



**PROJEÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA EM PLANTIOS
EXPERIMENTAIS DE EUCALIPTO, ACÁCIA E NIM**

LIDIOMAR SOARES DA COSTA

**DOUTORADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**FACULDADE DE TECNOLOGIA
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA**

**UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

**PROJEÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA EM
PLANTIOS EXPERIMENTAIS DE EUCALIPTO, ACÁCIA E
NIM**

LIDIOMAR SOARES DA COSTA

ORIENTADOR: Dr. RENATO VINÍCIUS OLIVEIRA CASTRO

TESE DE DOUTORADO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

**PUBLICAÇÃO:
BRASÍLIA/DF, FEVEREIRO – 2018**

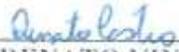
UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA
FACULDADE DE TECNOLOGIA
DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS

“PROJEÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA EM PLANTIOS
EXPERIMENTAIS DE EUCALIPTO, ACÁCIA E NIM”

LIDIOMAR SOARES DA COSTA

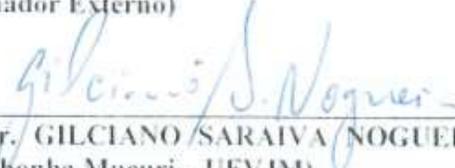
TESE DE DOUTORADO ACADÊMICO SUBMETIDA AO PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO EM CIÊNCIAS FLORESTAIS, DO DEPARTAMENTO DE ENGENHARIA FLORESTAL, DA FACULDADE DE TECNOLOGIA DA UNIVERSIDADE DE BRASÍLIA, COMO PARTE DOS REQUISITOS NECESSÁRIOS PARA A OBTENÇÃO DO GRAU DE DOUTOR

APROVADA POR:


Prof. Dr. RENATO VINÍCIUS OLIVEIRA CASTRO (Universidade Federal de São João del-Rei – UFSJ);
(Orientador)


Prof. Dr. MAURO ELOI NAPPO (Departamento de Engenharia Florestal – EFL/UnB);
(Examinador Interno)


Prof. Dr. CARLOS ALBERTO ARAÚJO JÚNIOR (Universidade Federal de Minas Gerais – UFMG)
(Examinador Externo)


Prof. Dr. GILCIANO SARAIVA NOGUEIRA (Universidade Federal dos Vales do Jequitinhonha Mucuri – UFVJM)
(Examinador Externo)

Prof. Dr. RICARDO DE OLIVEIRA GASPAR (Departamento de Engenharia Florestal – EFL/UnB),
(Examinador Suplente)

Brasília-DF, 22 de fevereiro de 2018.

Ficha catalográfica elaborada automaticamente,
com os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

| | |
|--------|---|
| SC837p | Soares da Costa, Lidiomar Projeção da distribuição diamétrica em plantios experimentais de eucalipto, acácia e nim / Lidiomar Soares da Costa; orientador Renato Vinicius Oliveira Castro; co orientador Rosimeire Cavalcante Santos. -- Brasília, 2018. 74 p. |
| | Tese (Doutorado - Doutorado em Ciências Florestais) -- Universidade de Brasília, 2018. |
| | 1. Manejo e mensuração florestal. 2. Função densidade de probabilidade. 3. Multiprodutos florestais. 4. Desbaste. I. Oliveira Castro, Renato Vinicius, orient. II. Cavalcante Santos, Rosimeire, co-orient. III. Título. |

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

COSTA, L.S. (2018). Projeção da distribuição diamétrica em plantios experimentais de eucalipto, acácia e nim. Tese de Doutorado em Ciências Florestais, Publicação PPG/EFL. TD. 082/2018, Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, Universidade de Brasília, Brasília-DF, 74 p.

CESSÃO DE DIREITOS

AUTOR: Lidiomar Soares da Costa.

TÍTULO: Projeção da distribuição diamétrica em plantios experimentais de eucalipto, acácia e nim.

GRAU: Doutor; ANO: 2018; ÁREA DE CONCENTRAÇÃO: Manejo Florestal.

Concedido à Universidade de Brasília-UnB permissão para reproduzir cópias desta tese de doutorado e para emprestá-las somente para propósitos acadêmicos e científicos. Reservado outros direitos de publicação, de forma que nenhuma parte desta tese de doutorado pode ser reproduzida sem minha autorização por escrito.

Lidiomar Soares da Costa

Endereço eletrônico: Lidiomar.ef@gmail.com

*“Um pouco de ciência nos afasta de Deus.
Muito, nos aproxima.”*

Louis Pasteur

*“O sucesso nasce do querer, da
determinação e persistência em se chegar
a um objetivo. Mesmo não atingindo o
alvo, quem busca e vence obstáculos, no
mínimo fará coisas admiráveis.”*

José de Alencar

À minha grande e
abençoada família.

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

A Deus, por manter firmes e saudáveis, a mim e todos aqueles que contribuíram para a realização deste trabalho.

Ao professor Renato por aceitar o desafio de me orientar, pela paciência, pelos excelentes ensinamentos, conselhos e incentivos.

À minha família pelo apoio, compreensão e incentivos vitais nessa caminhada e que, sem os quais eu não teria motivação para continuar.

À professora Rosimeire Cavalcante e ao professor Gualter Guenther, da UAECIA/UFRN, pelo zelo com cuidaram para que tudo transcorresse bem durante minhas estadas no Rio Grande do Norte, agradeço ainda pela frutífera parceria para os estudos do crescimento dos povoamentos de acácia e nim.

Ao Professor Mauro Eloi Nappo pela disponibilização da sua área de pesquisa para realização de parte desses estudos, pelos ensinamentos, conselhos e sugestões para esta tese.

À Universidade de Brasília pela oportunidade de realização do curso e pela contribuição na minha formação acadêmica;

Aos professores do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais pelos ensinamentos, atenção e disponibilidade.

Aos antigos e atuais funcionários do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, Chiquinho, Pedro, Tiago, Yuri e Patrícia, pela presteza e disponibilidade em auxiliar na resolução de questões burocráticas.

Ao meu amigo Léo Murta, primeiramente pela parceria para encarar o "desafio Brasília" no início de tudo, depois, pelos incentivos, dicas, ensinamentos e pelos muitos momentos de descontração e risadas;

Aos amigos Inaê Mariê e Rodrigo Cardoso por me acolher na chegada a Brasília, pelo suporte em todas as horas e, principalmente, pelo tempo de vizinhança descontraída.

À Erica, pela amizade e pelo importantíssimo suporte nas coletas de dados na Fazenda Água Limpa (FAL - UnB);

À minha namorada Nívea pelo carinho, compreensão, paciência e amor a mim dedicados. Também agradeço imensamente seus incentivos e sua insistência para que eu "respirasse direito".

Aos funcionários da Fazenda Água Limpa (FAL - UnB), especialmente sr. Sebastião e sr. Geraldo, pelo suporte nas coletas de dados;

Aos professores Carlos Alberto Araújo Júnior e Gilciano Saraiva Nogueira pelas sugestões apresentadas a este trabalho.

Aos orientados de graduação e Pós-graduação dos professores Rosimeire e Gualter pelo importante auxílio nas coletas de dados e por contribuírem para que esses momentos fossem produtivos e agradáveis.

Aos amigos conquistados no período de Pós-graduação em Brasília, Adriano, Ângela, Danilo, Erica, Fabi, Fabrícia, Genilda, Glauce, Gileno, Ilvan, Joabel, Josi, Juliana, Lamartine, Luduvico, Maísa, Marco Bruno, Marizete, Mirella, obrigado pelo agradável convívio e pelas experiências e saberes compartilhados.

À Coordenadoria de Aperfeiçoamento do Pessoal de Nível Superior (CAPES), pela concessão de bolsa de estudos.

A todos aqueles que, de alguma forma, contribuíram para a realização deste trabalho ou que torceram pelo êxito da sua realização.

Obrigado a todos, afinal, toda conquista é fruto da coletividade!!

RESUMO

PROJEÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA EM PLANTIOS EXPERIMENTAIS DE EUCALIPTO, ACÁCIA E NIM

Autor: Lidiomar Soares da Costa

Orientador: Renato Vinícius Oliveira Castro

Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais

Brasília-DF, Fevereiro - 2018.

O crescimento das árvores envolve processos fisiológicos que podem ser entendidos como o resultado da interação do potencial biótico, com restrições impostas por fatores internos e externos. A interação desses componentes torna impreciso o padrão de crescimento florestal, fazendo-se necessária a utilização de modelos estatísticos como um instrumento importante de auxílio ao planejamento. A aplicação da modelagem estatística no setor florestal tem como um dos focos principais o estudo da predição e projeção do crescimento e da produção florestal e dentre os modelos clássicos de crescimento e produção, os de distribuição diamétrica são bastante utilizados, pois permitem estimar o crescimento e a produção por classes de diâmetro e a avaliação econômica de multiprodutos, além de serem flexíveis para analisar simulações de desbaste. Esses modelos têm como principal característica o uso de funções densidade de probabilidade, sendo comum emprego da função Weibull. Assim, o presente estudo teve como objetivo a realizar a projeção do crescimento e produção de plantios florestais experimentais em nível de distribuição diamétrica. Utilizando dados coletados em plantios experimentais de eucalipto, desbastados e não desbastados, de *Acacia mangium* e *Azadirachta indica*, ajustou-se a função densidade de probabilidade Weibull de dois parâmetros pelo método da máxima verossimilhança e, para a projeção dos parâmetros da dessa função utilizou-se um sistema de equações com inclusão da variável área basal. Para as espécies *Acacia mangium* e *Azadirachta indica* o ajuste foi realizado em cinco diferentes amplitudes de classe. A avaliação dos ajustes dos sistemas foi realizada por meio da análise gráfica de resíduos e das estatísticas de precisão, coeficiente de determinação ajustado e erro padrão da média relativo, além da comparação entre valores estimados e observados por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov. A função Weibull foi altamente aderente aos dados dos quatro povoamentos. As distribuições diamétricas estimadas foram consistentes do ponto de vista do realismo biológico e precisas com a utilização da área basal no sistema de equações.

ABSTRACT

PROJECTION OF THE DIAMETRIC DISTRIBUTION OF EXPERIMENTAL STANDS OF EUCALYPT, ACACIA AND NIM

Author: Lidiomar Soares da Costa

Supervisor: Renato Vinícius Oliveira Castro

Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais

Brasília-DF, February - 2018.

Tree growth involves physiological processes that can be understood as the result of the interaction of biotic potential, with constraints imposed by internal and external factors. The interaction of these components makes imprecise the pattern of forest growth, making it necessary to use mathematical models as an important tool to aid planning. The application of mathematical modeling in the forestry has as one of the main focuses, the study of the prediction and projection of growth and forest production. Among the classic models of growth and production, those of diametric distribution are widely used because they allow estimating the growth and the production by diameter classes and the economic evaluation of multiproducts, besides being flexible to analyze thinning simulations. These models have as main characteristic the use of probability density functions, being common use of the Weibull function. Thus, the present study aimed to carry out the growth and production of experimental forest stands at the level of diametric distribution. From data collected in eucalypt stands, subjected to thinning and not subjected to thinning, of *Acacia mangium* and *Azadirachta indica*, the Weibull probability density function of two parameters was adjusted by the maximum likelihood method and, for the projection of the parameters of that function, a system of equations with the inclusion of the variable basal area. For the *Acacia mangium* and *Azadirachta indica* species the adjustment was performed in five different class amplitudes. The evaluation of the adjustments of the equation systems was performed using graphical analysis of residues and precision statistics, adjusted coefficient of determination and standard error of the mean, in addition to the comparison between estimated and observed values using the Kolmogorov-Smirnov test. The Weibull function was highly adherent to data from the four stands. The estimated diametric distributions were consistent from the point of view of biological realism and accurate with the use of the basal area in the system of equations.

SUMÁRIO

| | |
|---|------|
| LISTA DE TABELAS | xiii |
| LISTA DE FIGURAS | xv |
| INTRODUÇÃO GERAL | 1 |
| REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 3 |
| | |
| CAPÍTULO I – PROJEÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA DE POVOAMENTO COMERCIAL DE EUCALIPTO UTILIZANDO ÁREA BASAL | 6 |
| 1.1 - INTRODUÇÃO | 7 |
| 1.2 - MATERIAL E MÉTODOS | 8 |
| 1.3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO | 12 |
| 1.4 - CONCLUSÃO | 17 |
| 1.5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 17 |
| | |
| CAPÍTULO II – PROJEÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA DE PLANTIO EXPERIMENTAL DE EUCALIPTO SOB DIFERENTES REGIMES DE DESBASTE UTILIZANDO ÁREA BASAL | 20 |
| 2.1 - INTRODUÇÃO | 21 |
| 2.2 - MATERIAL E MÉTODOS | 22 |
| 2.3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO | 26 |
| 2.4 - CONCLUSÃO | 36 |
| 2.5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 36 |
| | |
| CAPÍTULO III – PROJEÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA DE PLANTIO EXPERIMENTAL DE <i>Acacia mangium</i> | 39 |
| 3.1 - INTRODUÇÃO | 40 |
| 3.2 - MATERIAL E MÉTODOS | 41 |
| 3.3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO | 45 |
| 3.4 - CONCLUSÃO | 53 |
| 3.5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 54 |

| | |
|---|----|
| CAPÍTULO IV – PROJEÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA DE PLANTIO EXPERIMENTAL DE <i>Azadirachta indica</i> | 57 |
| 4.1 - INTRODUÇÃO | 58 |
| 4.2 - MATERIAL E MÉTODOS | 59 |
| 4.3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO | 63 |
| 4.4 – CONCLUSÕES | 71 |
| 4.5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS | 72 |

LISTA DE TABELAS

CAPÍTULO I

Tabela 1.1. Coeficientes das equações ajustadas para as variáveis do povoamento: área basal (B_2), DAP máximo (d_{max2}), DAP mínimo (d_{min2}), diâmetro médio (q_2) e frequência (N_2 , árvores.ha⁻¹); e parâmetros da função Weibull: beta (β_2) e gama (γ_2) em idade futura e suas respectivas estatísticas de coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$) e erro padrão da média relativo ($S_{y,x}$ %).12

CAPÍTULO II

Tabela 2.1. Coeficientes das equações ajustadas para as variáveis do povoamento: área basal (B_2), DAP máximo (d_{max2}), DAP mínimo (d_{min2}), diâmetro médio (q_2) e frequência (N_2 , árvores.ha⁻¹); e parâmetros da função Weibull: beta (β_2) e gama (γ_2) em idade futura e suas respectivas estatísticas de coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$) e erro padrão da média relativo ($S_{y,x}$ %).27

CAPÍTULO III

Tabela 3.1. Coeficientes das equações ajustadas para as variáveis do povoamento: área basal (B_2), DAP máximo (d_{max2}), DAP mínimo (d_{min2}) e frequência (N_2 , árvores.ha⁻¹) em idade futura e suas respectivas estatísticas de coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$) e erro padrão da média relativo ($S_{y,x}$ %).45

Tabela 3.2. Coeficientes das equações ajustadas para os parâmetros Beta e Gama da função Weibull em diferentes amplitudes de classe diamétrica (AC) e suas respectivas estatísticas de coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$) e erro padrão da média relativo ($S_{y,x}$ %).46

Tabela 3.3. Porcentagem de diferença não significativa entre as estimativas de distribuição diamétrica estimada em relação à distribuição diamétrica observada, de plantio experimental de *Acacia mangium*, utilizando amplitudes de classe diamétrica de 0,75; 1,0; 1,5; 2,0 e 3,0 cm.....53

CAPÍTULO IV

Tabela 4.1. Porcentagem de aderência da função Weibull aos dados observados, considerando amplitudes de classe diamétrica de 0,75; 1,0; 1,5; 2,0 e 3,0 cm, em plantio experimental de *Azadirachta indica*.....63

Tabela 4.2. Coeficientes das equações ajustadas para as variáveis do povoamento: área basal (B_2), DAP máximo (d_{max2}), DAP mínimo (d_{min2}), diâmetro médio (q_2) e frequência (N_2 , árvores.ha⁻¹) em idade futura e suas respectivas estatísticas de coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$) e erro padrão da média relativo ($S_{y,x}$ %).....63

Tabela 4.3. Coeficientes das equações ajustadas para os parâmetros Beta e Gama da função Weibull em diferentes amplitudes de classe diamétrica (AC) e suas respectivas estatísticas de coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$) e erro padrão da média relativo ($S_{y,x}$ %).....63

Tabela 4.4. Porcentagem de diferença não significativa entre as estimativas de distribuição diamétrica estimada em relação à distribuição diamétrica observada, de plantio experimental de *Azadirachta indica*, utilizando amplitudes de classe diamétrica de 0,75; 1,0; 1,5; 2,0 e 3,0 cm.....71

LISTA DE FIGURAS

CAPÍTULO I

Figura 1.1. Gráficos de dispersão e histogramas da distribuição de resíduos para estimativas da área basal (a, b), diâmetro máximo (c, d), diâmetro mínimo (e, f), diâmetro médio (g, h), frequência de árvores por hectare (i, j) e os parâmetros Beta (β) (l, m) e Gama (γ) (n, o) da função Weibul em idade futura de plantio comercial do híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*.....13

Figura 1.2. Distribuição diamétrica estimada em quatro prognoses das parcelas 15080 e 16040; e comparação entre distribuição diamétrica observada e estimada em cada uma das prognoses de crescimento de plantio comercial do híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. Linhas representam a distribuição diamétrica estimada; barras representam a distribuição diamétrica observada.....15

Figura 1.3. Porcentagem de parcelas nas quais os valores estimados do número de árvores por classe diamétrica em prognoses, com (a) e sem (b) a utilização da área basal no sistema de equações, não diferiram significativamente dos valores observados para plantio comercial do híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*.....16

CAPÍTULO II

Figura 2.1. Gráficos de dispersão e histogramas da distribuição de resíduos para estimativas da área basal (a, b), diâmetro máximo (c, d), diâmetro mínimo (e, f), diâmetro médio (g, h) e frequência de árvores por hectare (i, j) em uma idade futura de plantio experimental do híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* sob diferentes regimes de desbaste.....28

Figura 2.2. Gráficos de dispersão e histogramas da distribuição de resíduos para as estimativas dos parâmetros Beta (β) (a, b) e Gama (γ) (c, d) da função Weibull em uma idade futura, de plantio experimental do híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* sob diferentes regimes de desbaste.....29

Figura 2.3. Distribuição diamétrica estimada aos 67, 74, 81 e 88 meses de um plantio experimental do híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* sem desbaste (a) e com desbaste de 25 (b), 33 (c) e 50% (d) dos indivíduos.....31

Figura 2.4. Validação do sistema de equações utilizando dados de 95 e 102 meses de um plantio experimental do híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* sem desbaste e com desbaste de 25, 33 e 50% dos indivíduos. Linhas representam a distribuição diamétrica estimada; barras representam a distribuição diamétrica observada.....32

Figura 2.5. Porcentagem de parcelas nas quais os valores estimados do número de árvores por classe diamétrica na 1ª, 2ª, 3ª e 4ª prognoses não diferiram significativamente dos valores observados para plantio experimental do híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* sem desbaste e com desbaste de 25, 33 e 50% dos indivíduos.....33

Figura 2.6. Representação gráfica da proporção média entre redução de árvores e redução de área basal em plantio experimental do híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*.....34

Figura 2.7. Simulação da distribuição diamétrica aos 67, 74, 81, 88, 95, 102, 109 e 116 meses de plantio experimental do híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* submetido ao desbaste de 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60 e 70% dos indivíduos.....35

CAPÍTULO III

Figura 3.1. Gráficos de dispersão e histogramas da distribuição de resíduos para estimativas da área basal (a, b), DAP máximo (c, d), DAP mínimo (e, f) e frequência de árvores por hectare (g, h) em uma idade futura de plantio experimental de *Acacia mangium* no Rio Grande do Norte.....47

Figura 3.2. Gráficos de dispersão e histogramas da distribuição de resíduos para as estimativas dos parâmetros Beta (β) e Gama (γ) da função Weibull em uma idade futura, para as amplitudes de classe diamétricas de 0,75; 1,0; 1,5; 2,0 e 3,0 cm utilizadas na modelagem da distribuição diâmetrica de plantio experimental de *Acacia mangium*.....48

Figura 3.3 – Simulação distribuição diamétrica de plantio experimental de *Acacia mangium* em três prognoses, aos 24, 36 e 48 meses, realizadas para as amplitudes de classe diamétrica de 0,75; 1,0; 1,5; 2,0 e 3,0 cm.....50

Figura 3.4 – Comparação entre distribuições diamétricas observada e estimada de plantio experimental de *Acacia mangium* para amplitudes de classe diamétrica de 0,75; 1,0; 1,5; 2,0 e 3,0 cm, nas idades de 24, 36 e 48 meses.....51

Figura 3.5 – Gráfico de correlação entre parâmetros Beta e Gama estimados e recuperados.....52

CAPÍTULO IV

Figura 4.1. Gráficos de dispersão e histogramas da distribuição de resíduos para estimativas da área basal (a, b), DAP máximo (c, d), DAP mínimo (e, f), diâmetro médio (g, h) e frequência de árvores por hectare (i, j) em uma idade futura de plantio experimental de *Azadirachta indica*.....65

Figura 4.2. Gráficos de dispersão e histogramas da distribuição de resíduos para as estimativas dos parâmetros, Beta (β) e Gama (γ), da função Weibull em uma idade futura, para as amplitudes de classe diamétricas de 0,75; 1,0; 1,5; 2,0 e 3,0 cm utilizadas na modelagem da distribuição diâmetrica de plantio experimental de *Azadirachta indica*.....66

Figura 4.3. Simulação distribuição diamétrica de plantio experimental de *Azadirachta indica* em quatro prognoses, aos 24, 36, 48 e 60 meses, realizadas para as amplitudes de classe diamétrica de 0,75; 1,0; 1,5; 2,0 e 3,0 cm.....68

Figura 4.4. Comparação entre distribuições diamétricas observada e estimada de plantio experimental de *Azadirachta indica* para amplitudes de classe diamétrica de 0,75; 1,0; 1,5; 2,0 e 3,0 cm, nas idades de 24, 36, 48 e 60 meses.....69

Figura 4.5. Gráfico de correlação entre parâmetros Beta e Gama estimados e recuperados.....70

INTRODUÇÃO GERAL

O crescimento das árvores envolve processos fisiológicos que podem ser entendidos como o resultado da interação do potencial biótico, como a expansão do organismo e multiplicação, com restrições impostas por fatores internos e externos (ZEIDE, 1993). A interação desses componentes torna impreciso o padrão de crescimento florestal, fazendo-se necessária a utilização de modelos estatísticos como um instrumento importante de auxílio ao planejamento.

No setor florestal a aplicação da modelagem estatísticos possui dois focos principais, um deles é estudar a dinâmica, a sucessão da floresta e os efeitos de fatores ambientais sobre a estrutura do povoamento e o outro, estuda a predição e projeção do crescimento e da produção florestal, incluindo análises dos efeitos de práticas silviculturais (PORTÉ; BARTELINK, 2002).

