0466 <sup>ns</sup>	0,1316 <sup>ns</sup>	86,67	3,14	0,09
$\gamma$					
1	0,3000 <sup>ns</sup>	0,6000 <sup>ns</sup>	59,73	16,83	2,29
2	6,6906*	-	62,56	14,55	-1,00
3	2,4000 <sup>ns</sup>	0,1000 <sup>ns</sup>	59,63	18,54	-0,06
4	-0,0753 <sup>ns</sup>	-0,1144 <sup>ns</sup>	59,94	16,81	2,20
5	0,0893*	-	55,44	20,99	13,60
6	-14,2590*	-	50,14	21,89	4,96
7	6,9040*	-	47,49	18,50	2,49
$\beta$					
1	3,5000*	-2,6000*	85,43	3,10	0,22
2	26,052*	-	90,27	3,28	-0,51
3	2,9000 <sup>ns</sup>	0,1000 <sup>ns</sup>	85,57	11,54	1,67
4	-0,3808*	1,8155*	75,85	4,43	0,24
5	0,1578*	-	84,48	32,70	31,23
6	-18,6000*	-	38,19	26,69	18,72
7	28,2630*	-	85,69	17,87	4,41

em que: *D*<sub>máx</sub> = diâmetro máximo; *N* = número de indivíduos por hectare;  $\gamma$  e  $\beta$  = parâmetros das funções; ns = valor não significativo à 5%; \* = valor significativo;  $\bar{R}^2$  = coeficiente de determinação ajustado; RQME = raiz quadrada média do erro e V = viés.

**APÊNDICE E** – Resultados dos ajustes dos modelos para projeção da distribuição de diâmetros de povoamentos de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* referente ao espaçamento 5x5 m

Modelo	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\bar{R}^2$ (%)	RQME(%)	V(%)
<i>Dm<sub>áx</sub></i>					
1	4,1000*	-2,7000*	8,49	12,05	1,28
2	34,3310*	-	36,55	9,10	-0,49
3	3,3000 <sup>ns</sup>	0,1000 <sup>ns</sup>	38,79	15,96	0,30
4	-0,0523 <sup>ns</sup>	12,4842	9,26	12,90	1,14
<i>N</i>					
1	0,1000 <sup>ns</sup>	0,2000 <sup>ns</sup>	-2,96	15,63	1,23
2	360,2700*	-	1,20	13,15	-0,13
3	2,2000 <sup>ns</sup>	0,1000 <sup>ns</sup>	-2,96	15,66	0,11
4	-0,0089 <sup>ns</sup>	-0,0015 <sup>ns</sup>	-2,96	15,64	1,40
<i><math>\Gamma</math></i>					
1	0,1000 <sup>ns</sup>	1,0000 <sup>ns</sup>	-0,55	31,27	4,57
2	9,3360*	-	3,05	27,78	-1,38
3	2,0000 <sup>ns</sup>	0,1000 <sup>ns</sup>	-0,68	32,83	-0,44
4	-0,1918 <sup>ns</sup>	-0,2725 <sup>ns</sup>	-0,09	31,19	5,38
5	0,0972*	-	1,52	33,26	16,35
6	-4,2200*	-	-5,47	35,12	8,31
7	14,9360*	-	0,20	32,89	6,70
<i>B</i>					
1	3,6000*	-2,4000*	61,57	7,30	0,85
2	29,6311*	-	76,84	5,26	-0,39
3	3,1000 <sup>ns</sup>	0,0001 <sup>ns</sup>	73,98	20,87	34,81
4	-0,4021*	1,9784*	57,05	8,23	0,69
5	0,1552*	-	75,87	34,63	33,04
6	-16,9930*	-	52,72	32,71	25,70
7	59,2840*	-	72,28	21,33	6,51

em que: *Dm<sub>áx</sub>* = diâmetro máximo; *N* = número de indivíduos por hectare;  $\gamma$  e  $\beta$  = parâmetros das funções; ns = valor não significativo à 5%; \* = valor significativo;  $\bar{R}^2$  = coeficiente de determinação ajustado; RQME = raiz quadrada média do erro e V = viés.

**APÊNDICE F** – Resultados dos ajustes dos modelos para projeção da distribuição de diâmetros de povoamentos de *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* para todos os espaçamentos em conjunto.

Modelo	$\alpha_1$	$\alpha_2$	$\bar{R}^2$ (%)	RQME(%)	V(%)
<i>Dm</i> <sub>máx</sub>					
1	0,2000*	-2,7000*	60,13	9,89	3,79
2	1,8459*	-	66,13	14,44	5,26
3	0,3000 <sup>ns</sup>	-0,1000 <sup>ns</sup>	68,60	12,90	2,24
4	0,0251*	0,0267*	66,37	12,54	2,12
<i>N</i>					
1	-0,1000 <sup>ns</sup>	-0,1000 <sup>ns</sup>	96,87	8,82	0,66
2	37,4490*	-	89,91	21,87	7,85
3	1,9000 <sup>ns</sup>	0,1000 <sup>ns</sup>	97,05	8,86	-0,85
4	-0,0745*	0,0157*	97,16	7,73	-0,03
$\gamma$					
1	0,2000 <sup>ns</sup>	0,1000 <sup>ns</sup>	36,79	25,35	0,71
2	0,4221*	-	55,09	21,29	0,55
3	-0,5000*	0,1000*	39,23	28,72	0,55
4	-0,1616*	0,0074 <sup>ns</sup>	46,29	33,87	3,46
5	-0,3738*	-	58,48	25,01	0,56
6	-0,1648*	-	58,10	22,75	0,88
7	-8,5316*	-	59,49	29,05	-4,76
$\beta$					
1	0,1908*	-2,5906*	84,79	7,53	2,45
2	1,5368*	-	87,90	12,18	4,22
3	0,1000 <sup>ns</sup>	-0,1000 <sup>ns</sup>	77,71	12,27	3,17
4	-0,0202 <sup>ns</sup>	0,0345*	83,56	11,47	2,22
5	0,1785 <sup>ns</sup>	-	89,48	12,52	9,50
6	-5,8760*	-	58,29	38,22	24,07
7	5,1064*	-	86,28	12,95	9,53

em que: *Dm*<sub>máx</sub> = diâmetro máximo; *N* = número de indivíduos por hectare;  $\gamma$  e  $\beta$  = parâmetros das funções; ns = valor não significativo à 5%; \* = valor significativo;  $\bar{R}^2$  = coeficiente de determinação ajustado; RQME = raiz quadrada média do erro e V = viés.