Um modelo de crescimento e produção deve representar a realidade do sistema ou fenômeno considerado. Sua avaliação compreende interpretações de ordem qualitativa, que trata de aspectos como o realismo biológico do modelo, e de ordem quantitativa, que trata de testes estatísticos e comparação de predições com observações independentes (CAMPOS; LEITE, 2013). Dentre os modelos clássicos de crescimento e produção, os de distribuição diamétrica são bastante utilizados, pois permitem estimar o crescimento e a produção por classes de diâmetro e a avaliação econômica de multiprodutos, além de serem flexíveis para analisar simulações de desbaste (BURKHART et al., 1981; CLUTTER et al., 1983).

Desde os primeiros estudos relacionados com a distribuição diamétrica, realizados por François De Liocourt por volta de 1898, vários modelos estatísticos, denominados funções densidade de probabilidade, têm sido utilizados na ciência florestal, especialmente no manejo florestal, por serem capazes de representar a estrutura dos povoamentos, através da expressão da distribuição de frequência relativa ou absoluta dos distintos tamanhos das árvores. Essas funções são importantes para estimar o acontecimento potencial de eventos de ocorrência incerta (GUIMARÃES, 2002) e podem ser ajustadas para dados discretos e contínuos.

A flexibilidade dessas funções permite seu uso em diferentes situações nas grandes áreas da ciência, como engenharias, ciências biológicas, humanas, sociais, etc.

(KRISHNAMOORTHY, 2006; WALCK, 2007). Nas ciências florestais as funções densidade de probabilidade já foram empregadas dentre outros, na descrição da distribuição hipsométrica, distribuição de precipitação de chuva e principalmente distribuição diamétrica (CATALUNHA et al., 2002; SCOLFORO, 2006; MACHADO et al., 2010; CAMPOS; LEITE, 2013).

Dentre as diversas funções utilizadas em estudos de distribuição diamétrica, pode-se citar: Beta, Gama, Gama generalizada, Hiperbólica, Logística, Logística Generalizada, Log-normal, Normal, S_B Johnson e Weibull (SIIPILEHTO, 1999; LEITE et al., 2010; TÉO et al., 2011; ARAÚJO JÚNIOR et al., 2013; BINOTI et al., 2014; BINOTI et al., 2015; CASTRO et al., 2016; MARANGON et al., 2016), dentre as quais destaca-se na ciência florestal a função Weibull.

Uma das primeiras aplicações dessa função no estudo de distribuições diamétricas foi feita por Bailey e Dell (1973), devido a sua flexibilidade em representar formas comumente encontradas em florestas equiâneas e inequiâneas e a possibilidade de gerar probabilidades facilmente sem o uso de integração numérica (KNOEBEL et al., 1988). Bailey e Dell (1973) demonstraram as propriedades favoráveis da função Weibull neste tipo de estudo por meio de sua aplicação a diferentes exemplos de estruturas diamétricas e espécies.

Para estimar os parâmetros dessa função existem alguns métodos que podem ser utilizados, dentre os quais pode-se destacar o da máxima verossimilhança, que é o mais utilizado no manejo florestal. Esse método basicamente consiste em adotar para o parâmetro o valor que maximize a função de verossimilhança, correspondente ao resultado obtido na amostra, ou seja, baseia-se em escolher, entre os prováveis valores dos parâmetros populacionais, aqueles que possivelmente possibilitarão a ocorrência de uma amostra idêntica àquela que efetivamente se obteve (LOPES, 2007).

A distribuição diamétrica futura pode ser estimada empregando modelos de predição, em que os parâmetros da distribuição estatística selecionada são correlacionados com parâmetros dos povoamentos (CLUTTER et al., 1983), tais como, diâmetros médio, máximo e mínimo, densidade e índice de local, e modelos de projeção, nos quais os parâmetros da distribuição estatística são estimados em função desses mesmos parâmetros observados em uma idade anterior (LEITE et al., 2005).

Nogueira (2003) propôs um modelo de projeção da distribuição diamétrica através de

um sistema de equações, onde os parâmetros da função Weibull em uma idade futura foram correlacionados com esses mesmos parâmetros em uma idade atual, resultando em um sistema de projeção compatível. Esses modelos também foram utilizados por Leite et al. (2005) e Binoti et al. (2010), tendo comprovada sua eficiência. A utilização, no entanto, de modelos de projeção com a utilização da área basal não tem sido observada para qualquer espécie florestal no Brasil. A área basal, importante variável de densidade da floresta, está diretamente relacionada com o volume por hectare, além disso, a relação da área basal com a idade é de grande importância, pois pode determinar o ponto de estagnação da floresta.

Assim, este estudo foi elaborado com o objetivo geral de realizar a modelagem da distribuição diamétrica de povoamentos florestais com a inclusão da variável área basal no sistema de equações utilizado para projetar os parâmetros da função densidade de probabilidade. A estrutura da tese está organizada em 4 capítulos. No capítulo 1 estudou-se o uso da função weibull em povoamento comercial de eucalipto utilizando área basal. No capítulo 2 realizou-se a modelagem da distribuição diamétrica de povoamento experimental de eucalipto sob regimes de desbaste, utilizando a área basal no sistema de equações para projeção dos parâmetros da função Weibull. Nos capítulos 3 e 4, realizou-se para povoamentos experimentais de *Acacia mangium* (acácia) e *Azadirachta indica* (nim), respectivamente, a modelagem da distribuição diamétrica, testando diferentes amplitudes de classes diamétricas e também utilizando área basal no sistema de equações para projeção dos parâmetros da função Weibull.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO JÚNIOR, C.A.; LEITE, H.G.L.; CASTRO, R.V.O.; BINOTI, D.H.B.; ALCÂNTARA, A.E.M.; BINOTI, M.L.M.S. Modelagem da distribuição diamétrica de povoamentos de eucalipto utilizando a função gama. **Cerne**, Lavras, v.19, n.2, p.307-314, 2013.

BAILEY, R.L.; DELL, J.R. Quantifying diameter distributions with the Weibull function. **Forest Science**, Bethesda, v.19, n.2, p.97-104, 1973.

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, 2015.

BINOTI, D.H.B.; BINOTI, M.L.M.S.; LEITE, H.G. Avaliação da função hiperbólica truncada para a descrição da distribuição diamétrica de povoamentos desbastados de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 38, n. 6, p. 1037-1044, 2014.

BINOTI, D.H.B.; LEITE, H.G.; NOGUEIRA, G.S.; SILVA, M.L.M.; GARCIA, S.L.R.; CRUZ, J.P. Uso da função Weibull de três parâmetros em um modelo de distribuição diamétrica para plantios de eucalipto submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, Viçosa, v.34, n.1, p.147-156, 2010.

BURKHART, H.E.; CAO, Q.V.; WARE, K.D. **A comparison of growth and yield prediction models for loblolly pine**. Blacksburg, VA: Virginia Polytechnic Institute and State University, School of Forestry and Wildlife Resources, 1981. 59 p.

CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 4. ed. Viçosa, MG: UFV, 2013. 605 p.

CASTRO, R.V.O.; ARAÚJO JÚNIOR, C.A.; LEITE, H.G.; CASTRO, A.F.N.M.; NOGUEIRA, G.S.; COSTA, L.S. Função gama generalizada para descrever a distribuição diamétrica de um povoamento de eucalipto. **Floresta**, Curitiba, PR, v.46, n.1, p.67-73, 2016.

CATALUNHA, J.C.; SEDIYAMA, G.C.; LEAL, B.G.; SOARES, C.P.B.; RIBEIRO, A. Avaliação de cinco funções densidade de probabilidade a séries de precipitação pluvial no estado de Minas Gerais. **Revista Brasileira de Agrometeorologia**, Santa Maria, v.10, n.1, p.153-162, 2002.

CLUTTER, J.C.; FORTSON, J.C.; PIENAAR, L.V.; BRISTER, G.H.; BAILEY, R.L. **Timber management: a quantitative approach**. 3. ed. New York: John Wiley & Sons, 1983. 333p.

GUIMARÃES, D.P. **Uma função hiperbólica de distribuição probabilística de alta flexibilidade**. Planaltina: Embrapa Cerrados, 2002.

KNOEBEL, B.R.; BURKHART, H.E.; BECK, D.E. A growth and yield model for thinned stands of yellow-poplar. *Forest Science Monograph* 27, 1986, **Supplement to Forest Science**, v.32, n.2, 1988.

KRISHNAMOORTHY, K. **Handbook of statistical distributions with applications**. Boca Raton, Chapman e Hall/CRC, 2006, 344p.

LEITE, H.G.; BINOTI, D.H.B.; GUIMARÃES, D.P.; SILVA, M.L.M.; GARCIA, S.L. Avaliação do ajuste das funções Weibull e hiperbólica a dados de povoamentos de eucalipto submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, v.34, n.2, p.305-311, 2010.

LEITE, H.G.; NOGUEIRA, G.S.; CAMPOS, J.C.C.; SOUZA, A.L.; CARVALHO, A. Avaliação de um modelo de distribuição diamétrica ajustado para povoamentos de *Eucalyptus* sp. submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, v.29, n.2, p.271-280, 2005.

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

MACHADO, S.A.; NASCIMENTO, R.G.M.; MIGUEL, E.P.; TÊO, S.J.; AUGUSTYNCZIK, A.L.D. Distribution of total height, transverse area and volume for *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Kuntze. **Cerne**, Lavras, v.16, n.1, p.12-21, 2010.

MARANGON, G.P.; FERREIRA, R.L.C.; SILVA, J.A.A.; SCHNEIDER, P.R.; LOUREIRO, G.H. Modelagem da distribuição diamétrica de espécies lenhosas da caatinga, semiárido pernambucano. **Ciência Florestal**, Santa Maria, v.26, n.3, p.863-874, 2016.

NOGUEIRA, G.S. **Modelagem do crescimento e da produção de povoamentos de *Eucalyptus* sp.e de *Tectona grandis* submetidos a desbaste**. 2003. 132f. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003.

PORTÉ, A.; BARTELINK, H.H. Modelling mixed Forest growth: a review of models for forest mangement. **Ecological Modelling**, v.150, p.141-188, 2002.

SCOLFORO, J.R.S. **Biometria Florestal: Modelos de crescimento e produção florestal**. UFLA/FAEPE, 393p., Lavras, 2006.

SIIPILEHTO, J. Improving the accuracy of predicted basal-area diameter distribution in advanced stands by determining stem number. **Silva Fennica**, Helsinki, v.33, n.4, p.281-301, 1999.

TÊO, S.J.; ROCHA, S.P.; BORTONCELLO, A.C.; PAZ, R.A.; COSTA, R.H. Dinâmica da distribuição diamétrica de povoamentos de *Pinus taeda*, na região de Caçador, SC. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v.3, n.67, p.183-192, 2011.

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

WALCK, C. **Hand-book on statistical distributions for experimentalists**. Stockholm, University of Stockholm, 2007, 190 p.

ZEIDE, B. Analysis of growth equations. **Forest Science**, v.39, n.3, p.594-616, 1993.

CAPÍTULO I – PROJEÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA DE POVOAMENTO COMERCIAL DE EUCALIPTO UTILIZANDO ÁREA BASAL

RESUMO – O objetivo do presente trabalho foi projetar a distribuição diamétrica com inclusão da variável área basal no sistema de equações e avaliar a eficiência desse modelo na projeção da distribuição diamétrica de plantios comerciais do híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. Os dados foram obtidos de inventários florestais em parcelas permanentes de área média de 291,5 m², em idades variando de 19 a 98 meses em povoamento comercial. Ajustou-se a função densidade de probabilidade Weibull de dois parâmetros pelo método da máxima verossimilhança e, para a projeção dos parâmetros da dessa função utilizou-se um sistema de equações com inclusão da variável área basal. A avaliação do ajuste desse sistema foi feita por meio da análise gráfica de resíduos e das estatísticas de precisão, coeficiente de determinação ajustado e erro padrão da média relativo, além da comparação entre valores estimados e observados por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov. A função Weibull foi aderente para 98% dos ajustes e as estimativas das variáveis do povoamento e parâmetros da função Weibull apresentaram R²_{ajustado} alto, erro padrão baixo e baixa dispersão de resíduos. As distribuições diamétricas estimadas foram consistentes do ponto de vista do realismo biológico e mais precisas com a utilização da área basal no sistema de equações. A distribuição diamétrica de povoamento comercial de eucalipto projetada com a inclusão de área basal no sistema de equações para projeção dos parâmetros da função Weibull apresenta consistência, além de ser eficiente para, pelo menos, quatro prognoses consecutivas.

Palavras-chave: Manejo florestal, distribuição diamétrica, prognose florestal

1.1 - INTRODUÇÃO

O planejamento é, em qualquer ramo de atividade, parte fundamental do processo de produção para obtenção de sucesso, e para isso tem-se à disposição diversas ferramentas e estratégias. No setor florestal, uma dessas ferramentas é a modelagem do crescimento e produção em nível de distribuição diamétrica que tem sido amplamente utilizada e permite o conhecimento do estágio de desenvolvimento do povoamento, além de permitir também a previsão e simulação da produção futura de madeira (SIIPILEHTO et al., 2007). Com isso, contribui para o sucesso de diversas atividades como a colheita e sortimento de produtos florestais (BURKHART; TOMÉ, 2012).

A modelagem da distribuição diamétrica estima o número de árvores e a produção por hectare por classe de diâmetro, e a produção total pode ser obtida por meio do somatório da variável de interesse em todas as classes de diâmetro (CAMPOS; LEITE, 2013). Esses modelos se baseiam em funções densidade de probabilidade (f.d.p.) que estimam a frequência de árvores nas diferentes classes de diâmetros e possibilitam a avaliação do crescimento da floresta visando produzir multiprodutos da madeira, visto que diferenciam a produção em relação à classe de tamanho das árvores (SIIPILEHTO et al., 2007).

Dentre as funções densidade de probabilidade, a função Weibull destaca-se por sua relativa simplicidade de ajuste e flexibilidade para representar diferentes comportamentos de distribuição diamétrica (BAILEY; DELL, 1973). Essa função ainda tem a vantagem de seus parâmetros serem facilmente correlacionados com variáveis do povoamento (CAMPOS; LEITE, 2013). Essa função tem sido amplamente utilizada em estudos que envolvem distribuição diamétrica no Brasil, principalmente em povoamentos de eucalipto, pinus e teca (NOGUEIRA et al., 2006; SOARES et al., 2011; STEPKA et al., 2011; TÊO et al., 2011).

As equações de regressão utilizadas para estimar os parâmetros da função densidade de probabilidade comumente empregam variáveis independentes características do povoamento, como idade, número de árvores por hectare e índice de local (LEITE et al., 2005; NOGUEIRA et al., 2005; CASTRO et al., 2016), a área basal no entanto, não tem sido utilizada nos sistemas de equações para florestas no Brasil. Essa variável constitui um importante parâmetro da densidade do povoamento, fornecendo o grau de ocupação de determinada área por árvores

(CAMPOS; LEITE, 2013), além disso, pode indicar a estagnação do crescimento florestal. É um índice de densidade utilizado para tomar decisões de manejo, fundamentalmente nas decisões de oportunidade e intensidade dos desbastes (CRECHI, 1996).

Assim o objetivo do presente trabalho foi ajustar um modelo em nível de distribuição diamétrica com inclusão da variável área basal no sistema de equações utilizado para projetar os parâmetros da função Weibull e avaliar a eficiência desse modelo na projeção da distribuição diamétrica de plantios comerciais de *Eucalyptus*.

1.2 - MATERIAL E MÉTODOS

Os dados utilizados neste estudo foram obtidos de inventários florestais contínuos de clones do híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* realizado entre os anos de 2001 e 2006. O povoamento possui 4.162 ha e estava inserido na região de Santa Bárbara, estado de Minas Gerais. Os solos predominantes na região são os Latossolos. As temperaturas mínima e máxima são médias de 17 e 27°C, respectivamente, com umidade relativa média de 65% e precipitação média anual de 1.440 mm.

A modelagem do crescimento e produção em nível de distribuição diamétrica foi realizada com a inclusão da área basal como variável explanatória de densidade, a partir de 264 parcelas permanentes com formato retangular, sendo sua área média 291,5 m², as quais foram mensuradas em idades variando de 19 a 98 meses, cada parcela medida no mínimo em três ocasiões. Em cada ocasião foram mensurados o diâmetro dos indivíduos a 1,30 m de altura (*DAP*, em cm), considerando o nível de inclusão de 4,0 cm, com auxílio de uma suta; e a altura total das 10 primeiras árvores de cada parcela utilizando o clinômetro digital.

A sequência para ajuste do modelo de distribuição diamétrica foi a seguinte: a) obtenção de dados de parcelas permanentes, de maneira representativa; b) ajuste de uma função densidade de probabilidade para cada parcela, em cada medição; c) obtenção de equações de regressão para estimar os parâmetros da fdp na idade futura, utilizando como variáveis independentes características do povoamento, incluindo a área basal; e d) avaliação e validação (aplicação) da equação, conforme sugerido por Campos e Leite (2013).

As árvores, de cada parcela e em cada idade, foram agrupadas em classes com amplitude de 2,0 cm de diâmetro, conforme sugerido por Araújo Júnior et al. (2010), sendo o

limite inferior da primeira classe definido com base no diâmetro mínimo. Para descrever a distribuição diamétrica de cada parcela em cada idade, foi ajustada a função densidade de probabilidade Weibull de dois parâmetros (Eq. 1) pelo método da máxima verossimilhança, empregando o algoritmo desenvolvido por Gove e Fairweather (1989), por meio do *software Weibull Trunc* (PELLI, ARAÚJO JÚNIOR e MIRANDA, 2007).

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

Em que: $f(X)$ = frequência de árvores na classe de *DAP* X ; X = centro de classe de diâmetro, em cm; β = parâmetro de escala; γ = parâmetro de forma.

A qualidade dos ajustes foi avaliada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov ($\alpha = 0,01$) a fim de verificar a aderência da função Weibull aos dados. Esse teste consiste no cálculo da máxima diferença entre a frequência acumulada observada e a frequência acumulada estimada, sendo a classe de maior divergência a estatística do teste (dn) (Eq. 2) e, em seguida, esse valor é comparado com o tabelado ao nível de 1% de significância (SOKAL; ROHLF, 1981). Neste teste quanto maior o valor de dn , maior é a divergência entre os valores reais e os valores estimados pela função.

$$dn = \text{MAX} | F(X) - S(X) | \quad (2)$$

Em que: $S(X)$ é a frequência acumulada observada e $F(X)$ é a frequência estimada pela função Weibull.

A redistribuição teórica dos diâmetros por classe ou recuperação da distribuição diamétrica foi realizada por meio da alternativa tradicional de correlacionar parâmetros da função com características do povoamento. Essa correlação foi feita por meio de regressão linear, sendo as variáveis dependentes os parâmetros da função Weibull em uma idade futura e, como variáveis independentes, os parâmetros desta mesma função em uma idade atual e as características do povoamento em idades atual e futura.

Os seguintes atributos do povoamento foram utilizados: idade, diâmetro máximo, diâmetro mínimo, diâmetro médio, número de árvores, área basal e combinações dessas variáveis. O sistema de equações utilizado para projetar os parâmetros da função densidade de probabilidade (fdp) Weibull foi baseado nos sistemas propostos por Nogueira (2003) e

Binoti et al. (2010), com adaptações e inclusão da variável área basal. Foram ajustadas cinco equações para cada variável, sendo a melhor selecionada para compor o sistema de equações (Eq. 3 a 9). Para ajustar as equações utilizou-se o Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (GUJARATI; PORTER, 2011). O sistema de equações selecionado foi:

$$B_2 = c_0 + c_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) B_1 + c_2 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) d \max_1 + \varepsilon \quad (3)$$

$$d \max_2 = c_0 + c_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) d \max_1 + c_2 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) B_1 + c_3 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) q_1 + \varepsilon \quad (4)$$

$$d \min_2 = c_0 + c_1 d \min_1 + c_2 B_1 + c_3 I_1^{-1} + \varepsilon \quad (5)$$

$$q_2 = c_0 + c_1 q_1 + c_2 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) d \max_1 + c_3 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) B_1 + \varepsilon \quad (6)$$

$$N_2 = c_0 + c_1 N_1 + c_2 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) B_1 + c_3 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) (d \max_1 - q_1) + \varepsilon \quad (7)$$

$$\beta_2 = c_1 \beta_1 + c_2 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) (d \max_1 - q_1) + c_3 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) B_1 + \varepsilon \quad (8)$$

$$\gamma_2 = c_1 \gamma_1 + c_2 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) d \max_1 + c_3 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) B_1 + \varepsilon \quad (9)$$

Em que: I_1 e I_2 são as idades atual e futura, em meses; B_1 e B_2 são as áreas basais nas idades atual (1) e futura (2), em $m^2 \cdot ha^{-1}$; $d \max_1$ e $d \max_2$ são os diâmetros máximos nas idades atual (1) e futura (2), em cm; $d \min_1$ e $d \min_2$ são os diâmetros mínimos nas idades atual (1) e futura (2), em cm; q_1 e q_2 são os diâmetro médio nas idades atual (1) e futura (2); N_1 e N_2 são as frequências de árvores por hectare nas idades atual (1) e futura (2); β_1 e β_2 são os parâmetros de escala da função Weibull nas idades atual (1) e futura (2); γ_1 e γ_2 são os parâmetros de forma da função Weibull nas idades atual (1) e futura (2); c_i são os parâmetros dos modelos e ε é o erro aleatório.

Para identificar possíveis inconsistências nas estimativas das variáveis, além da distribuição gráfica dos resíduos, foram obtidas as estatísticas de coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$) (Eq. 10) e erro padrão da média relativo ($S_{y,x\%}$) (Eq. 11), definidos por:

$$R^2_{aj.} = 1 - \left(\frac{n-1}{n-p-1} \right) \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \right) \quad (10)$$

$$S_{y.x\%} = \frac{\sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-p-1}}}{\bar{y}} \times 100 \quad (11)$$

Em que: n = número de observações; y_i = valores observados para as variáveis; \hat{y}_i = valores estimados para as variáveis; \bar{y} = valor médio observado para as variáveis; $n-p-1$ = grau de liberdade dos resíduos da equação.

O ajuste do sistema de equações e da função Weibull foi realizado utilizando dados de 80% das parcelas e a validação realizada com os 20% de dados restantes, conforme realizado por Castro et al. (2016). A distribuição diamétrica foi projetada a partir dos dados da medição realizada em uma primeira ocasião para a idade seguinte e assim sucessivamente até a última idade de cada parcela. Em seguida os valores estimados foram comparados com os valores observados por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov ($\alpha = 0,01$).

1.3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

O ajuste da função densidade de probabilidade Weibull de dois parâmetros foi realizado para cada parcela em cada idade, totalizando 1014 ajustes, sendo aderente em 98% dos casos pelo teste de Kolmogorov-Smirnov ao nível de 1% de significância.

As equações ajustadas também resultaram em coeficientes de determinação ajustados ($R^2_{aj.}$) altos, com valores maiores que 0,90. O erro padrão relativo da média ($S_{y,x\%}$) para cada uma das equações foi baixo, menores que 15%, podendo inferir que houve baixa variação entre dados estimados e observados (Tabela 1.1).

Tabela 1.1. Coeficientes das equações ajustadas para as variáveis do povoamento: área basal (B_2), *DAP* máximo (d_{max2}), *DAP* mínimo (d_{min2}), diâmetro médio (q_2) e frequência (N_2 , árvores.ha⁻¹); e parâmetros da função Weibull: beta (β_2) e gama (γ_2) em idade futura e suas respectivas estatísticas de coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$) e erro padrão da média relativo ($S_{y,x\%}$).

| Variáveis | C ₀ | C ₁ | C ₂ | C ₃ | R ² _{Aj.} | S _{y,x} (%) |
|-------------------|----------------|----------------|----------------|----------------|-------------------------------|----------------------|
| B ₂ | 9,0615 | 1,2091 | -0,8196 | - | 0,95 | 4,80 |
| d _{max2} | 1,9408 | 0,8928 | -0,5277 | 2,2248 | 0,92 | 3,48 |
| d _{min2} | -0,8179 | 1,0355 | 15,6743 | -0,0293 | 0,94 | 6,24 |
| q ₂ | -3,9843 | 1,1511 | 68,6400 | -0,0532 | 0,93 | 3,03 |
| N ₂ | 0,9338 | 1,0009 | 0,0542 | -1,6134 | 0,99 | 0,87 |
| β ₂ | - | 0,9108 | 1,4189 | 0,2335 | 0,91 | 11,23 |
| γ ₂ | - | 0,8677 | 0,0990 | -0,0648 | 0,90 | 14,73 |

As equações obtidas para as variáveis de povoamento, com inclusão da área basal, apresentaram ajuste de alta qualidade, com dispersão de resíduos baixa e homocedástica. Já aquelas equações obtidas para estimar os parâmetros da função Weibul 2P apresentaram dispersão de resíduos maior do que aquela observada para as variáveis de povoamento, no entanto também apresentaram distribuição homocedástica, entretanto todas as variáveis apresentaram tendência à distribuição normal dos resíduos (Figura 1.1).

A utilização da função Weibull tem sido estudada em diversos estudos na área florestal, e as características já mencionadas das estimativas dos parâmetros dessa função têm sido observadas, embora esses estudos não tenham utilizado a área basal na projeção desses parâmetros (SOARES et al., 2010; LEITE et al., 2013; CASTRO et al., 2016). Outros estudos realizados com povoamentos de região de clima temperado, no entanto, mostraram a existência de uma estreita relação entre os parâmetros da função Weibull, especialmente Beta, e a área basal (HÖKKÄ et al., 1991; MALTAMO et al., 1995).

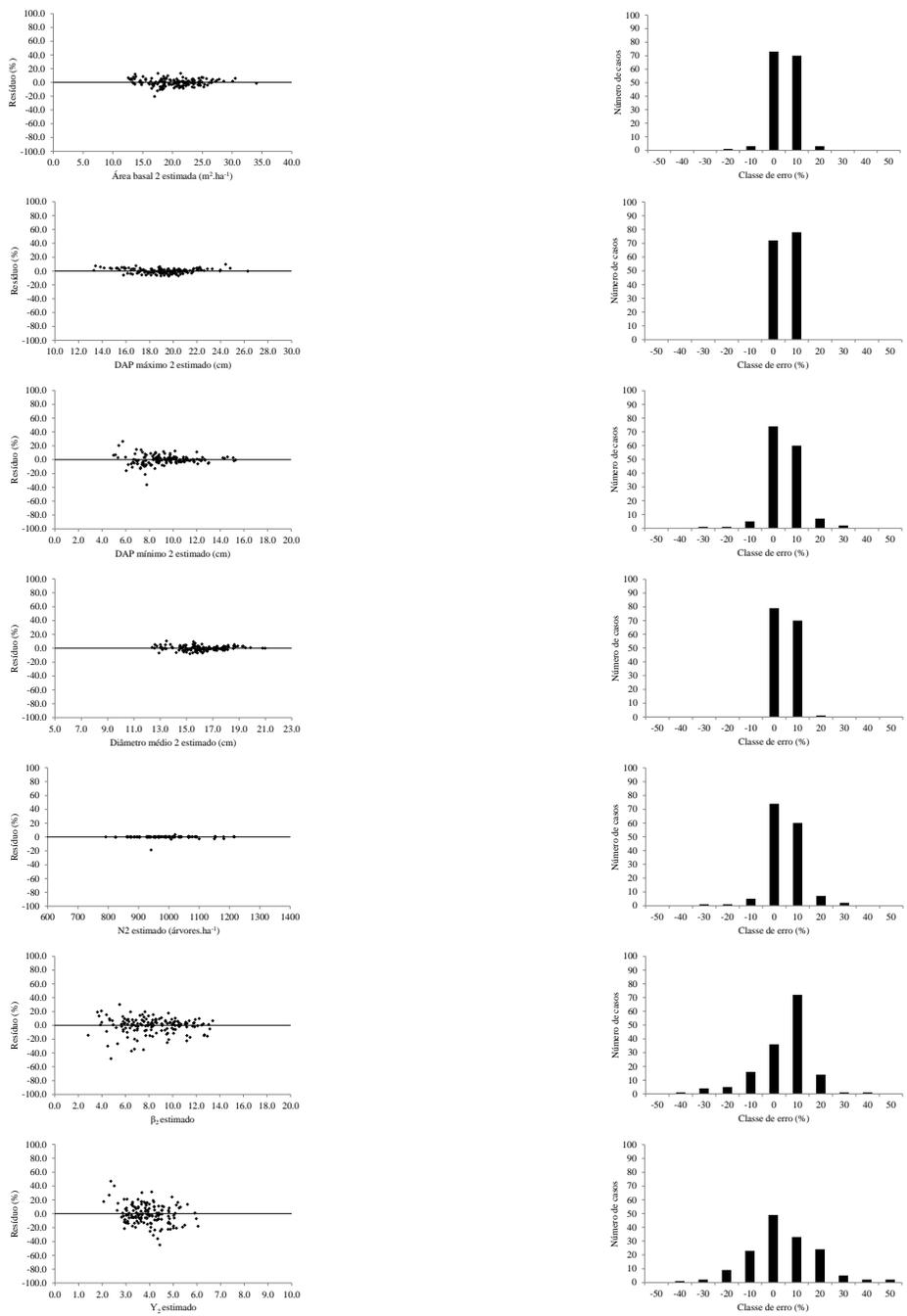


Figura 1.1. Gráficos de dispersão e histogramas da distribuição de resíduos para estimativas da área basal, diâmetro máximo, diâmetro mínimo, diâmetro médio, frequência de árvores por hectare e os parâmetros Beta (β) e Gama (γ) da função Weibul em idade futura de plantio comercial do híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*.

Para representar a prognose da distribuição diamétrica do povoamento selecionou-se uma parcela ao acaso. A tendência de crescimento representada apresentou comportamento coerente com a teoria, de acordo com a qual as distribuições se achatam e deslocam para a

direita. Assim tem-se que a distribuição diamétrica estimada é consistente do ponto de vista do realismo biológico (Figura 1.2).

As comparações entre distribuições diamétricas observadas e estimadas em cada idade permitem inferir que o sistema de equações de projeção do crescimento proporcionaram estimativas precisas. Além disso, essas observações confirmam que a quantificação da distribuição diamétrica e sua relação, entre outras, com variáveis explanatórias de densidade, como é caso de área basal, é importante tanto econômico como biologicamente (BAILEY; DELL, 1973), pois a distribuição diamétrica é um indicador do estoque de crescimento da floresta (LOETSCH et al., 1973).

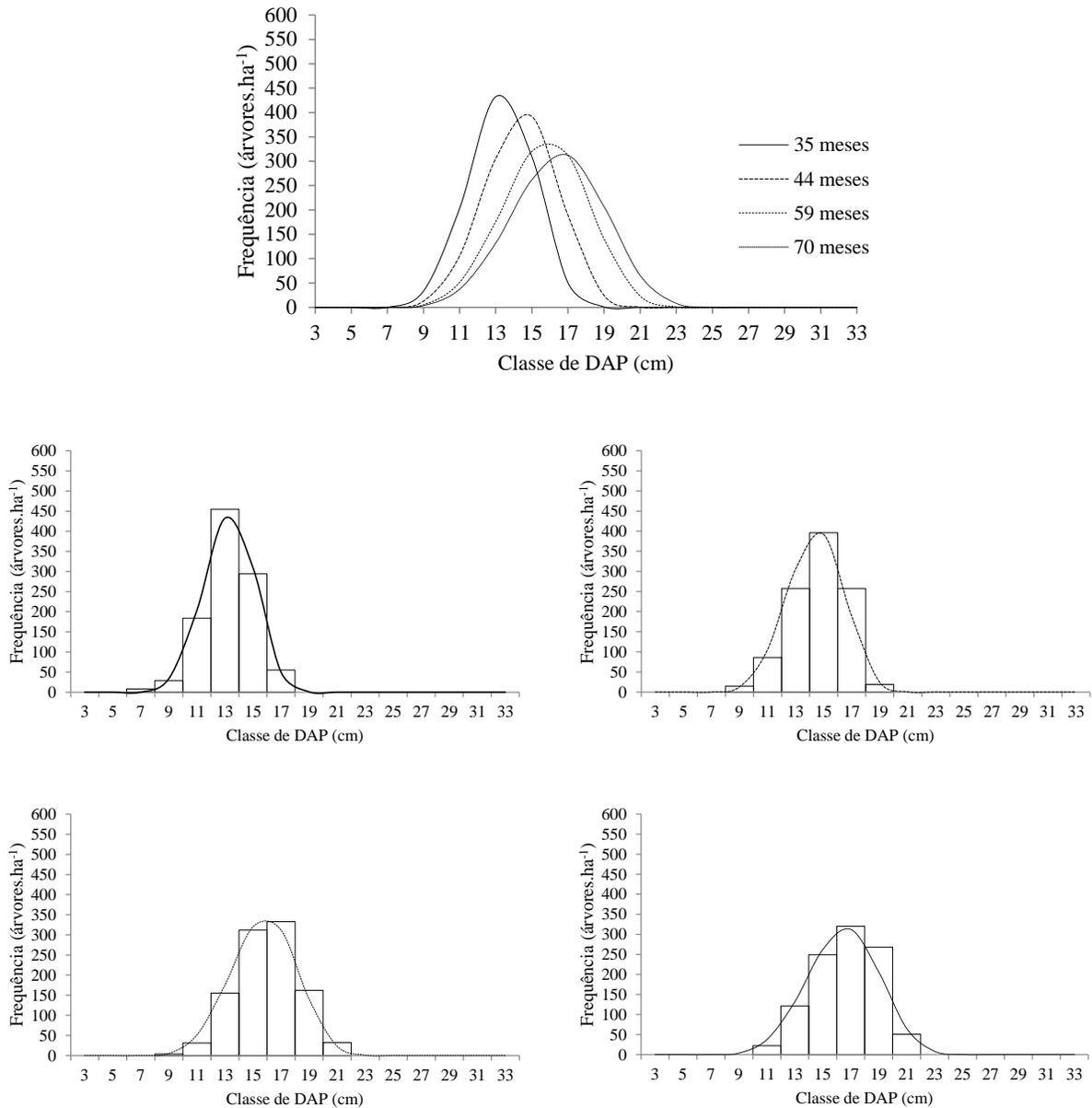


Figura 1.2. Distribuição diamétrica estimada em quatro prognoses para a parcela selecionada; e comparação entre distribuição diamétrica observada (barras) e estimada (linhas) em cada uma das prognoses de crescimento de plantio comercial do híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. Linhas representam a distribuição diamétrica estimada.

Na comparação entre prognoses com e sem utilização da área basal no sistema de equações observa-se a importância dessa variável para as estimativas obtidas. Em ambos os casos a primeira prognose foi obtida com alta precisão, observando redução desta, em diferentes proporções, nas idades seguintes.

Para prognoses com utilização da área basal, a maior redução de precisão entre prognoses sucessivas foi de 5,5%, ocorrendo da terceira para a quarta e, uma redução total de 10,4% entre primeira para a última prognose (Figura 1.3a). Já a prognose sem utilização da área basal apresentou redução de precisão de até 9,3% entre prognoses sucessivas e de 22,3% entre a primeira e a última prognose (Figura 1.3b). As diferenças entre as prognoses com e sem área basal no sistema de equações, em cada idade, aumentaram progressivamente, sendo de 4,8%; 10,2%; 15,0% e 17,4% entre a 1ª, 2ª, 3ª e 4ª prognoses, respectivamente.

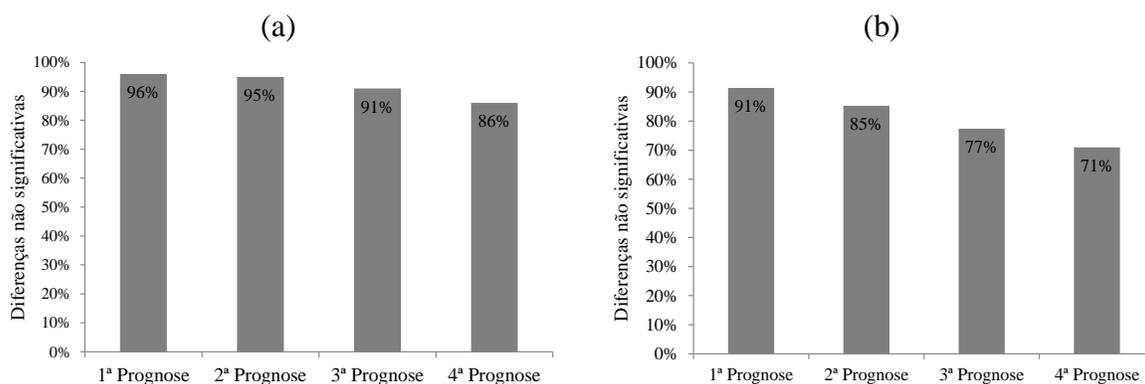


Figura 1.3. Porcentagem de parcelas nas quais os valores estimados do número de árvores por classe diamétrica em prognoses, com (a) e sem (b) a utilização da área basal no sistema de equações, não diferiram significativamente dos valores observados para plantio comercial do híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*.

A modelagem da distribuição diamétrica utilizando as variáveis do povoamento, como diâmetro máximo, diâmetro mínimo, diâmetro médio e densidade, em idades atual e futura resultando em um sistema de projeção já haviam sido propostos por Nogueira (2003), e posteriormente foram utilizados por Leite et al. (2005) e Binoti et al. (2010), sendo comprovado eficiência dos mesmos. Os sistemas aqui utilizados incluem, além das variáveis de povoamento previamente mencionadas, a área basal e também foram eficientes. Considerando que os plantios florestais constituem sistemas biológicos dinâmicos que passam por contantes mudanças, essa variável, que também é influenciada pelo crescimento diamétrico e densidade de indivíduos, contribui para a projeção dessas mudanças, sendo importante suporte à tomada de decisões sobre intervenções no povoamento florestal.

1.4 - CONCLUSÃO

A distribuição diamétrica de povoamento comercial de eucalipto projetada com a inclusão de área basal no sistema de equações para projeção dos parâmetros da função Weibull apresenta consistência, além de ser eficiente para, pelo menos, quatro prognoses consecutivas.

1.5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO JÚNIOR, C.A.; NOGUEIRA, G.S.; OLIVEIRA, M.L.R.; MIRANDA, R.O.V.; CASTRO, R.V.O.; PELLI, E. Projeção da distribuição diamétrica de povoamentos de *Eucalyptus* em diferentes amplitudes de classe. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.45, n.11, p.1275-1281, 2010.

BAILEY, R.L.; DELL, T.R. Quantifying diameter distributions with the Weibull function. **Forest Science**, v.19, n.2, p.97-104, 1973.

BINOTI, D.H.B.; LEITE, H.G.; NOGUEIRA, G.S.; SILVA, M.L.M.; GARCIA, S.L.R.; CRUZ, J.P. Uso da função Weibull de três parâmetros em um modelo de distribuição diamétrica para plantios de eucalipto submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, Viçosa, v.34, n.1, p.147-156, 2010.

BURKHART, H.E.; TOMÉ, M. **Modeling forests trees and stands**. Springer, New York, 2012. 459p.

CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 4. ed. Viçosa, MG: UFV, 2013. 605p.

CASTRO, R.V.O.; ARAÚJO, R.A.A.; LEITE, H.G.; CASTRO, A.F.N.M.; SILVA, A.; PEREIRA, R.S.; LEAL, F.A. 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.

CRECHI, E.H. **Efeitos da densidade da plantação sobre a produção, crescimento e sobrevivência de *Araucaria angustifolia* (Bert.) O. Ktze. em Misiones, Argentina**. 1996. 172p. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais). Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 1996.

GOVE, J.H.; FAIRWEATHER, S.E. Maximum likelihood estimation of Weibull function parameters using a general interactive optimizer and grouped data. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.28, n.1, p.61-99, 1989.

GUJARATI, D.N.; PORTER, D.C. **Econometria básica**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011. 924 p.

HÖKKÄ, H.; PIROINEN, M.L.; PENTTILÄ, T. The estimation of basal area - dbh distribution using the Weibull function for drained pine and birch dominated and mixed peatland stands in north Finland. **Folia Forestalia**, v.781, p.1-22, 1991.

LEITE, H.G.; NOGUEIRA, G.S.; CAMPOS, J.C.C.; SOUZA, A.L.; CARVALHO, A. Avaliação de um modelo de distribuição diamétrica ajustado para povoamentos de *Eucalyptus* sp. submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, v.29, n.2, p.271-280, 2005.

LEITE, H.G.; ALCÂNTARA, A.E.M.; BINOTI, D.H.B.; OLIVEIRA NETO, R.R.; SILVA, M.L.M. Comparação entre predição e projeção da distribuição de diâmetros de povoamentos de eucalipto submetidos a desbastes. **Revista Árvore**, v.37, n.2, p.321-328, 2013.

LOETSCH, F.; ZOHRER, F.; HALLER, R.E. Forest inventory. München, BLV Verlagsgesellschaft, 1973, v.2, 472p.

NOGUEIRA, G.S. **Modelagem do crescimento e da produção de povoamentos de *Eucalyptus* sp. e de *Tectona grandis* submetidos a desbaste**. 2003. 132p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003.

NOGUEIRA, G.S.; LEITE, H.G.; CAMPOS, J.C.C.; CARVALHO, F.A.; SOUZA, A.L. Modelo de distribuição diamétrica para povoamentos de *Eucalyptus* sp. submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.29, n.4, p.579-589, 2005.

NOGUEIRA, G.S.; LEITE, H.G.; CAMPOS, J.C.C.; TAKIZAWA, F.H.; COUTO, L. Avaliação de um modelo de distribuição diamétrica ajustado para povoamentos de *Tectona grandis* submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, v.30, n.3, p.377-387, 2006.

PELLI, E.; ARAÚJO JÚNIOR, C.A.; MIRANDA, R.O.V. **Weibull Trunc** (software não registrado).

SIIPILEHTO, J.; SARKKOLA, S.; MEHTÄTALO, L. Comparing regression estimation techniques when predicting diameter distributions of Scots pine on drained peatlands. **Silva Fennica**, Helsinki, v.41, n.2, p.333-349, 2007.

SOARES, T.S.; LEITE, H.G.; SOARES, C.P.B.; VALE, A.B. Procedures for theoretical redistribution of diameters in eucalyptus stands. **Cerne**, Lavras, v.16, n.1, p.68-76, 2010.

SOARES, T.S.; LEITE, H.G.; SOARES, C.P.B.; VALE, A.B. 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, 2011.

SOKAL, R.R.; ROHLF, F.J. **Biometry**: the principles and practice of statistics in biological research. San Francisco: Freeman, 1969. 776p.

STEPKA, T.F.; LISBOA, G.S.; KURCHAITD, S.M. Funções densidade de probabilidade para

a estimativa da distribuição diamétrica em povoamento de *Eucalyptus* sp. na região centro-sul do Paraná. **Ambiência**, v.7, n.3, p.429-439, 2011.

TÉO, S.J.; ROCHA, S.P.; BORTONCELLO, A.C.; PAZ, R.A.; COSTA, R.H. Dinâmica da distribuição diamétrica de povoamentos de *Pinus taeda*, na região de Caçador, SC. **Pesquisa Florestal Brasileira**, Colombo, v.31, n.67, p.183-192, 2011.

CAPÍTULO II – PROJEÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA DE PLANTIO EXPERIMENTAL DE EUCALIPTO SOB DIFERENTES REGIMES DE DESBASTE UTILIZANDO ÁREA BASAL

RESUMO - O objetivo do presente trabalho foi avaliar a eficiência do sistema de equações com inclusão da variável área basal em projetar os parâmetros da função Weibull e modelar a distribuição diamétrica de povoamento de eucalipto sob diferentes regimes de desbaste. Os dados foram coletados de povoamento desbastado do híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*, onde foram removidos 25, 33 e 50% das árvores presentes, além da testemunha sem desbaste. Ajustou-se a função densidade de probabilidade Weibull de dois parâmetros pelo método da máxima verossimilhança e, para a projeção dos parâmetros dessa função utilizou-se um sistema de equações com inclusão da variável área basal. A avaliação do ajuste desse sistema foi feita por meio da análise dos gráficos, de resíduos e das estatísticas de precisão, coeficiente de determinação ajustado e erro padrão da média relativo e os valores estimados e observados comparados por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov. A função Weibull foi aderente para 97% dos ajustes e as estimativas, tanto para variáveis do povoamento como para os parâmetros da função Weibull foram precisas. Os tratamentos mostraram menor tendência de estagnação na medida do aumento da intensidade de desbaste. As prognoses, para 67, 74, 81 e 88 meses, apresentaram 85,7% ou mais parcelas sem diferenças significativas entre valores observados e estimados e o sistema foi mais preciso para os tratamentos sem remoção e com remoção 50% das árvores. A inclusão da área basal no sistema de equações para projeção dos parâmetros da função Weibull é eficiente para a prognose da distribuição diamétrica de povoamentos de eucalipto desbastados.

Palavras-chave: Função Weibull, densidade, classe diamétrica, prognose florestal.

2.1 - INTRODUÇÃO

A madeira proveniente de floresta de eucalipto, caracterizadas pelo rápido crescimento, constitui alternativa para atender os mais diferentes mercados, como por exemplo, energia, celulose e papel, laminados, construção civil e serraria. Dentre os usos mencionados, o último citado é considerado o mais nobre do ponto de vista financeiro, no entanto, a obtenção de árvores com dimensões e qualidade adequadas para esse fim, exige a aplicação de técnicas silviculturais, como emprego do desbaste.

Os desbastes são as colheitas de árvores visando, principalmente, estimular o crescimento dos indivíduos remanescentes, com isso aumentar a produção de madeira comercializável, elevando a rentabilidade do investimento (CARNEIRO et al., 2012), pois a realização do desbaste resulta em melhor distribuição dos fatores de crescimento, como água, luz e nutrientes para as árvores, resultando na obtenção de árvores de grande porte, com madeira de melhor qualidade e maior valor agregado (DIAS et al., 2005).

Para definição quanto ao período ideal de realização e a intensidade do desbaste é necessário conhecer, além do crescimento, também a produção presente e futura dos povoamentos florestais como passo importante para viabilizar o planejamento e o controle da atividade florestal (NOGUEIRA et al., 2001; NOGUEIRA et al., 2005; NOGUEIRA et al., 2006). Neste caso, estudos da modelagem de distribuição diamétrica são os mais recomendados, já que estes são essenciais para o manejo de florestas cuja madeira é destinada a multiprodutos (CLUTTER et al., 1983).

A distribuição diamétrica é um indicador da estrutura do estoque de crescimento e permite elaborar conclusões a respeito da estrutura da floresta (LOETSCH et al., 1973). O conhecimento desta permite inferir sobre o volume total do povoamento, sortimentos e a fase de desenvolvimento do povoamento, sendo fundamental para as análises econômicas e a simulação de regimes de manejo (CLUTTER et al., 1983; CAMPOS; LEITE, 2013).

Os modelos de distribuição diamétrica se baseiam em funções densidade de probabilidade (f.d.p.) que estimam a frequência de árvores nas diferentes classes de diâmetros. Dentre as funções densidade de probabilidade, a função Weibull destaca-se por sua relativa simplicidade de ajuste e flexibilidade para representar diferentes comportamentos de distribuição diamétrica (MIGUEL et al., 2010; NOGUEIRA et al., 2005). Existem vários métodos para se ajustar uma função densidade de probabilidade, porém, em se tratando da

função Weibull, o método da máxima verossimilhança tem sido o mais utilizado (SOARES et al., 2010; SOARES et al., 2011; CAMPOS; LEITE, 2013).

A modelagem de distribuição diamétrica para povoamentos florestais desbastados como eucalipto e teca tem sido realizados nas últimas décadas (LEITE et al., 2005; NOGUEIRA et al., 2005; LEITE et al., 2006a; NOGUEIRA et al., 2006; LEITE et al., 2010; LEITE et al., 2013), sendo comum a utilização das variáveis do povoamento, diâmetro máximo, diâmetro mínimo, diâmetro médio e frequência de árvores por hectare, para projetar distribuições diamétricas futuras, porém, em nenhum desses há inclusão da variável área basal nos sistemas de equações utilizados para projetar os parâmetros da função densidade de probabilidade.

A área basal que fornece o grau de ocupação de determinada área por madeira e é influenciadas pelo espaçamento do povoamento (LEITE et al., 2006b; PACHECO et al., 2015), portanto sua utilização pode contribuir para o aumento da precisão das estimativas de crescimento e produção em povoamentos com espaçamentos ou intensidades de desbastes diferentes. Os fatores que afetam crescimento em diâmetro, dentre outros, espécie, idade e sítio, também afetam a área basal, sendo ambos altamente influenciados pelo espaço vital disponível (SCHNEIDER, 1993), conforme observado por Oliveira Neto et al. (2010) e Lopes et al. (2017) em povoamentos dos gêneros *Corymbia* e *Eucalyptus*.

Assim, o objetivo do presente trabalho foi avaliar a eficiência do sistema de equações com inclusão da variável área basal em projetar os parâmetros da função Weibull e modelar a distribuição diamétrica de povoamento de eucalipto sob diferentes regimes de desbaste.

2.2 - MATERIAL E MÉTODOS

Os dados utilizados neste estudo são oriundos de um plantio experimental do híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*. O povoamento possui aproximadamente 2,1 ha e localiza-se na Reserva Ecológica e Experimental da Universidade de Brasília, Fazenda Água Limpa (FAL), Distrito Federal. O plantio ocorreu entre dezembro de 2008 e janeiro de 2009 e o espaçamento inicial entre as árvores era de aproximadamente 3,0 x 2,0 m.

Aos 60 meses a área experimental foi dividida em quatro partes de mesmo tamanho e então, realizou-se um debaste de forma sistemática dentro de uma mesma fileira. Foram

removidas diferentes percentagens de árvores, sendo: *T0* - sem redução do número de indivíduos, *T25* - redução de 25% no número de indivíduos; *T33* - redução de 33% no número de indivíduos; e *T50* - redução de 25% no número de indivíduos. Cada tratamento foi subdividido em 7 parcelas de 24 x 20 m.

Para projeção do crescimento e produção em nível de distribuição diamétrica, as parcelas foram mensuradas aos 60 meses (antes do desbaste), 67, 74, 81, 88, 95 e 102 meses. Em cada ocasião foram mensurados o diâmetro dos indivíduos a 1,30 m de altura (DAP, em cm), considerando o nível de inclusão de 4,0 cm, com auxílio de uma suta; e altura total (*Ht*, em m) de 50 árvores para cada tratamento. As alturas das demais árvores foram estimadas pelo modelo hipsométrico proposto por Curtis, ajustado por tratamento e em cada idade.

Uma vez obtidos os dados, a sequência foi a seguinte: a) ajuste de uma função densidade de probabilidade para cada parcela, em cada medição; b) obtenção de equações de regressão para estimar os parâmetros da fdp na idade futura, utilizando como variáveis independentes características do povoamento como a área basal; e c) avaliação e validação (aplicação) das equações, conforme sugerido por Campos e Leite (2013).

As árvores, de cada parcela e em cada idade, foram agrupadas em classes com amplitude de 2,0 cm de diâmetro, conforme sugerido por Araújo Júnior et al. (2010), sendo o limite inferior da primeira classe definido com base no diâmetro mínimo. Para descrever a distribuição diamétrica de cada parcela em cada idade foi ajustada a função densidade de probabilidade Weibull de dois parâmetros (Eq. 1) pelo método da máxima verossimilhança, empregando o algoritmo desenvolvido por Gove e Fairweather (1989), por meio do *software Weibull Trunc* (PELLI, ARAÚJO JÚNIOR e MIRANDA, 2007).

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

Em que: $f(X)$ = frequência de árvores na classe de $dapX$; X = centro de classe de diâmetro, em cm; β = parâmetro de escala; γ = parâmetro de forma.

A qualidade dos ajustes foi avaliada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov ($\alpha=0,01$), também por meio do *software Weibull Trunc* (PELLI, ARAÚJO JÚNIOR e MIRANDA, 2007), a fim de verificar a aderência da função Weibull aos dados observados. Esse teste

consiste no cálculo da máxima diferença entre a frequência acumulada observada e a frequência acumulada estimada, sendo a classe de maior divergência a estatística do teste (dn) (Eq. 2) e, em seguida, esse valor é comparado com o valor tabelado ao nível de 1% significância (SOKAL; ROHLF, 1981). Neste teste quanto maior o valor de dn , maior é a divergência entre os valores reais e os valores estimados pela função. A expressão de dn é dada por:

$$dn = MAX|F(X) - S(X)| \quad (2)$$

Em que: $S(X)$ é a frequência acumulada observada e $F(X)$ é a frequência estimada pela função Weibull.

A redistribuição teórica dos diâmetros por classe ou recuperação da distribuição diamétrica foi realizada por meio da alternativa tradicional de correlacionar parâmetros da função com características do povoamento. Essa correlação foi feita por meio de regressão linear, sendo as variáveis dependentes os parâmetros da função Weibull em uma idade futura e, como variáveis independentes, os parâmetros desta mesma função em uma idade atual e as características do povoamento em idades atual e futura.

Os seguintes atributos do povoamento foram utilizados: idade, diâmetro máximo, diâmetro mínimo, diâmetro médio, número de árvores, área basal e combinações dessas variáveis. O sistema de equações utilizado para projetar os parâmetros da função densidade de probabilidade (fdp) Weibull foi baseado nos sistemas propostos por Nogueira (2003) e Binoti et al. (2010), com adaptações e inclusão da variável área basal (Eq. 3 a 9). Foram ajustadas cinco equações para cada variável, sendo a melhor selecionada para compor o sistema de equações. Para ajustar as equações utilizou-se o Método dos Mínimos Quadrados Ordinários (GUJARATI; PORTER, 2011). O sistema de equações selecionado foi:

$$B_2 = c_0 + c_1 B_1 + c_2 d \max_1 + \varepsilon \quad (3)$$

$$d \max_2 = c_0 + c_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) d \max_1 + c_2 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) B_1 + \varepsilon \quad (4)$$

$$d \min_2 = c_0 + c_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) d \min_1 + c_2 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) B_1 + \varepsilon \quad (5)$$

$$q_2 = c_0 + c_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) q_1 + c_2 d \max_1 + c_3 B_1 + \varepsilon \quad (6)$$

$$N_2 = c_0 + c_1 \cdot N_1 + c_2 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) B_1 + c_3 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) (d \max_1 - q_1) + \varepsilon \quad (7)$$

$$\beta_2 = c_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) \beta_1 + c_2 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) (d \max_1 - q_1) + c_3 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) B_1 + \varepsilon \quad (8)$$

$$\gamma_2 = c_1 \gamma_1 + c_2 (I_1)^{-1} + c_3 B_1 + \varepsilon \quad (9)$$

Em que: I_1 e I_2 são as idades atual e futura, em meses; B_1 e B_2 são as áreas basais nas idades atual (1) e futura (2), em $\text{m}^2 \cdot \text{ha}^{-1}$; $d \max_1$ e $d \max_2$ são os diâmetros máximos nas idades atual (1) e futura (2), em cm; $d \min_1$ e $d \min_2$ são os diâmetros mínimos nas idades atual (1) e futura (2), em cm; q_1 e q_2 são os diâmetros médios nas idades atual (1) e futura (2); N_1 e N_2 são as frequências de árvores por hectare nas idades atual (1) e futura (2); β_1 e β_2 são os parâmetros de escala da função Weibull nas idades atual (1) e futura (2); γ_1 e γ_2 são os parâmetros de forma da função Weibull nas idades atual (1) e futura (2); c_i são os parâmetros dos modelos e ε é o erro aleatório.

O ajuste do sistema de equações e da função Weibull foi realizado utilizando dados das cinco primeiras avaliações (aos 60, 67, 74, 81 e 88 meses) e a validação foi realizada com dados das duas últimas avaliações (aos 95 e 102 meses). Para identificar possíveis inconsistências nas estimativas das variáveis, além da distribuição gráfica dos resíduos, foram obtidas as estatísticas de coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$) (Eq. 10) e erro padrão da média relativo ($S_{y.x\%}$) (Eq. 11), definidos por:

$$R^2_{aj.} = 1 - \left(\frac{n-1}{n-p-1} \right) \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \right) \quad (10)$$

$$S_{y.x\%} = \frac{\sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-p-1}}}{\bar{y}} \times 100 \quad (11)$$

Em que: n é o número de observações; y_i são os valores observados para as variáveis; \hat{y}_i são os valores estimados para as variáveis; \bar{y} é o valor médio observado para as variáveis; $n-p-1$

corresponde ao grau de liberdade dos resíduos da equação.

A distribuição diamétrica foi projetada a partir dos dados de medição realizada em uma primeira ocasião para a idade seguinte e assim sucessivamente até a última idade de cada parcela. Em seguida os valores estimados foram comparados com os valores observados por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov ($\alpha = 0,01$).

A partir do tratamento sem desbaste realizou-se a simulação das intensidades de desbaste sistemático de 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60 e 70% das árvores. Após simulação de intensidade de desbaste ajustou-se novamente a função Weibull e os parâmetros da função obtidos foram projetados para as idades de 67, 74, 81, 88, 95, 102, 109 e 116 meses, obtendo a distribuição diamétrica nessas idades.

2.3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

A frequência de árvores por classe de diâmetro foi obtida pelo ajuste da função densidade de probabilidade (f.d.p) Weibull de dois parâmetros pelo método da máxima verossimilhança foi estimada para cada parcela em cada idade, totalizando 130 ajustes. Estes ajustes foram avaliados pelo teste de Kolmogorov-Smirnov ao nível de significância de 1% e observou-se que a função Weibull foi aderente para 97% das parcelas.

As equações utilizadas para projetar as variáveis do povoamento e os parâmetros da função Weibull apresentaram coeficientes de determinação ajustados ($R^2_{aj.}$) igual ou maiores do que 0,93, considerando que essa estatística indica a proporção da soma de quadrados total que é explicada pela regressão (GUJARATI; PORTER, 2011; CAMPOS; LEITE, 2013), pode-se inferir que variáveis independentes utilizadas nas equações têm grande influência nas variáveis dependentes, assim como observado por Nogueira (2003). O erro padrão da média relativo ($S_{y,x}\%$), que mede a variação das observações quanto à curva de regressão, foi máximo de 3,46% para equações ajustadas para variáveis do povoamento e de máximo 10% para equações ajustadas para os parâmetros da função Weibull, β e γ , indicando bom ajuste das equações (Tabela 2.1).

Tabela 2.1. Coeficientes das equações ajustadas para as variáveis do povoamento: área basal (B_2), *DAP* máximo ($d_{\max 2}$), *DAP* mínimo ($d_{\min 2}$), diâmetro médio (q_2) e frequência (N_2 , árvores.ha⁻¹); e parâmetros da função Weibull: beta (β_2) e gama (γ_2) em idade futura e suas respectivas estatísticas de coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$) e erro padrão da média relativo ($S_{y,x}$ %).

| Variáveis | C_0 | C_1 | C_2 | C_3 | $R^2_{Aj.}$ | $S_{y,x}$ (%) |
|--------------|--------|--------|---------|---------|-------------|---------------|
| B_2 | 3,7393 | 0,9696 | -0,3001 | - | 0,97 | 3,16 |
| $d_{\max 2}$ | 7,7310 | 0,7970 | -0,5031 | - | 0,86 | 2,42 |
| $d_{\min 2}$ | 0,8763 | 1,0458 | -0,0232 | | 0,97 | 3,46 |
| q_2 | 5,2048 | 0,7997 | -0,0255 | -0,2717 | 0,94 | 1,18 |
| N_2 | 3,3565 | 1,0042 | -3,3074 | -2,2942 | 0,99 | 0,50 |
| β_2 | - | 0,9529 | 3,5471 | 0,2942 | 0,98 | 8,94 |
| γ_2 | - | 0,7892 | 60,2045 | -0,0016 | 0,98 | 10,00 |

As estimativas obtidas pelo sistema de equações selecionado, composto de equações para estimar a área basal, diâmetro máximo, diâmetro mínimo, diâmetro médio e frequência de árvore por hectare em idade futura, apresentaram dispersão de resíduos baixa, homocedástica e com distribuição normal, ou seja, as estimativas foram realizadas com alta precisão, sendo pequenas as diferenças entre valores estimados e observados (Figura 2.1).

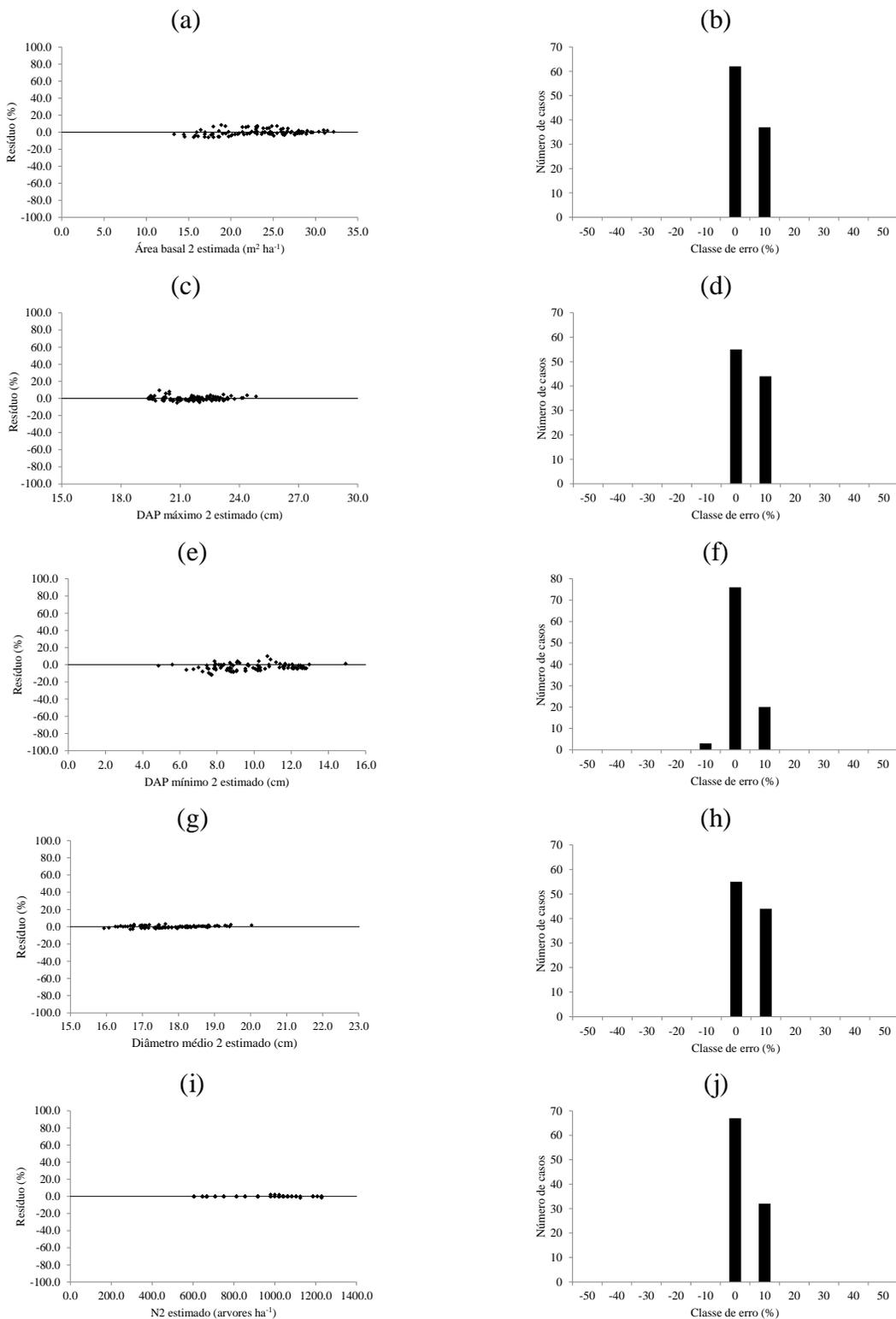


Figura 2.1. Gráficos de dispersão e histogramas da distribuição de resíduos para estimativas da área basal (a, b), diâmetro máximo (c, d), diâmetro mínimo (e, f), diâmetro médio (g, h) e frequência de árvores por hectare (i, j) em uma idade futura de plantio experimental do híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* sob diferentes regimes de desbaste.

O parâmetro Beta e Gama da função Weibull foram estimados com menor precisão do que as variáveis do povoamento, apresentando maior dispersão e distribuição de resíduos menos homocedástica (Figura 2.2), comportamento semelhante têm sido observado por outros autores em trabalhos com *Eucalyptus* sp., especialmente quando para o parâmetro Gama (BINOTI et al., 2010; NOGUEIRA et al., 2005; LEITE et al., 2013; CASTRO et al., 2016).

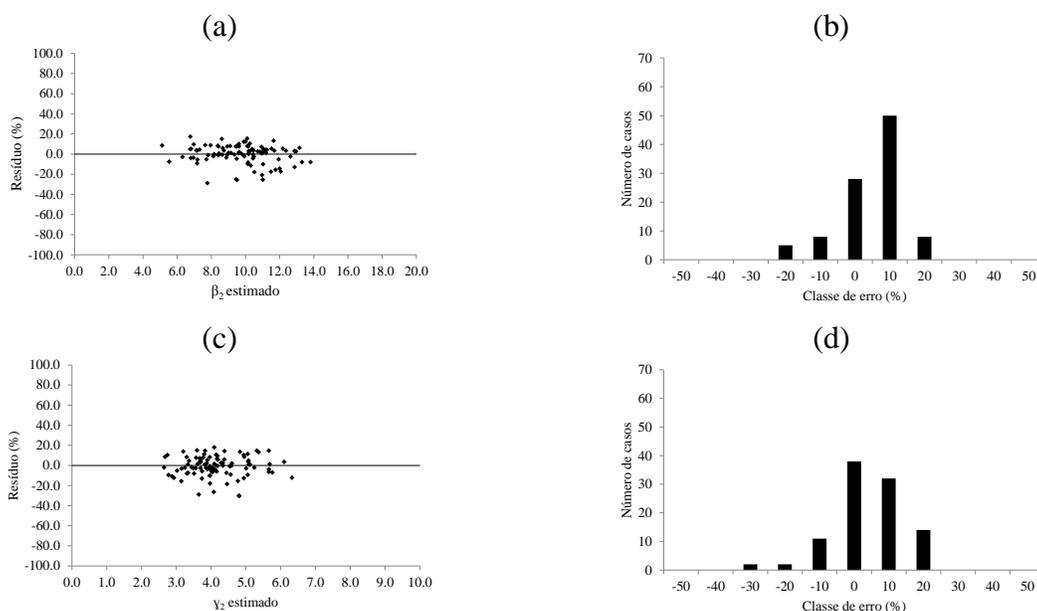


Figura 2.2. Gráficos de dispersão e histogramas da distribuição de resíduos para as estimativas dos parâmetros Beta (β) (a, b) e Gama (γ) (c, d) da função Weibull em uma idade futura, de plantio experimental do híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* sob diferentes regimes de desbaste.

Em cada intensidade de desbaste (tratamento) uma parcela foi escolhida aleatoriamente para representar a distribuição diamétrica em cada uma das prognoses. O comportamento observado para essas distribuições corrobora com a teoria, de acordo com a qual essas tendem a se achatar e deslocar para direita, sendo essa a característica natural da distribuição diamétrica para povoamentos equiâneos (NOGUEIRA et al., 2001; LEITE et al., 2005).

O tratamento sem desbaste apresenta menor achatamento e deslocamento das curvas para a direita, essa situação ocorre devido ao fato das árvores desse tratamento estarem submetidas à maior competição, e nessas condições as árvores crescem menos. (Figura 2.3a). O tratamento com remoção de 25% dos indivíduos apresentou maior crescimento de 67 para 74 meses, a prognose para demais idades apresenta tendência de estagnação do crescimento

(Figura 2.3b). Já o desbaste de 33%, a tendência de estagnação do crescimento foi observada de 81 para 88 meses (Figura 2.3c).

No tratamento sem redução do número de árvores a competição, por fatores de crescimento como água, luz e nutrientes, não foi reduzida e contribuiu para um menor crescimento, que caracterizado pela migração das árvores de uma classe diamétrica para outra. Para os desbastes de 25 e 33% do número de árvores, os indivíduos remanescentes se beneficiaram da redução da competição e cresceram a maiores taxas até os 74 e 81 meses, respectivamente.

Para o desbaste de 50% o crescimento e consequente mudança de classe diamétrica foram mais pronunciados. Além disso, mesmo na quarta prognose, esse tratamento não mostrou tendência de estagnação do crescimento, pois a quantidade de árvores removidas proporcionou a maior redução da competição e com isso pode-se observar taxas de ingresso constantes, e altas, em classes diamétricas sucessivas até a quarta prognose (Figura 2.3d).

O comportamento observado em cada tratamento reflete a tendência biológica esperada de que a redução progressiva e racional do número de árvores ou área basal (retirada excessiva acarretará a subutilização do espaço) reduz também a competição entre as árvores e consequentemente a retomada do crescimento dos indivíduos remanescentes, principalmente em diâmetro (AGUIAR et al., 1995).

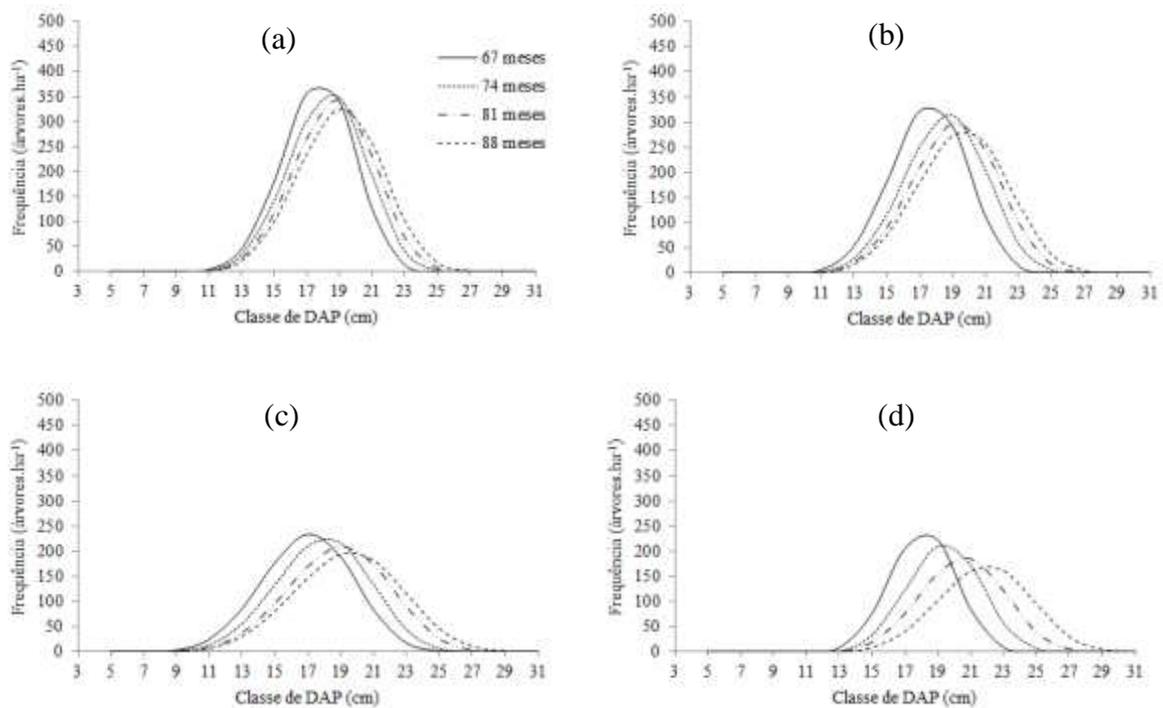


Figura 2.3. Distribuição diamétrica estimada aos 67, 74, 81 e 88 meses de um plantio experimental do híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* sem desbaste (a) e com desbaste de 25 (b), 33 (c) e 50% (d) dos indivíduos.

A qualidade das estimativas obtidas é corroborada pela validação do sistema de equações utilizado a partir de dados de 95 e 102 meses (Figura 2.4). Em 90,4% das parcelas a diferença entre distribuições observadas e estimadas foram não significativas, sendo de 92,4% e 88,5% para as idades de 95 e 102 meses, respectivamente.

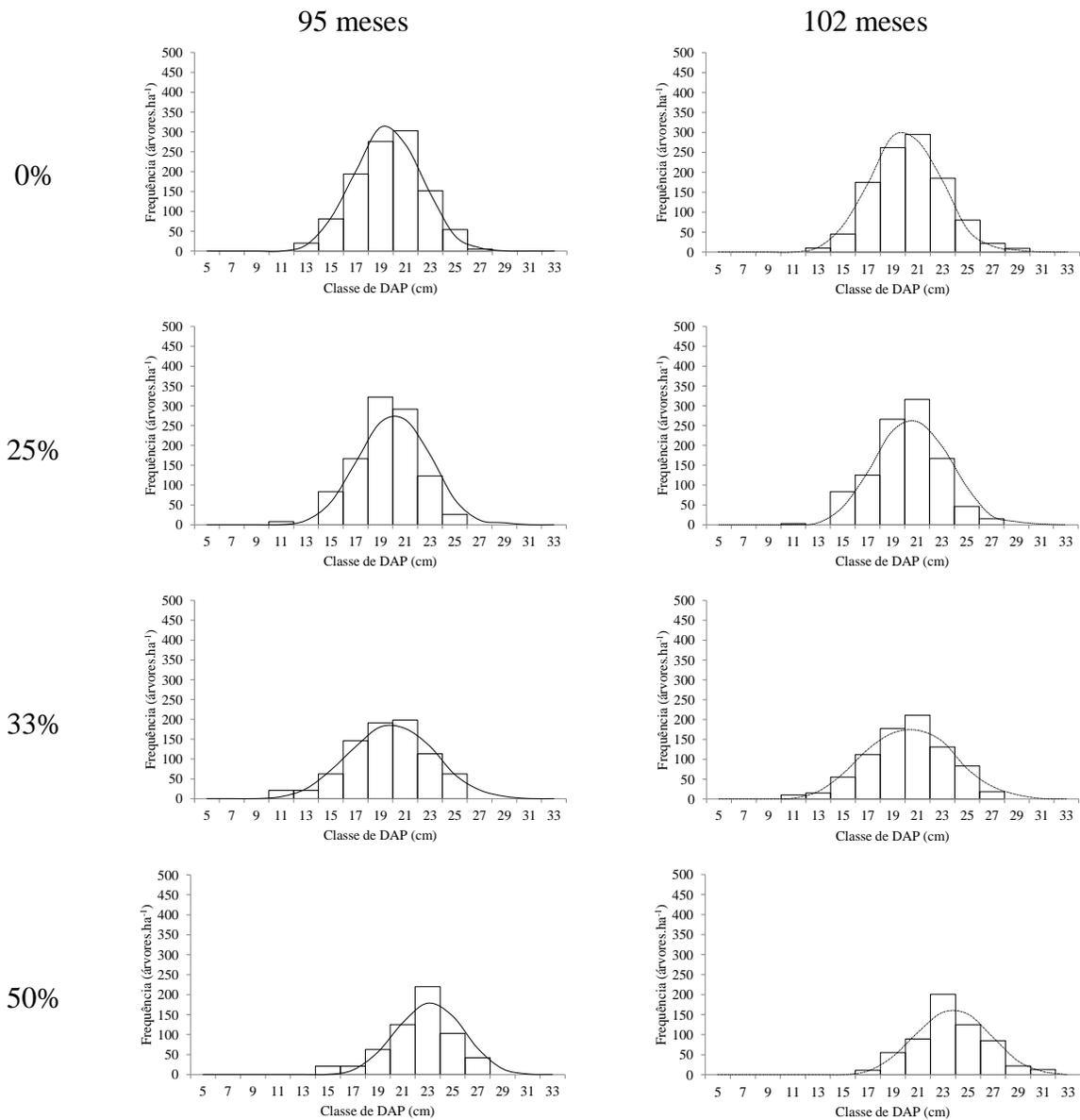


Figura 2.4. Validação do sistema de equações utilizando dados de 95 e 102 meses de um plantio experimental do híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* sem desbaste e com desbaste de 25, 33 e 50% dos indivíduos. Linhas representam a distribuição diamétrica estimada; barras representam a distribuição diamétrica observada.

As prognoses do crescimento para tratamentos sem debaste e daquele com remoção de 50% das árvores tiveram 100% das parcelas apresentando diferenças não significativas entre valores observados e estimados de número de árvores por classe de diâmetro, para as quatro prognoses realizadas. Para a remoção de 25% das árvores, todas as parcelas apresentaram de diferenças não significativas nas duas primeiras prognoses, e para prognoses subsequentes esse valor foi 14,3% menor. Já o debaste de 33% apresentou 85,7% de diferenças não significativas para as quatro prognoses (Figura 2.5).

Para povoamento de híbrido *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* não debastados e utilizando a variável índice de local no sistema de equações de projeção dos parâmetros da função Weibull, Castro et al. (2016) obtiveram, a partir da segunda prognose, menores percentagens médias de diferenças não significativas do que as obtidas no presente trabalho.

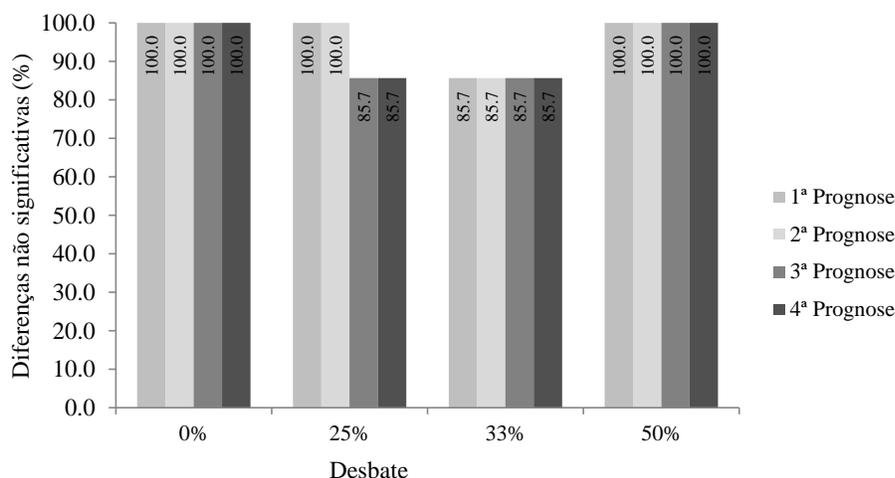


Figura 2.5. Percentagem de parcelas nas quais os valores estimados do número de árvores por classe diamétrica na 1ª, 2ª, 3ª e 4ª prognoses não diferiram significativamente dos valores observados para plantio experimental do híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* sem debaste e com debaste de 25, 33 e 50% dos indivíduos.

O debaste sistemático proporcionou uma equivalência, já esperada, entre redução da percentagem de indivíduos e a redução da percentagem de área basal (Figura 2.6), e considerando tal coerência, para realização das simulações de debastes aplicou-se a mesma taxa de redução para o número de árvores e área basal.

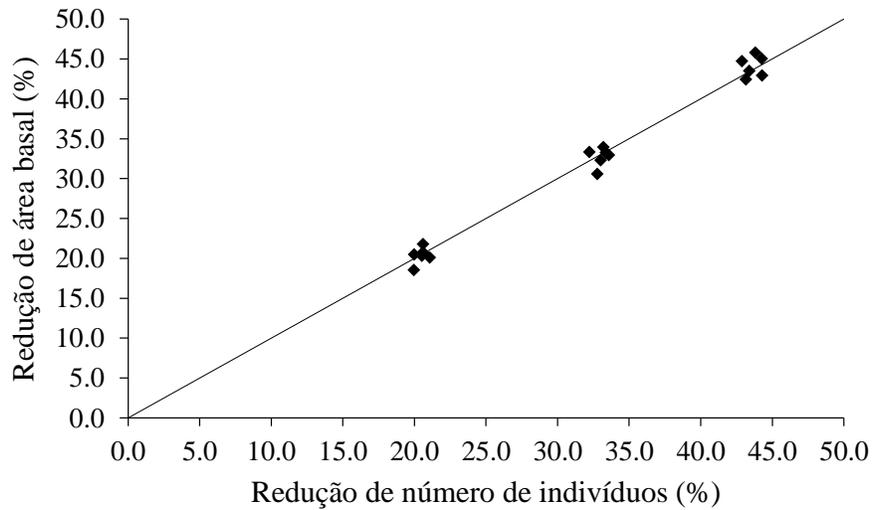


Figura 2.6. Representação gráfica da proporção média entre redução de árvores e redução de área basal em plantio experimental do híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis*.

A figura 2.7 apresenta simulações de diferentes intensidades de desbastes, demonstrando a aplicabilidade sistema de equações com inclusão de área basal para projetar as distribuições diamétricas para povoamentos naquelas condições e de forma eficiente.

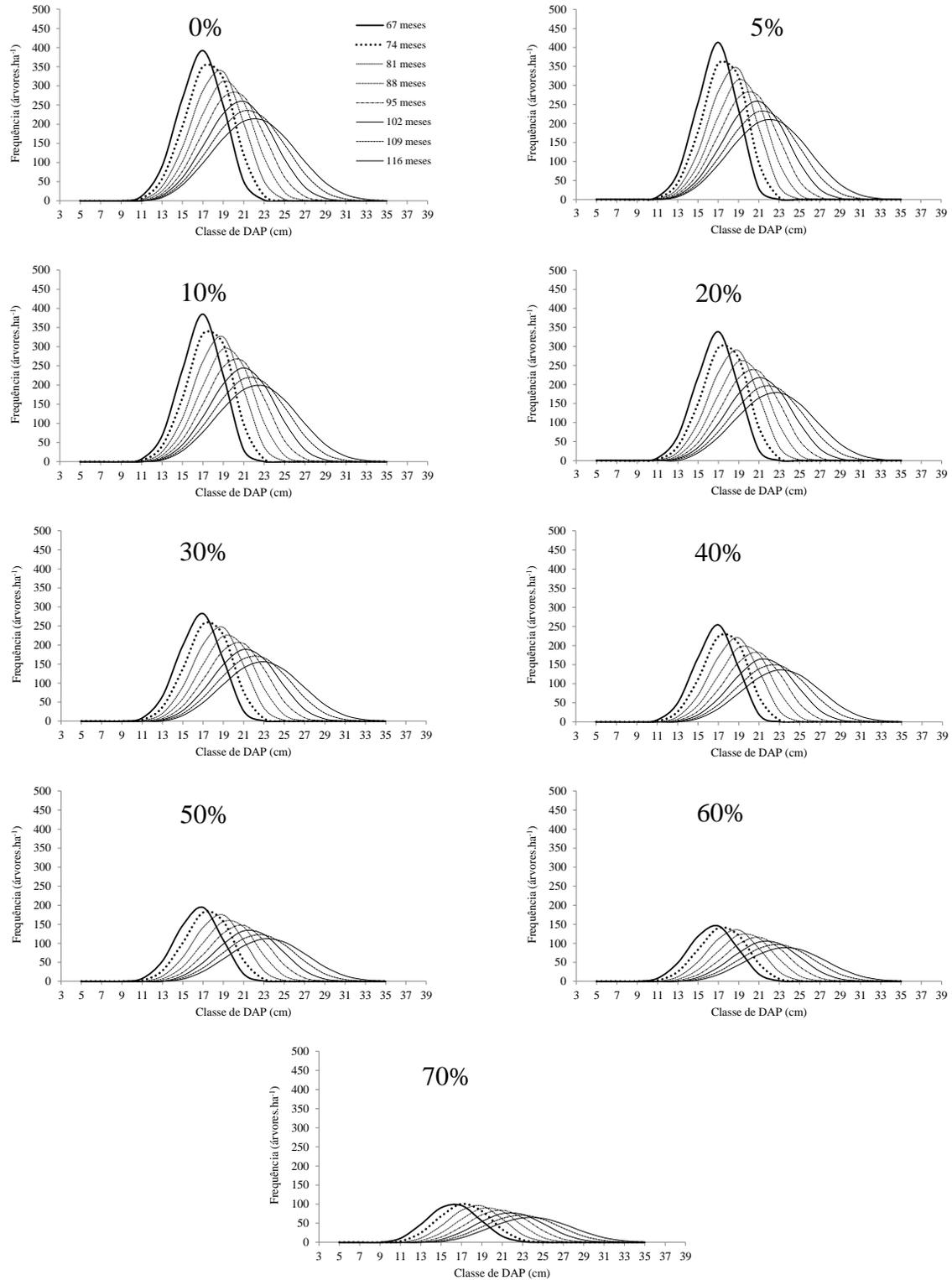


Figura 2.7. Simulação da distribuição diamétrica aos 67, 74, 81, 88, 95, 102, 109 e 116 meses de plantio experimental do híbrido de *Eucalyptus urophylla* x *Eucalyptus grandis* submetido ao desbaste de 5, 10, 20, 30, 40, 50, 60 e 70% dos indivíduos.

Sabendo-se que a eficiência com a qual das estimativas geradas pelos modelos de distribuição diamétricas usuais é dependente da qualidade dos dados utilizados e da qualidade do ajuste das equações que compõem o modelo, e considerando ainda a qualidade das estimativas de cada variável aqui obtida, a inclusão da área basal nas equações que compõem o sistema utilizado contribui para realização de prognoses precisas, que representam um comportamento biologicamente consistente das distribuições diamétricas.

2.4 - CONCLUSÃO

A inclusão da área basal no sistema de equações para projeção dos parâmetros da função Weibull é eficiente para a progrose da distribuição diamétrica de plantio experimental de eucalipto desbastado, em condições semelhantes àquelas do presente estudo.

2.5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

AGUIAR, I.B.; VALERI, S.V.; SPINELLI, P.; SARTORI FILHO, A.; PIRES, C.A.M. Efeito de intensidades de desbaste sobre o crescimento em altura e diâmetro de *Eucalyptus citriodora* Hook. **IPEF**, n.48/49, p.1-7, 1995.

ARAÚJO JÚNIOR, C.A.; NOGUEIRA, G.S.; OLIVEIRA, M.L.R.; MIRANDA, R.O.V.; CASTRO, R.V.O.; PELLI, E. Projeção da distribuição diamétrica de povoamentos de *Eucalyptus* em diferentes amplitudes de classe. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.45, n.11, p.1275-1281, 2010.

BINOTI, D.H.B.; LEITE, H.G.; NOGUEIRA, G.S.; SILVA, M.L.M.; GARCIA, S.L.R.; CRUZ, J.P. Uso da função Weibull de três parâmetros em um modelo de distribuição diamétrica para plantios de eucalipto submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, Viçosa, v.34, n.1, p.147-156, 2010.

CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 4. ed. Viçosa, MG: UFV, 2013. 605 p.

CASTRO, R.V.O.; ARAÚJO, R.A.A.; LEITE, H.G.; CASTRO, A.F.N.M.; SILVA, A.; PEREIRA, R.S.; LEAL, F.A. 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.C.; FORTSON, J.C.; PIENAAR, L.V.; BRISTER, G.H.; BAILEY, R.L. **Timber management: a quantitative approach**. 3. ed. New York: John Willey & Sons, 1983. 333p.

DIAS, A.N.; LEITE, H.G.; CAMPOS, J.C.C.; COUTO, L.; CARVALHO, A.F. Emprego de um modelo de crescimento e produção em povoamentos desbastados de Eucalipto. **Revista**

Árvore, v.29, n.5, p.731-739, 2005.

GOVE, J.H.; FAIRWEATHER, S.E. Maximum likelihood estimation of Weibull function parameters using a general interactive optimizer and grouped data. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.28, n.1, p.61-99, 1989.

GUJARATI, D.N.; PORTER, D.C. **Econometria básica**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011. 924p.

LEITE, H.G.; NOGUEIRA, G.S.; CAMPOS, J.C.C.; SOUZA, A.L.; CARVALHO, A. Avaliação de um modelo de distribuição diamétrica ajustado para povoamentos de *Eucalyptus* sp. submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, v.29, n.2, p.271-280, 2005.

LEITE, H.G.; NOGUEIRA, G.S.; CAMPOS, J.C.C.; TAKIZAWA, F.H.; RODRIGUES, F.L. 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.

LEITE, H.G.; NOGUEIRA, G.S.; MOREIRA, A.M. Efeito do espaçamento e da idade sobre variáveis de povoamentos de *Pinus taeda* L. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.30, n.4, p.603-612, 2006b.

LEITE, H.G.; BINOTI, D.H.B.; GUIMARÃES, D.P.; SILVA, M.L.M.; GARCIA, S.L. Avaliação do ajuste das funções Weibull e hiperbólica a dados de povoamentos de eucalipto submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, v.34, n.2, p.305-311, 2010.

LEITE, H.G.; ALCÂNTARA, A.E.M.; BINOTI, D.H.B.; OLIVEIRA NETO, R.R.; SILVA, M.L.M. Comparação entre predição e projeção da distribuição de diâmetros de povoamentos de eucalipto submetidos a desbastes. **Revista Árvore**, v.37, n.2, p.321-328, 2013.

LOETSCH, F.; ZOHRER, F.; HALLER, R.E. Forest inventory. München, BLV Verlagsgesellschaft, 1973. v.2. 472p.

LOPES, E.D.; LAIA, M.L.; SANTOS, A.S.; SOARES, G.M.; LEITE, R.W.P.; MARTINS, N.S. Influência do espaçamento de plantio na produção energética de clones de *Corymbia* e *Eucalyptus*. **Floresta**, v.47, n.1, p.95-104, 2017.

MIGUEL, E.P.; MACHADO, S.A.; FIGUEIREDO FILHO, A.; ARCE, J.E. Using the Weibull function for prognosis of yield by diameter class in *Eucalyptus urophylla* stands. **Cerne**, Lavras, v.16, n.1, p.94-104, 2010.

NOGUEIRA, G.S.; LEITE, H.G.; CAMPOS, J.C.C.; SOUZA, A.L.; COUTO, L. Determinação da idade técnica de desbaste em plantações de eucalipto utilizando o método dos ingressos percentuais. **Scientia Forestalis**, n.59, p.51-59, 2001.

NOGUEIRA, G.S. **Modelagem do crescimento e da produção de povoamentos de *Eucalyptus* sp. e de *Tectona grandis* submetidos a desbaste**. 2003. 132p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003.

NOGUEIRA, G.S.; LEITE, H.G.; CAMPOS, J.C.C.; CARVALHO, F.A.; SOUZA, A.L. Modelo de distribuição diamétrica para povoamentos de *Eucalyptus* sp. submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.29, n.4, p.579-589, 2005.

NOGUEIRA, G.S.; LEITE, H.G.; CAMPOS, J.C.C.; TAKIZAWA, F.H.; COUTO, L. Avaliação de um modelo de distribuição diamétrica ajustado para povoamentos de *Tectona grandis* submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, v.30, n.3, p.377-387, 2006.

OLIVEIRA NETO, S.N.; REIS, G.G.; REIS, M.G.F.; LEITE, H.G.; NEVES, J.C.L. Crescimento e distribuição diamétrica de *Eucalyptus camaldulensis* em diferentes espaçamentos e níveis de adubação na região de cerrado de Minas Gerais. **Floresta**. Curitiba, v.40, n.4, p.755-762, 2010.

PACHECO, J.M.; FIGUEIREDO FILHO, A.; DIAS, A.N.; MACHADO, S.A.; LIMA, R. Efeito da densidade inicial no crescimento de *Pinus taeda* L. na região Centro Sul do Paraná. **Scientia Forestalis**, v.43, n.106, p.353-365, 2015.

PELLI, E.; ARAÚJO JÚNIOR, C.A.; MIRANDA, R.O.V. **Weibull Trunc** (software não registrado).

SCHNEIDER, P.R. **Introdução ao manejo florestal**. Santa Maria: UFSM/CEPEF-FATEC, 1993. 348p

SOARES, T.S.; LEITE, H.G.; SOARES, C.P.B.; VALE, A.B. Comparação de diferentes abordagens na modelagem da distribuição diamétrica. **Floresta**, v.40, n.4, p.731-738, 2010.

SOARES, T.S.; LEITE, H.G.; SOARES, C.P.B.; VALE, A.B. 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, 2011.

SOKAL, R.R.; ROHLF, F.J. **Biometry**: the principles and practice of statistics in biological research. San Francisco: Freeman, 1969. 776 p.

CAPÍTULO III – PROJEÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA DE PLANTIO EXPERIMENTAL DE *Acacia mangium*

RESUMO – O objetivo do presente estudo foi projetar a distribuição diamétrica plantio experimental de *Acacia mangium* utilizando a função Weibull. Os dados utilizados foram obtidos plantio experimental estabelecido no Rio Grande do Norte. Ajustou-se a função Weibull de dois parâmetros pelo método da máxima verossimilhança aos dados agrupados em diferentes amplitudes de classe diamétrica, sendo elas: 0,75; 1,0; 1,5; 2,0 e 3,0 cm. Para a projeção dos parâmetros da função utilizou-se um sistema de equações com inclusão da variável área basal. A avaliação do ajuste desse sistema foi feita por meio da análise dos gráficos de resíduos e das estatísticas de precisão, coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}) e erro padrão da média relativo ($S_{yx\%}$) e os valores estimados e observados comparados por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov. A função Weibull foi aderente em 96% dos casos para as cinco amplitudes de classe estudadas. As variáveis de povoamento foram estimadas de forma precisa pelo sistema de equações, apresentando alto coeficiente de determinação ajustado e baixo erro padrão. A amplitude de 1,0 cm proporcionou estimativas mais precisas nas três prognoses. Para as demais amplitudes, de 0,75, 1,5, 2,0 e 3,0 cm observou-se algum nível de subestimação ou superestimação em classes diamétricas dos extremos. A função Weibull é adequada para descrever a distribuição diamétrica de povoamento em qualquer das amplitudes de classe utilizadas. A prognose da distribuição diamétrica é influenciada pelo valor de amplitude de classe, sendo a amplitude de 1,0 cm a mais adequada para projeção desde idades iniciais.

Palavras-chave: Acácia, função Weibull, área basal

3.1 - INTRODUÇÃO

A *Acacia mangium* é uma espécie natural da região noroeste da Austrália (Queensland), Papua Nova Guiné e leste da Indonésia (LEMMENS et al., 1995), no Brasil possui área plantada de aproximadamente 160 mil hectares (IBÁ, 2017). Em seu habitat natural, alcança de 25 a 30 m de altura e 90 cm de diâmetro à altura do peito (DAP). Geralmente apresenta fuste reto, com ramificações que começam acima da metade da altura total deste. Quando livres de competição, a forma da copa é globular, porém, em plantações onde o espaçamento é menor, apresenta-se cônica (YARED et al., 1990).

A qualidade da madeira produzida em plantios da espécie é adequada à produção de papel, carvão e móveis (LEMMENS et al., 1995). A celulose obtida da madeira de *A. mangium* é semelhante àquela produzida a partir das espécies de eucalipto, com cerca de 20% de lignina, é facilmente branqueável, podendo ser usada para a fabricação de papéis finos. A densidade da madeira da espécie varia entre 0,42 e 0,60 g.cm⁻³ (MACKEY, 1996) e devido à facilidade de manuseio, é utilizada na fabricação de painéis de madeira, construções em geral e utensílios para agricultura. Além disso, a madeira pode ser serrada, polida e plainada facilmente (ROSSI et al., 2003). A espécie apresenta ainda grande potencial para produção de energia, devido ao seu alto poder calorífico (MACKEY, 1996; AZEVEDO et al., 2002).

O potencial dessa espécie para múltipla utilização da madeira sugere a necessidade da realização de estudos do crescimento, visto que, esta informação em nível de árvores e de povoamentos florestais é importante para auxiliar no planejamento florestal, possibilitado a construção e aplicação de modelos de crescimento e produção. Esses modelos são fundamentais para a definição da quantidade de produtos que serão produzidos pela floresta e também para subsidiar análises técnicas e econômicas dos projetos florestais.

Dentre os modelos clássicos de crescimento e produção, merecem destaque os de distribuição diamétrica, uma vez que possibilitam a avaliação econômica de multiprodutos, além de serem flexíveis e pelo grau de associação entre seus parâmetros e atributos dos povoamentos (BAILEY; DELL, 1973; BURKHART et al., 1981; CAMPOS; LEITE, 2013). Os modelos de distribuição diamétrica permitem estimar o crescimento e a produção por classes de tamanho (diâmetro) e têm como característica comum o uso de uma função de densidade de probabilidade para representar a frequência de árvores por hectare em cada classe de diâmetro (CLUTTER et al., 1983), sendo comum o uso da função Weibull (LEITE et

al., 2013; LEITE et al., 2010; SOARES et al., 2010; MIGUEL et al., 2010).

Estudos de modelagem da distribuição diamétrica têm sido abundantemente realizados no Brasil utilizando dados de povoamentos de *Eucalyptus* sp. (CASTRO et al., 2016; ARAÚJO JÚNIOR et al., 2010; BINOTI et al., 2010; NOGUEIRA et al., 2005), *Pinus* sp. (EISFELD et al., 2005; CAO, 2004; SCOLFORO; MACHADO,1996) e *Tectona grandis* (BINOTI et al., 2012; BINOTI et al., 2011; LEITE et al., 2006; NOGUEIRA et al., 2006), entretanto são inexistentes estudos deste tipo para *Acacia mangium*. Assim, o objetivo do presente estudo foi a modelar crescimento e produção em nível de distribuição diamétrica de *Acacia mangium* utilizando a função Weibull, de forma mais específica, avaliar a qualidade de prognoses realizadas desde as idades iniciais em função da variação na amplitude de classe diamétrica e da utilização da variável área basal no sistema de equações.

3.2 - MATERIAL E MÉTODOS

Os dados utilizados foram obtidos de plantio experimental de *Acacia mangium* (Acácia) estabelecido em espaçamento 3,0 x 3,0 m em uma área localizada em Macaíba no estado do Rio Grande do Norte, pertencente à Unidade Acadêmica Especializada em Ciências Agrárias da Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN.

A região do plantio possui topografia plana, apresenta predominantemente Latossolo Amarelo de textura arenosa (BELTRÃO; FREIRE; SANTOS, 1975). O clima local é uma transição entre os tipos As e BSw segundo a classificação de Köppen, com temperatura média ao longo do ano de 27°C, sendo a máxima de 32°C e mínima de 21°C e estação chuvosa de outono e inverno. A precipitação pluviométrica na região varia entre 800 e 1200 mm por ano, sendo caracterizado como clima sub-úmido (IDEMA, 2002).

Foram realizados inventários florestais aos 12, 24, 36 e 48 meses, sendo mensurados os diâmetros a 1,30 m de altura (*DAP*) e as alturas totais (*Ht*) das árvores vivas presentes em uma área útil de aproximadamente 324 m². Para modelagem da distribuição diamétrica de ambas as espécies os dados de *DAP* foram agrupados em classes de cinco diferentes amplitudes, a fim de selecionar aquela que fosse mais adequada à projeção da distribuição nas condições presentes, tais amplitudes foram: 0,75; 1,0; 1,5; 2,0 e 3,0 cm, sendo o limite inferior da primeira classe definido com base no diâmetro mínimo.

Para descrever a distribuição diamétrica de cada parcela em cada idade, foi ajustada a função densidade de probabilidade Weibull de dois parâmetros (Eq. 1) pelo método da máxima verossimilhança, empregando o algoritmo desenvolvido por Gove e Fairweather (1989), por meio do *software Weibull Trunc* (PELLI, ARAÚJO JÚNIOR e MIRANDA, 2007).

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

Em que: $f(x)$ é a frequência de árvores na classe de *DAP*; X é o centro de classe de *DAP*, em cm; β é o parâmetro de escala; γ é o parâmetro de forma.

A qualidade dos ajustes foi avaliada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov ($\alpha=0,01$), também por meio do *software Weibull Trunc* (PELLI, ARAÚJO JÚNIOR e MIRANDA, 2007) a fim de verificar a aderência da função Weibull aos dados. Esse teste consiste no cálculo da máxima diferença entre a frequência acumulada observada e a frequência acumulada estimada, sendo a classe de maior divergência a estatística do teste (dn) (Eq. 2) e, em seguida, esse valor é comparado com o valor tabelado ao nível de significância de 1% (SOKAL; ROHLF, 1981). Neste teste quanto maior o valor de dn , maior é a divergência entre os valores reais e os valores estimados pela função.

$$dn = \text{MAX}|F(X) - S(X)| \quad (2)$$

Em que: $S(X)$ é a frequência acumulada observada e $F(X)$ é a frequência estimada pela função Weibull.

Para o sistema de equações, utilizado para projetar os parâmetros da função densidade de probabilidade (fdp) Weibull, foram selecionados modelos mais eficientes na projeção das variáveis de povoamento, área basal, *DAP* máximo, *DAP* mínimo e frequência de árvores por hectare, para todas as amplitudes de classe estudadas e os modelos mais eficientes para projeção dos parâmetros da função Weibull, β e γ , em cada amplitude de classe (Eq. 3 a 16). Os modelos utilizados foram baseados nos sistemas propostos por Nogueira (2003), com adaptações:

$$B_2 = c_0 + c_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) B_1 + c_2 d \max_1 + \varepsilon \quad (3)$$

$$d \max_2 = c_0 + c_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) d \max_1 + c_2 B_1 + \varepsilon \quad (4)$$

$$d \min_2 = c_0 + c_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) d \min_1 + c_2 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) B_1 + \varepsilon \quad (5)$$

$$N_2 = c_0 + c_1 N_1 + c_2 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) B_1 + \varepsilon \quad (6)$$

$$\beta_2 = c_1 \beta_1 + c_2 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) B_1 + c_3 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) d \max_1 + \varepsilon \quad (7)$$

Amplitude – 0,75 cm

$$\gamma_2 = c_1 \gamma_1 + c_2 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) B_1 + \varepsilon \quad (8)$$

$$\beta_2 = c_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) \beta_1 + c_2 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) B_1 + c_3 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) d \max_1 + \varepsilon \quad (9)$$

Amplitude – 1,0 cm

$$\gamma_2 = c_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) \gamma_1 + c_2 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) B_1 + \varepsilon \quad (10)$$

$$\beta_2 = c_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) \beta_1 + c_2 B_1 + c_3 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) d \max_1 + \varepsilon \quad (11)$$

Amplitude – 1,5 cm

$$\gamma_2 = c_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) \gamma_1 + c_2 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) B_1 + \varepsilon \quad (12)$$

$$\beta_2 = c_1 \beta_1 + c_2 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) B_1 + c_3 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) d \max_1 + \varepsilon \quad (13)$$

Amplitude – 2,0 cm

$$\gamma_2 = c_1 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) \gamma_1 + c_2 B_1 + \varepsilon \quad (14)$$

$$\beta_2 = c_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) \beta_1 + c_3 B_1 + c_3 d \max_1 + \varepsilon \quad (15)$$

Amplitude – 3,0 cm

$$\gamma_2 = c_1 \gamma_1 + c_2 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) B_1 + \varepsilon \quad (16)$$

Em que: I_1 e I_2 são as idades atual (1) e futura (2), em meses; B_1 e B_2 são áreas basais nas

idades atual e futura, em $m^2 ha^{-1}$; $dmax_1$ e $dmax_2$ são os diâmetros máximos nas idades atual e futura, em cm; $dmin_1$ e $dmin_2$ são os diâmetros mínimos nas idades atual e futura, em cm; N_1 e N_2 são as frequências de árvores por hectare nas idades atual e futura; β_1 e β_2 são os parâmetros de escala da função Weibull nas idades atual e futura; γ_1 e γ_2 são os parâmetros de forma da função Weibull nas idades atual e futura; c_i são parâmetros dos modelos.

O ajuste do sistema de equações e da função Weibull foi realizado utilizando dados das medições aos 12, 24, 36 e 48 meses e a avaliação dos modelos foi realizada pela recuperação de parâmetros (NOGUEIRA, 2003; SOARES et al., 2010). Para avaliar a qualidade das estimativas das variáveis, além da distribuição gráfica dos resíduos (Eq. 17), foram obtidas as estatísticas de coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$) (Eq. 18) e erro padrão da média relativo ($S_{y,x\%}$) (Eq. 19), definidos por:

$$resíduo_{\%} = \frac{(Y - \hat{Y})}{Y} \times 100 \quad (17)$$

$$R^2_{aj.} = 1 - \left(\frac{n-1}{n-p-1} \right) \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \right) \quad (18)$$

$$S_{y,x\%} = \frac{\sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-p-1}}}{\bar{y}} \times 100 \quad (19)$$

Em que: n é o número de observações; y_i são os valores observados para as variáveis; \hat{y}_i são valores estimados para as variáveis; \bar{y} é o valor médio observado para as variáveis; $n-p-1$ corresponde ao grau de liberdade dos resíduos da equação.

A distribuição diamétrica foi projetada a partir dos dados de medição realizada em uma primeira ocasião para a idade seguinte e assim sucessivamente até a última idade de cada parcela. Em seguida os valores estimados foram comparados com os valores observados por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov ($\alpha = 0,01$).

A seleção da amplitude de classe mais adequada e que proporcione a melhor modelagem da distribuição diamétrica foi realizada com base na qualidade das estimativas obtidas pela função Weibull, ou seja, menor diferença significativa entre valores observados e estimados.

3.3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

A função Weibull foi aderente em 96% dos casos (parcela-idade) para cada uma das cinco amplitudes de classe de diâmetro estudadas. Os ajustes das equações foram realizados e seus respectivos parâmetros, bem como coeficientes de determinação ajustados ($R^2_{aj.}$) e erro padrão da média relativo ($S_{y,x}\%$) obtidos.

As variáveis independentes utilizadas nos modelos das variáveis de povoamento contribuíram para explicar o comportamento de área basal, *DAP* máximo, *DAP* mínimo e frequência de árvores por hectare, sendo que as três primeiras citadas apresentaram coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$) maior ou igual a 0,93, já frequência apresentou $R^2_{aj.}$ menor que 0,90 (Tabela 1). Erro padrão da média foi menor que 5% para *DAP* máximo frequência, as estimativas de área basal e *DAP* mínimo, por sua vez, apresentaram erros maiores que 8%, respectivamente (Tabela 3.1).

Tabela 3.1. Coeficientes das equações ajustadas para as variáveis do povoamento: área basal (B_2), *DAP* máximo (d_{max2}), *DAP* mínimo (d_{min2}) e frequência (N_2 , árvores.ha⁻¹) em idade futura e suas respectivas estatísticas de coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$) e erro padrão da média relativo ($S_{y,x}\%$).

| Variáveis | C_0 | C_1 | C_2 | $R^2_{Aj.}$ | $S_{y,x} (\%)$ |
|------------|----------|----------|-----------|-------------|----------------|
| B_2 | -0,03059 | -0,37949 | 1,03034 | 0,93 | 10,3 |
| d_{max2} | 6,48170 | 1,39612 | -0,59033 | 0,95 | 4,80 |
| d_{min2} | 3,13211 | 0,83365 | 0,73198 | 0,94 | 8,75 |
| N_2 | 38,14307 | 0,97748 | -12,87575 | 0,83 | 2,78 |

Os parâmetros da função Weibull foram estimados com maior precisão nas menores amplitudes de classe, sendo, os coeficientes de determinação ajustados ($R^2_{aj.}$) foram obtidos com pequena diferença. Para Gama, o erro padrão apresentou tendência de aumento com a variação de amplitude de classe diamétrica, comportamento não observado para Beta. Para Gama, o maior $R^2_{aj.}$ e menor erro padrão foram observados para a amplitude de 0,75 cm. Para Beta, o $R^2_{aj.}$ obtido pelo ajuste do parâmetro pouco variou, de 0,88 – 0,91, o erro padrão da média foi menor para a amplitude 0,75 cm e máximo para a amplitude de 2,0 cm (Tabela 3.2).

Tabela 3.2. Coeficientes das equações ajustadas para os parâmetros Beta e Gama da função Weibull em diferentes amplitudes de classe diamétrica (AC) e suas respectivas estatísticas de coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}) e erro padrão da média relativo ($S_{y,x}$ %)

| Parâmetros | AC | C_1 | C_2 | C_3 | R^2_{aj} | $S_{y,x}$ (%) |
|------------|------|---------|----------|---------|------------|---------------|
| Gama | 0,75 | 2,32755 | 0,14627 | - | 0,92 | 19,90 |
| | 1,00 | 1,92862 | 0,22176 | - | 0,92 | 20,18 |
| | 1,50 | 2,24421 | 0,19819 | - | 0,91 | 21,58 |
| | 2,00 | 2,31410 | 0,16880 | - | 0,90 | 23,96 |
| | 3,00 | 2,33703 | 0,17934 | - | 0,89 | 26,01 |
| Beta | 0,75 | 0,73995 | -0,31371 | 1,04015 | 0,91 | 20,02 |
| | 1,00 | 0,77173 | -0,21631 | 0,84881 | 0,91 | 21,76 |
| | 1,50 | 1,16410 | -0,29619 | 0,46738 | 0,91 | 21,57 |
| | 2,00 | 0,39792 | -0,30469 | 1,53505 | 0,88 | 29,00 |
| | 3,00 | 0,04224 | -0,20075 | 1,99867 | 0,88 | 27,97 |

As estimativas das variáveis de povoamento em idade futura foram obtidas com alta precisão, fator corroborado pela baixa dispersão de resíduos, além da homocedasticidade. Já os parâmetros da função Weibull, Beta e Gama, foram estimados com menor precisão que as variáveis de povoamento, levando a uma distribuição de resíduos mais irregular. (Figura 3.1 e 3.2). As características semelhantes, para o comportamento dos parâmetros da função Weibull já foram observadas por Araújo Júnior et al. (2010) em estudos da projeção da distribuição diamétrica em diferentes amplitudes de classe em povoamentos de eucalipto.

O valor de amplitude de classe de 1,0 cm foi aquele que apresentou maior homocedasticidade, portanto, aquele em que as equações de Beta e Gama proporcionam estimativas não tendenciosas de parâmetros e, conseqüentemente maior precisão na prognose de distribuições diamétricas.

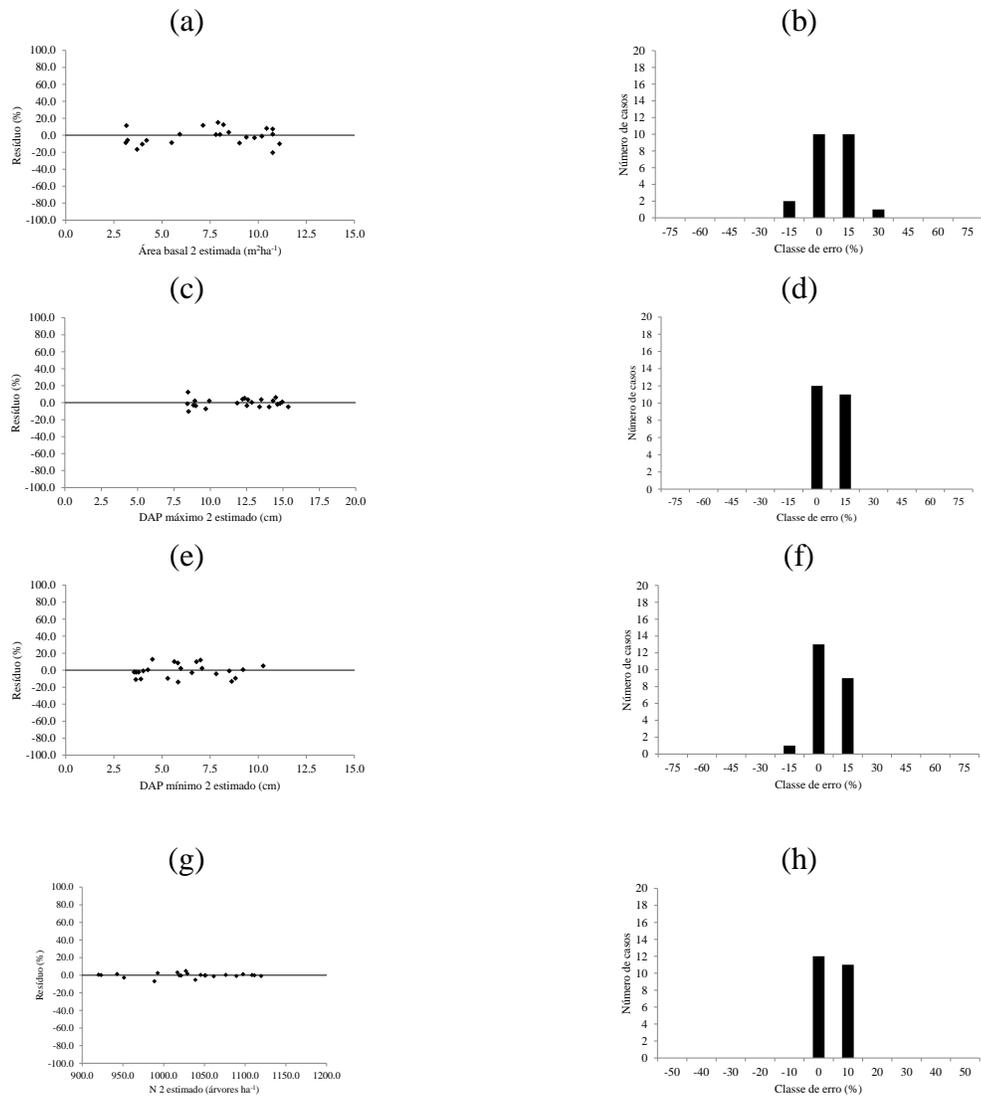
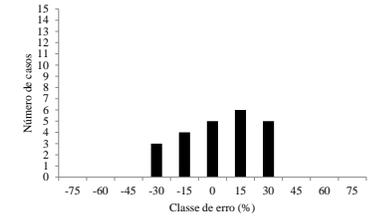
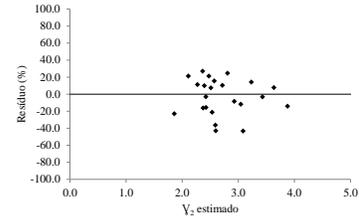
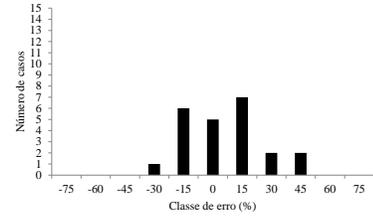
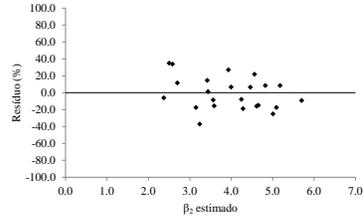
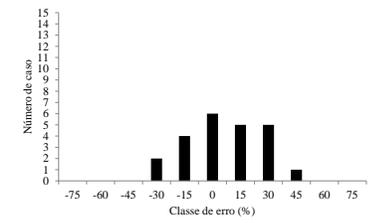
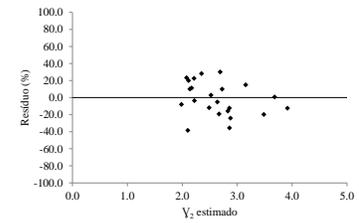
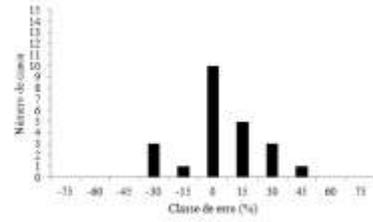
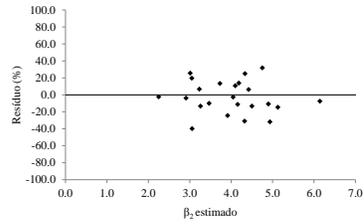


Figura 3.1. Gráficos de dispersão e histogramas da distribuição de resíduos para estimativas da área basal (a, b), DAP máximo (c, d), DAP mínimo (e, f), frequência de árvores por hectare e (g, h) em uma idade futura de plantio experimental de *Acacia mangium* no Rio Grande do Norte.

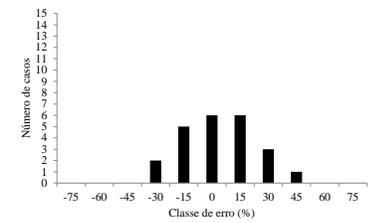
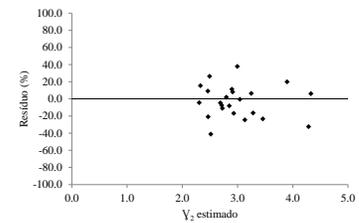
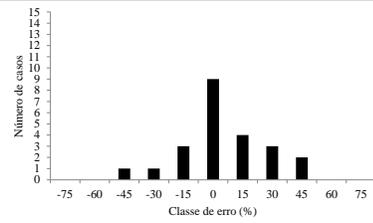
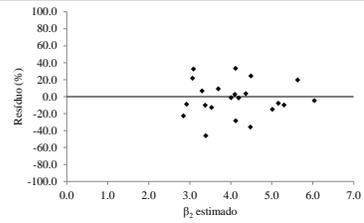
0,75 cm



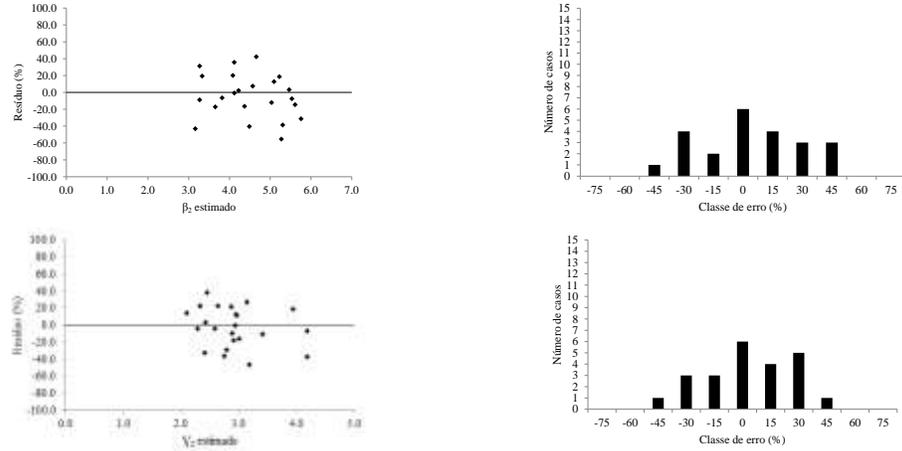
1,0 cm



1,5 cm



2,0 cm



3,0 cm

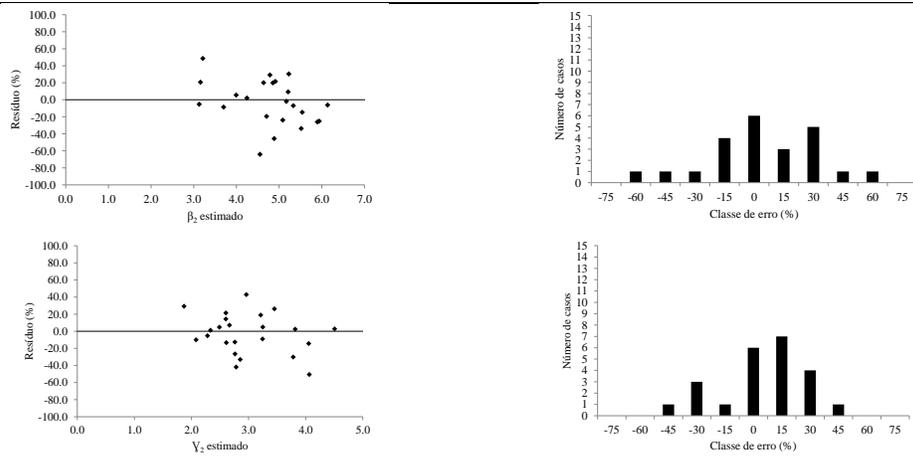


Figura 3.2. Gráficos de dispersão e histogramas da distribuição de resíduos para as estimativas dos parâmetros Beta (β) e Gama (γ) da função Weibull em uma idade futura, para as amplitudes de classe diamétricas de 0,75; 1,0; 1,5; 2,0 e 3,0 cm utilizadas na projeção da distribuição diamétrica de plantio experimental de *Acacia mangium*.

Para representar o comportamento das distribuições diamétricas estimadas nas cinco amplitudes de classe, uma parcela foi selecionada ao acaso. A tendência natural de crescimento é melhor observada para as menores amplitudes de classe, onde têm-se o deslocamento da curva de distribuição diamétrica para a direita com o aumento da idade. (Figura 3.3).

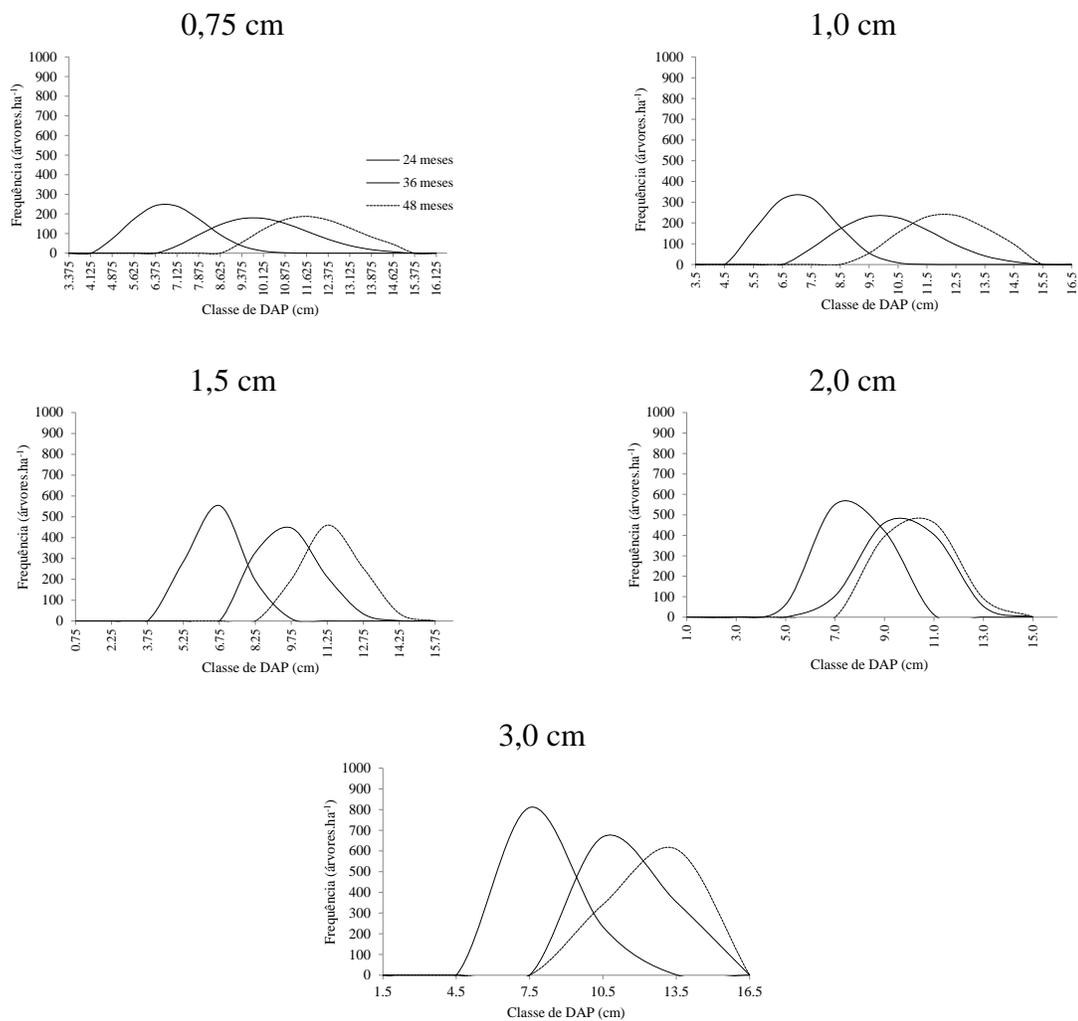


Figura 3.3 – Distribuição diamétrica estimada de plantio experimental de *Acacia mangium* em aos 24, 36 e 48 meses, realizadas para as amplitudes de classe diamétrica de 0,75; 1,0; 1,5; 2,0 e 3,0 cm.

Na comparação entre distribuições observadas e estimadas em cada idade e em cada amplitude de classe diamétrica observou-se que a amplitude de 1,0 cm proporcionou estimativas mais precisas nas três prognoses, enquanto que, para amplitude de 0,75 cm observou-se valores subestimados na terceira prognose, para as amplitudes de 1,5 e 2,0 cm houve subestimação em classes inferiores com consequente superestimação em classes superiores na primeira prognose e, para maior amplitude (3,0 cm) foram obtidas estimativas subestimadas e superestimadas para as três prognoses realizadas (Figura 3.4).

Levando-se em conta que para os dados do povoamento em estudo foram coletados a partir dos 12 meses, fase em que a diferença de crescimento diamétrico não alcança grande diferença, as amplitudes de classe de 0,75 e 1,0 cm proporcionam melhor visualização da

estrutura do povoamento, no entanto para a menor amplitude observa-se a ocorrência de duas modas na distribuição.

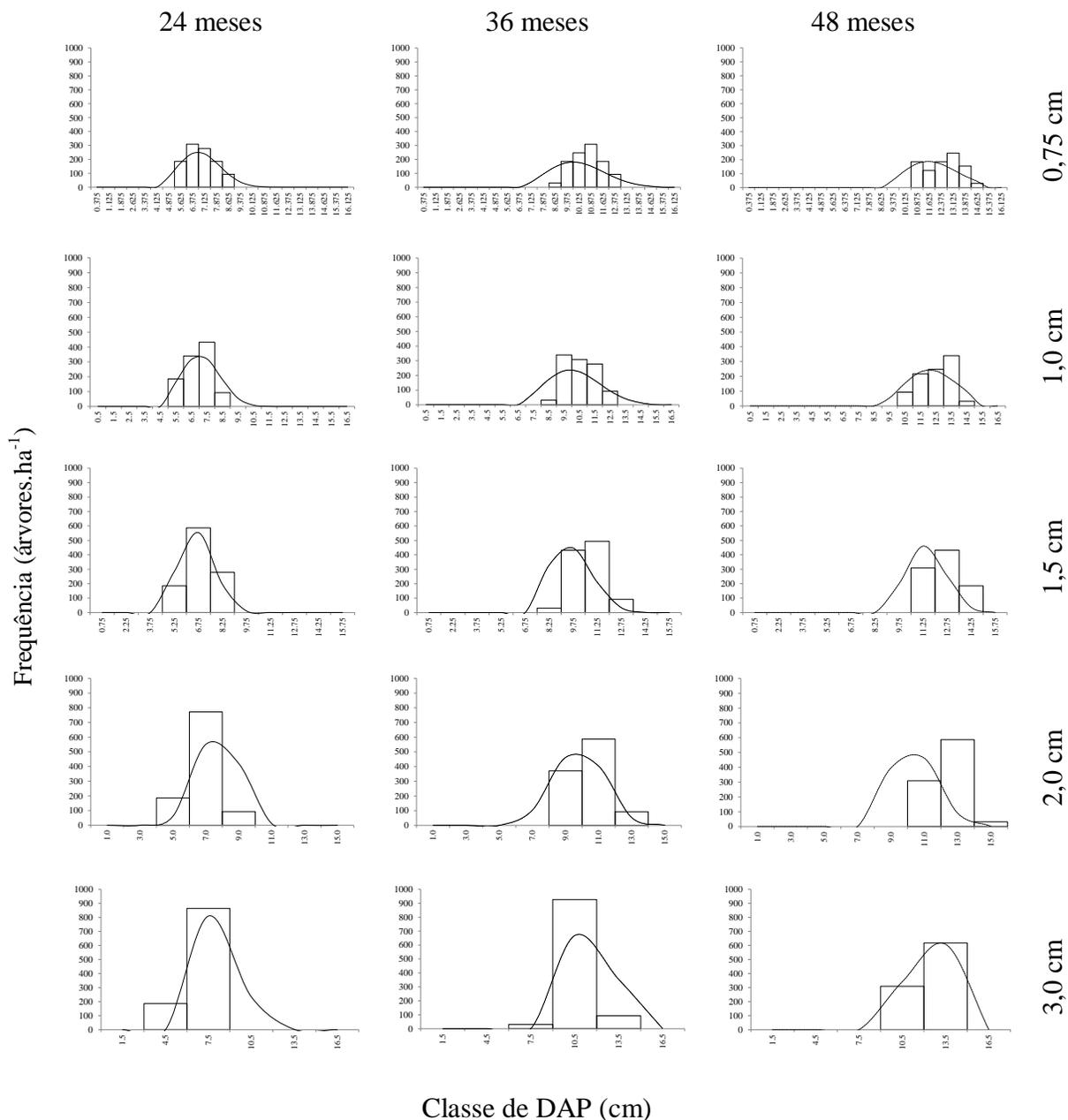


Figura 3.4 – Comparação entre distribuições diamétricas observada (barra) e estimada (linha) de plantio experimental de *Acacia mangium* para amplitudes de classe diamétrica de 0,75; 1,0; 1,5; 2,0 e 3,0 cm, nas idades de 24, 36 e 48 meses.

Na figura 3.5 são apresentados graficos da correlação entre parâmetros da função Weibull estimados e recuperados.

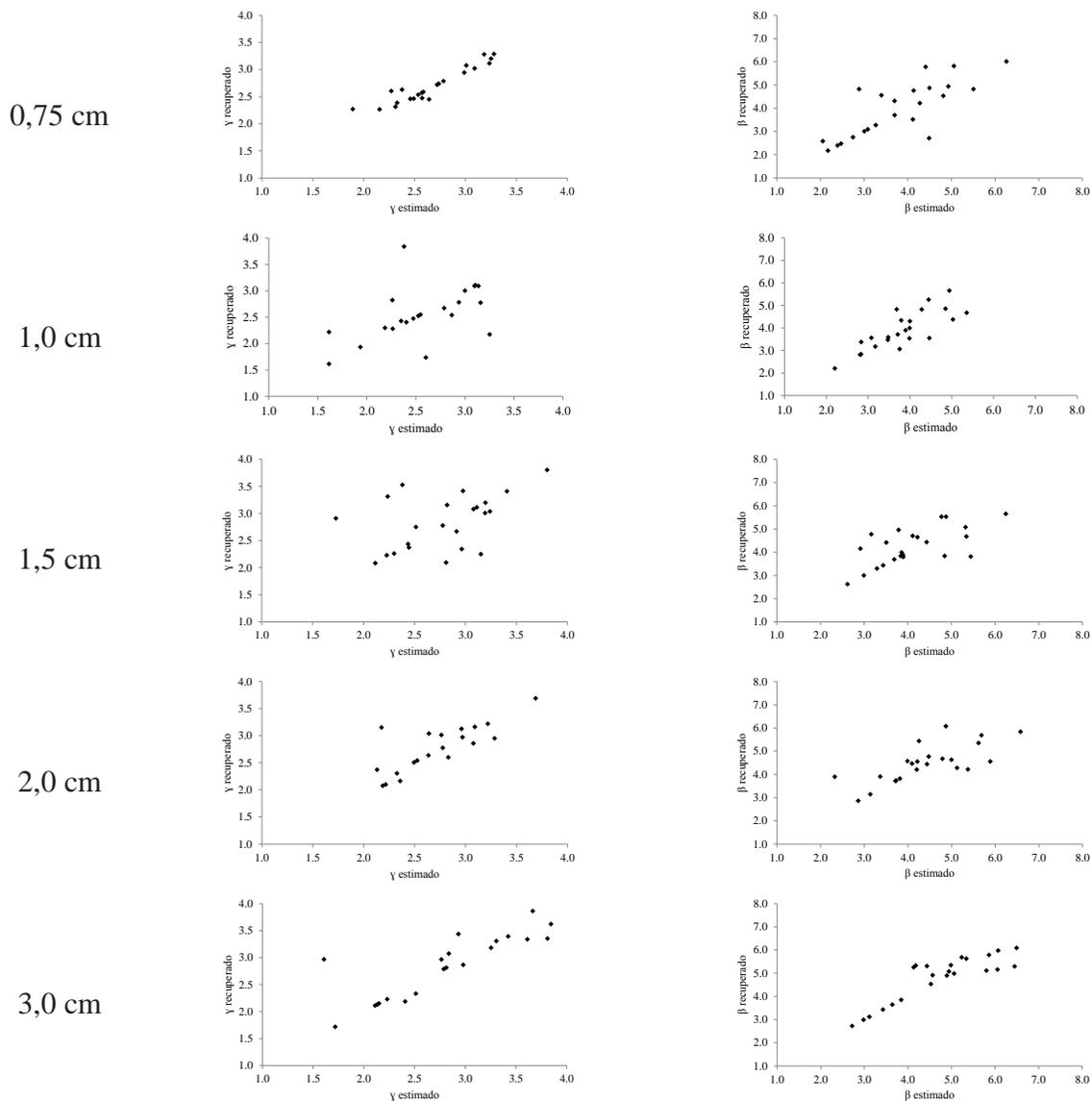


Figura 3.5. Gráfico de correlação entre parâmetros Beta e Gama estimados e recuperados.

As características demonstradas para as distribuições são corroboradas pela porcentagem de casos para os quais não há diferença significativa entre as distribuições observadas e estimadas, em que, para classes diamétricas com amplitude de 0,75 e 1,0 cm observou-se alto número de parcelas para as quais não houve diferença significativa entre distribuições, enquanto que para classes diamétricas com amplitudes de 1,5, 2,0 e 3,0 cm menos de 70% das parcelas obtiveram não diferença significativa entre distribuições (Tabela 3.2).

Tabela 3.3. Porcentagem de diferença não significativa entre as estimativas de distribuição diamétrica estimada em relação à distribuição diamétrica observada, de plantio experimental de *Acacia mangium*, utilizando amplitudes de classe diamétrica de 0,75; 1,0; 1,5; 2,0 e 3,0 cm.

| Amplitude de classe (cm) | Diferença não significativa (%) |
|--------------------------|---------------------------------|
| 0,75 | 82,6 |
| 1,0 | 86,9 |
| 1,5 | 65,2 |
| 2,0 | 47,8 |
| 3,0 | 34,8 |

Os estudos sobre a *Acacia mangium* são escassos, sobretudo aqueles que abordam o crescimento e produção da espécie, por isso os resultados obtidos neste estudo são relevantes, podendo-se ressaltar que a madeira dessa espécie possui características que favorecem usos diversos e apresenta crescimento rápido, além de representar a quarta maior área de floresta plantada no país (IBÁ, 2017). Este estudo foi realizado apenas para os 48 meses iniciais do plantio, sendo recomendados outros estudos em idades mais avançadas dos povoamentos dessa espécie.

3.4 - CONCLUSÃO

A função Weibull é adequada para descrever a distribuição diamétrica de *Acacia mangium* nas condições estudadas.

A prognose da distribuição diamétrica de povoamento de *Acacia mangium* é influenciada pelo valor de amplitude de classe, sendo a amplitude de 1,0 cm a mais adequada para projeção desde idades iniciais.

3.5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO JÚNIOR, C.A.; NOGUEIRA, G.S.; OLIVEIRA, M.L.R.; MIRANDA, R.O.V.; CASTRO, R.V.O.; PELLI, E. Projeção da distribuição diamétrica de povoamentos de *Eucalyptus* em diferentes amplitudes de classe. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.45, n.11, p.1275-1281, 2010.

AZEVEDO, C.P.; LIMA, R.M.B.; NEVES, E.J.M. Seleção e Manejo de Espécies Florestais para Fins Energéticos na Região de Iranduba - AM. Manaus: Embrapa Amazônia Ocidental, 1998. 6p.

BAILEY, R.L.; DELL, J.R. Quantifying diameter distributions with the Weibull function. **Forest Science**, Bethesda, v.19, n.2, p.97-104, 1973.

BELTRÃO, V. A.; FREIRE, L. C. M.; SANTOS, M. F. **Levantamento Semidetalhado da Área do Colégio Agrícola de Jundiá – Macaíba/RN**. Recife: SUDENE – Recursos de Solos, Divisão de Reprodução, 1975. 92p.

BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M. S.; LEITE, H. G.; FARDIN, L.; OLIVEIRA, J. C. 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.; GUIMARÃES, D. P.; BINOTI, M. L. M.; GARCIA, S. L. R.; FARDIN, L. P. Eficiência das funções Weibull e Hiperbólica para descrição de distribuições diamétricas de povoamentos de *Tectona grandis*. **Revista Árvore**, Viçosa-MG, v.35, n.2, p.299-306, 2011.

BINOTI, D.H.B.; LEITE, H.G.; NOGUEIRA, G.S.; SILVA, M.L.M.; GARCIA, S.L.R.; CRUZ, J.P. Uso da função Weibull de três parâmetros em um modelo de distribuição diamétrica para plantios de eucalipto submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, Viçosa, v.34, n.1, p.147-156, 2010.

BURKHART, H.E.; CAO, Q.V.; WARE, K.D. **A comparison of growth and yield prediction models for loblolly pine**. Blacksburg, VA: Virginia Polytechnic Institute and State University, School of Forestry and Wildlife Resources, 1981. 59 p.

CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 4. ed. Viçosa, MG: UFV, 2013. 605 p.

CAO, Q.V. Predicting parameters of a Weibull function for modeling diameter distribution. **Forest Science**, v.50, n.5, p.682-685, 2004.

CASTRO, R.V.O.; ARAÚJO, R.A.A.; LEITE, H.G.; CASTRO, A.F.N.M.; SILVA, A.; PEREIRA, R.S.; LEAL, F.A. 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.C.; FORTSON, J.C.; PIENAAR, L.V.; BRISTER, G.H.; BAILEY, R.L. **Timber management**: a quantitative approach. 3. ed. New York: John Willey & Sons, 1983. 333p.

EISFELD, R.L.; SANQUETTA, C.R.; ARCE, J.E.; MAESTRI, R.; WEBER, K.S. Modelagem do crescimento e da produção de *Pinus taeda* L. por meio de função probabilística. **Floresta**, Curitiba, v.35, n.2, 2005.

GOVE, J.H.; FAIRWEATHER, S.E. Maximum likelihood estimation of Weibull function parameters using a general interactive optimizer and grouped data. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.28, n.1, p.61-99, 1989.

INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES – IBÁ. Anuário Estatístico IBÁ 2017. Brasília, 2017. 80 p.

INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E MEIO AMBIENTE DO RIO GRANDE DO NORTE (IDEMA). **Perfil do Estado do Rio Grande do Norte**. IDEMA: Natal, 2002. 85p.

LEITE, H.G.; ALCÂNTARA, A.E.M.; BINOTI, D.H.B.; OLIVEIRA NETO, R.R.; SILVA, M.L.M. Comparação entre predição e projeção da distribuição de diâmetros de povoamentos de eucalipto submetidos a desbastes. **Revista Árvore**, v.37, n.2, p.321-328, 2013.

LEITE, H.G.; BINOTI, D.H.B.; GUIMARÃES, D.P.; SILVA, M.L.M.; GARCIA, S.L. Avaliação do ajuste das funções Weibull e hiperbólica a dados de povoamentos de eucalipto submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, v.34, n.2, p.305-311, 2010.

LEITE, H.G.; NOGUEIRA, G.S.; CAMPOS, J.C.C.; TAKIZAWA, F.H.; RODRIGUES, F.L. 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.

LEMMENS, R.H.M.J.; SOERIANEGARA, I.; WONG, W.C. Plant Resources of South-East Asia n° 5(2). Timber trees: Minor commercial timbers. Backhuys Publishers, Leiden. 1995. 655 p.

MACKEY, M. *Acacia mangium*: Un árbol importante para llanuras tropicales. Hoja Informativa FACT 96-01S, 1996. Arizona, USA, 4 p.

MIGUEL, E.P.; MACHADO, S.A.; FIGUEIREDO FILHO, A.; ARCE, J.E. Using the Weibull function for prognosis of yield by diameter class in *Eucalyptus urophylla* stands. **Cerne**, Lavras, v.16, n.1, p.94-104, 2010.

NOGUEIRA, G.S.; LEITE, H.G.; CAMPOS, J.C.C.; TAKIZAWA, F.H.; COUTO, L. Avaliação de um modelo de distribuição diamétrica ajustado para povoamentos de *Tectona grandis* submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, v.30, n.3, p.377-387, 2006.

NOGUEIRA, G.S.; LEITE, H.G.; CAMPOS, J.C.C.; CARVALHO, A.F.; SOUZA, A.L. Modelo de distribuição diamétrica para povoamentos de *Eucalyptus* sp. submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, Viçosa, v.29, n.4, p.579-589, 2005.

NOGUEIRA, G.S. **Modelagem do crescimento e da produção de povoamentos de *Eucalyptus* sp. e de *Tectona grandis* submetidos a desbaste**. 2003. 132p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003.

PELLI, E.; ARAÚJO JÚNIOR, C.A.; MIRANDA, R.O.V. **Weibull Trunc** (software não registrado).

ROSSI, L.M.B.; AZEVEDO, C.P.; SOUZA, C.R.S. *Acacia mangium*. Manaus - Embrapa Amazônia Ocidental, 29p, 2003.

SCOLFORO, J.R.S.; MACHADO, S.A. Um sistema de crescimento e produção com simulador de desbaste. **Scientia Forestalis**, n.50, p.51-64, 1996.

SOARES, T.S.; LEITE, H.G.; SOARES, C.P.B.; VALE, A.B. Comparação de diferentes abordagens na modelagem da distribuição diamétrica. **Floresta**, v.40, n.4, p.731-738, 2010.

SOKAL, R.R.; ROHLF, F.J. **Biometry**. San Francisco: Freeman.1981.

YARED, J.A.G.; VIANA, L.M.; KANASHIRO, M. Ensaios de procedências de *Acacia mangium* Willd., no Planalto do Tapajós, Pará. Boletim de Pesquisa Embrapa/CPATU n.107, 1990. 19 p.

CAPÍTULO IV – PROJEÇÃO DA DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA DE PLANTIO EXPERIMENTAL DE *Azadirachta indica*

RESUMO – O objetivo do presente estudo foi a projetar o crescimento e produção em nível de distribuição diamétrica de *Azadirachta indica* utilizando a função Weibull. Os dados utilizados foram obtidos plantio experimental estabelecido no Rio Grande do Norte. Ajustou-se a função Weibull de dois parâmetros pelo método da máxima verossimilhança aos dados agrupados em diferentes amplitudes de classe diamétrica, sendo elas: 0,75; 1,0; 1,5; 2,0 e 3,0 cm. Para a projeção dos parâmetros da função utilizou-se um sistema de equações com inclusão da variável área basal. A avaliação do ajuste desse sistema foi feita por meio da análise dos gráficos, de resíduos e das estatísticas de precisão, coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}) e erro padrão da média relativo ($S_{yx\%}$) e os valores estimados e observados comparados por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov. A função Weibull foi aderente em 100% dos casos (parcela-idade) para as amplitudes de classe de 0,75; 1,0 e 1,5 cm, para amplitudes de 2,0 e 3,0 cm a aderência foi de 97 e 95%, respectivamente. As variáveis de povoamento e suas foram estimadas com precisão pelo sistema de equações, apresentando dispersão de resíduos baixa e homocedástica, R^2 ajustado alto e erro padrão. As distribuições diamétricas estimadas seguiram a tendência lógica e biológica de crescimento para as cinco amplitudes de classe estudadas. As distribuições diamétricas foram obtidas com menor diferença entre observado e estimado utilizando a amplitude 1,0 cm. A função Weibull é adequada à projeção da distribuição diamétrica de povoamento de *Azadirachta indica* para todas as amplitudes de classe utilizadas. A amplitude de classe influencia a projeção da distribuição diamétrica, sendo mais adequados os valores de 0,75 e 1,0 cm a para projeção desde idades iniciais dos povoamentos dessa espécie.

Palavras-chave: Nim indiano, prognose, função Weibull

4.1 - INTRODUÇÃO

Azadirachta indica (nim) é uma espécie pertencente à família Meliaceae, de origem asiática onde estima-se existir aproximadamente 18 milhões de árvores. Essa espécie encontra-se distribuída também nas áreas tropicais e subtropicais da África, Américas e Austrália (NEVES et al., 2003). É uma planta perene ou decídua, bastante resistente, podendo, caso haja condições edafoclimáticas favoráveis, atingir até 25 metros de altura (SCHMUTTERER, 1990).

Devido à diversidade de compostos existentes na planta, sendo o principal deles a Azadiractina, praticamente todas as suas partes: folhas, frutos, sementes, casca e madeira, possuem uso não madeireiro. É utilizada há séculos em sua região de origem, na medicina humana e animal. Na agricultura, pode ser utilizado para o controle de insetos-praga, além disso, apresenta ação nematicida e atua sobre alguns fungos e bactérias. É utilizado ainda, na fabricação de cosméticos (MARTINEZ et al., 2002).

A madeira do nim é utilizável para fabricação de móveis, construção civil e para energia. Possui importantes características, entre as quais, massa específica média de $0,70 \text{ g cm}^{-3}$, resistência ao ataque de insetos e alto poder calorífico (SAXENA, 2001; ARAÚJO et al., 2000; KOUL et al., 1990). Diante de suas diferentes potencialidades de uso e também da capacidade de adaptação da espécie a climas mais secos, o cultivo do nim tem aumentado no nordeste do Brasil (MOURÃO et al., 2004; BITTENCOURT et al., 2009), tornando-se necessários estudos que envolvam a modelagem do crescimento e produção para dar suporte ao gerenciamento da produção florestal.

Dentre os modelos de crescimento e produção, os de distribuição diamétrica estimam o número de árvores por hectare por classe de diâmetro e, partir do emprego de uma equação de volume, de *taper* ou razão volumétrica, permite estimar a produção volumétrica por classe de tamanho, sendo significativos quando se tem interesse multiprodutos da madeira (CAMPOS; LEITE et al., 2013).

Esses modelos são baseados em funções de densidade de probabilidade, dentre as quais destaca-se a função Weibull, que é utilizada com frequência devido à flexibilidade, permitindo moldar diferentes tendências de distribuição, desde uma exponencial até uma normal (CAMPOS; LEITE et al., 2013; BAILEY; DELL, 1973). A Weibull apresenta ainda propriedades favoráveis como a facilidade de ajuste e o fato de os parâmetros serem

facilmente correlacionados com variáveis do povoamento (CAMPOS; LEITE et al., 2013).

Estudos de modelagem da distribuição diamétrica têm sido abundantemente realizados no Brasil utilizando dados de povoamentos de *Eucalyptus* sp. (ARAÚJO JÚNIOR et al., 2010; BINOTI et al., 2010; NOGUEIRA et al., 2005), *Pinus* sp. (EISFELD et al., 2005; CAO, 2004) e *Tectona grandis* (BINOTI et al., 2012; LEITE et al., 2006; NOGUEIRA et al., 2006) entretanto são inexistentes estudos deste tipo para *Azadirachta indica*. Assim, o objetivo do presente estudo foi a projetar crescimento e produção em nível de distribuição diamétrica de *Azadirachta indica* utilizando a função Weibull, de forma mais específica, avaliar a qualidade de prognoses realizadas desde as idades iniciais em função da variação na amplitude de classe diamétrica e da utilização da variável área basal no sistema de equações.

4.2 - MATERIAL E MÉTODOS

Os dados utilizados foram obtidos de plantio experimental de *Azadirachta indica*. (nim) estabelecido em uma área localizada em Macaíba no estado do Rio Grande do Norte, pertencente à Unidade Acadêmica Especializada em Ciências Agrárias da Universidade Federal do Rio Grande do Norte – UFRN.

A região do plantio possui topografia plana, apresenta predominantemente Latossolo Amarelo de textura arenosa (BELTRÃO; FREIRE; SANTOS, 1975). O clima local é uma transição entre os tipos As e BSw segundo a classificação de Köppen, com temperatura média ao longo do ano de 27°C, sendo a máxima de 32°C e mínima de 21°C e estação chuvosa de outono e inverno. A precipitação pluviométrica na região varia entre 800 e 1200 mm por ano, sendo caracterizado como clima subúmido (IDEMA, 2002).

O plantio experimental possuía espaçamento 3,0 x 3,0 m dividido em oito parcelas com área total de 576 m² cada uma. Para fins de mensuração florestal foram desconsideradas as bordas das parcelas, tendo, portanto uma área útil 324 m² onde foram realizados inventários florestais aos 12, 24, 36, 48 e 60 meses, sendo mensurados os diâmetros a 1,30 m de altura (*DAP*) e as alturas totais (*Ht*) das árvores vivas. Para projeção da distribuição diamétrica os dados de *DAP* foram agrupados em classes de cinco diferentes amplitudes, a fim de selecionar aquela que fosse mais adequada à projeção da distribuição diamétrica nas condições presentes, tais amplitudes foram: 0,75; 1,0; 1,5; 2,0 e 3,0 cm.

Para descrever a distribuição diamétrica de cada parcela em cada idade foi ajustada a função densidade de probabilidade Weibull de dois parâmetros (Eq. 1) pelo método da máxima verossimilhança, empregando o algoritmo desenvolvido por Gove e Fairweather (1989), por meio do *software Weibull Trunc* (PELLI, ARAÚJO JÚNIOR e MIRANDA, 2007).

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

Em que: $f(x)$ é a frequência de árvores na classe de *DAP*; X é o centro de classe de *DAP*, em cm; β é o parâmetro de escala; γ é o parâmetro de forma.

A qualidade dos ajustes foi avaliada pelo teste de Kolmogorov-Smirnov ($\alpha=0,01$), também por meio do *software Weibull Trunc* (PELLI, ARAÚJO JÚNIOR e MIRANDA, 2007), a fim de verificar a aderência da função Weibull aos dados. Esse teste consiste no cálculo da máxima diferença entre a frequência acumulada observada e a frequência acumulada estimada, sendo a classe de maior divergência a estatística do teste (dn) (Eq. 2) e, em seguida, esse valor é comparado com o valor tabelado ao nível de significância de 1% (SOKAL; ROHLF, 1981). Neste teste quanto maior o valor de dn , maior é a divergência entre os valores reais e os valores estimados pela função.

$$dn = MAX|F(X) - S(X)| \quad (2)$$

Em que: $S(X)$ é a frequência acumulada observada e $F(X)$ é a frequência estimada pela função Weibull.

Para o sistema de equações, utilizado para projetar os parâmetros da função densidade de probabilidade (fdp) Weibull, foram selecionados modelos mais eficientes na projeção das variáveis de povoamento, área basal, *DAP* máximo, *DAP* mínimo, diâmetro médio quadrático e frequência de árvores por hectare, para todas as amplitudes de classe de diâmetro estudadas, e os modelos mais eficientes para a projeção dos parâmetros da função Weibull, β e γ , (Eq. 3 a 17) em cada uma das amplitudes de classe. Os modelos utilizados foram baseados nos sistemas propostos por Nogueira (2003), com adaptações:

$$B_2 = c_0 + c_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) B_1 + c_2 d \max_1 + \varepsilon \quad (3)$$

$$d \max_2 = c_0 + c_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) d \max_1 + c_2 B_1 + \varepsilon \quad (4)$$

$$d \min_2 = c_0 + c_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) d \min_1 + c_2 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) B_1 + \varepsilon \quad (5)$$

$$q_2 = c_0 + c_1 q_1 + c_2 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) B_1 + \varepsilon \quad (6)$$

$$N_2 = c_0 + c_1 N_1 + c_2 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) B_1 + \varepsilon \quad (7)$$

Amplitude – 0,75 cm

$$\beta_2 = c_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) \beta_1 + c_2 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) d \max_1 + c_3 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) B_1 + \varepsilon \quad (8)$$

$$\gamma_2 = c_1 \gamma_1 + c_2 B_1 + c_3 d \max_1 + \varepsilon \quad (9)$$

Amplitude – 1,0 cm

$$\beta_2 = c_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) \beta_1 + c_2 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) d \max_1 + c_3 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) B_1 + \varepsilon \quad (10)$$

$$\gamma_2 = c_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) \gamma_1 + c_2 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) B_1 + c_3 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) d \max_1 + \varepsilon \quad (11)$$

Amplitude – 1,5 cm

$$\beta_2 = c_1 \beta_1 + c_2 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) B_1 + c_3 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) d \max_1 + \varepsilon \quad (12)$$

$$\gamma_2 = c_1 \gamma_1 + c_2 B_1 + c_3 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) (d \max_1 - q_1) + \varepsilon \quad (13)$$

Amplitude – 2,0 cm

$$\beta_2 = c_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) \beta_1 + c_2 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) (d \max_1 - q_1) + c_3 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) B_1 + \varepsilon \quad (14)$$

$$\gamma_2 = c_1 \gamma_1 + c_2 B_1 + c_3 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) (d \max_1 - q_1) + \varepsilon \quad (15)$$

$$\beta_2 = c_1 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) \beta_1 + c_2 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) d \max_1 + c_3 B_1 + \varepsilon \quad (16)$$

Amplitude – 3,0 cm

$$\gamma_2 = c_1 \gamma_1 + c_2 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) B_1 + c_3 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) d \max_1 + \varepsilon \quad (17)$$

Em que: I_1 e I_2 são as idades atual (1) e futura (2), em meses; B_1 e B_2 são áreas basais nas idades atual e futura, em $m^2 \text{ ha}^{-1}$; $dmax_1$ e $dmax_2$ são os diâmetros máximos nas idades atual e futura, em cm; $dmin_1$ e $dmin_2$ são os diâmetros mínimos nas idades atual e futura, em cm; q_1 e q_2 são os diâmetros médios nas idades atual e futura, em cm; N_1 e N_2 são as frequências de árvores por hectare nas idades atual e futura; β_1 e β_2 são os parâmetros de escala da função Weibull nas idades atual e futura; γ_1 e γ_2 são os parâmetros de forma da função Weibull nas idades atual e futura; c_1 são parâmetros dos modelos.

O ajuste do sistema de equações e da função Weibull foi realizado utilizando dados das medições realizadas aos 12, 24, 36, 48, 60 meses e a avaliação dos modelos foi realizada pela recuperação de parâmetros (NOGUEIRA, 2003; SOARES et al., 2010). Para avaliar a qualidade das estimativas das variáveis, além da distribuição gráfica dos resíduos (Eq. 18), foram obtidas as estatísticas de coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$) (Eq. 19), e erro padrão da média relativo ($S_{y,x\%}$) (Eq. 20), definidos por:

$$resíduo_{\%} = \frac{(Y - \hat{Y})}{Y} \times 100 \quad (18)$$

$$R^2_{aj.} = 1 - \left(\frac{n-1}{n-p-1} \right) \left(1 - \frac{\sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2} \right) \quad (19)$$

$$S_{y,x\%} = \frac{\sqrt{\frac{\sum (y_i - \hat{y}_i)^2}{n-p-1}}}{\bar{y}} \times 100 \quad (20)$$

Em que: n = número de observações; y_i = valores observados para as variáveis; \hat{y}_i = valores estimados para as variáveis; \bar{y} = valor médio observado para as variáveis; $n-p-1$ = grau de liberdade dos resíduos da equação.

A distribuição diamétrica foi projetada a partir dos dados de medição realizada em uma primeira ocasião para a idade seguinte e assim sucessivamente até a última idade de cada

parcela. Em seguida os valores estimados foram comparados com os valores observados por meio do teste de Kolmogorov-Smirnov ($\alpha = 0,01$). A seleção da amplitude de classe mais adequada e que proporcione a melhor modelagem da distribuição diâmetrica foi realizada com base na qualidade das estimativas obtidas pela função Weibull, ou seja, menor diferença significativa entre valores observados e estimados.

4.3 - RESULTADOS E DISCUSSÃO

Foram realizados ajustes da função Weibull aos dados observados em cada parcela e idade utilizando cinco amplitudes de classe, dentre as quais para 0,75; 1,0 e 1,5 cm observou-se 100% de aderência da função aos dados, para as demais amplitudes de 2,0 e 3,0 cm não houve aderência total da função, porém foi superior a 95% (Tabela 4.1).

Tabela 4.1. Porcentagem de aderência da função Weibull aos dados observados, considerando amplitudes de classe diamétrica de 0,75; 1,0; 1,5; 2,0 e 3,0 cm, em plantio experimental de *Azadirachta indica*.

| Amplitude de classe (cm) | Aderência função Weibull (%) |
|--------------------------|------------------------------|
| 0,75 | 100,0 |
| 1,0 | 100,0 |
| 1,5 | 100,0 |
| 2,0 | 97,0 |
| 3,0 | 95,0 |

Na tabela 4.2 são apresentados os coeficientes das equações ajustadas para as variáveis de povoamento e suas respectivas estatísticas. Essas variáveis foram estimadas com precisão, sendo que a área basal, *DAP* máximo e diâmetro médio apresentaram coeficiente de determinação ajustado maior ou igual a 0,96, já o *DAP* mínimo e frequência apresentaram coeficiente de determinação ajustado maior ou igual 0,80. O erro padrão da média relativo foi menor que 10% para todas as estimativas.

Tabela 4.2. Coeficientes das equações ajustadas para as variáveis do povoamento: área basal (B_2), DAP máximo ($d_{\max 2}$), DAP mínimo ($d_{\min 2}$), diâmetro médio (q_2) e frequência (N_2 , árvores.ha⁻¹) em idade futura e suas respectivas estatísticas de coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$) e erro padrão da média relativo ($S_{y,x}$ %).

| Variáveis | C_0 | C_1 | C_2 | $R^2_{Aj.}$ | $S_{y,x}$ (%) |
|--------------|----------|---------|----------|-------------|---------------|
| B_2 | 0,44586 | 4,16485 | 0,24309 | 0,97 | 7,20 |
| $d_{\max 2}$ | 4,47261 | 0,72823 | 0,01962 | 0,94 | 5,19 |
| $d_{\min 2}$ | 2,94654 | 0,36626 | 1,56627 | 0,87 | 9,37 |
| q_2 | 3,11130 | 0,88514 | -0,13596 | 0,96 | 4,55 |
| N_2 | 41,05639 | 0,96457 | -0,80159 | 0,80 | 0,47 |

O coeficiente de determinação ajustado para ambos os parâmetros da função Weibull apresentou valores decrescentes com o aumento dos valores de amplitude de classe, sendo, uma faixa de 0,91 a 0,94 para Gama e de 0,89 a 0,94 para Beta. Já para o erro padrão da média observou tendência oposta, ou seja, o aumento dos valores dessa estatística com o aumento da amplitude de classe.

Tabela 4.3. Coeficientes das equações ajustadas para os parâmetros Beta e Gama da função Weibull em diferentes amplitudes de classe diamétrica (AC) e suas respectivas estatísticas de coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj.}$) e erro padrão da média relativo ($S_{y,x}$ %)

| Parâmetros | AC | C_1 | C_2 | C_3 | $R^2_{aj.}$ | $S_{y,x}$ (%) |
|------------|------|---------|---------|----------|-------------|---------------|
| Gama | 0,75 | 0,73269 | 0,06832 | 0,34921 | 0,94 | 17,76 |
| | 1,00 | 0,78994 | 0,05866 | 0,61903 | 0,94 | 17,83 |
| | 1,50 | 0,46821 | 0,08061 | 2,29082 | 0,93 | 22,05 |
| | 2,00 | 0,56829 | 0,01375 | 2,78686 | 0,91 | 23,86 |
| | 3,00 | 0,10840 | 0,06534 | 6,09580 | 0,89 | 30,39 |
| Beta | 0,75 | 0,55314 | 0,63363 | 0,14734 | 0,94 | 16,92 |
| | 1,00 | 0,32651 | 0,17298 | 0,76384 | 0,94 | 17,02 |
| | 1,50 | 0,29606 | 0,68329 | 0,70772 | 0,93 | 19,27 |
| | 2,00 | 0,56540 | 1,08231 | -0,39886 | 0,92 | 21,45 |
| | 3,00 | 0,38090 | 0,83178 | 0,92761 | 0,91 | 24,45 |

A distribuição gráfica de resíduos corrobora com as estatísticas de precisão obtidas, sendo observado, para todas as variáveis de povoamento, uma dispersão de resíduos baixa e homocedástica, além disso, os histogramas de resíduos apresentam tendência de distribuição normal (Figura 4.1).

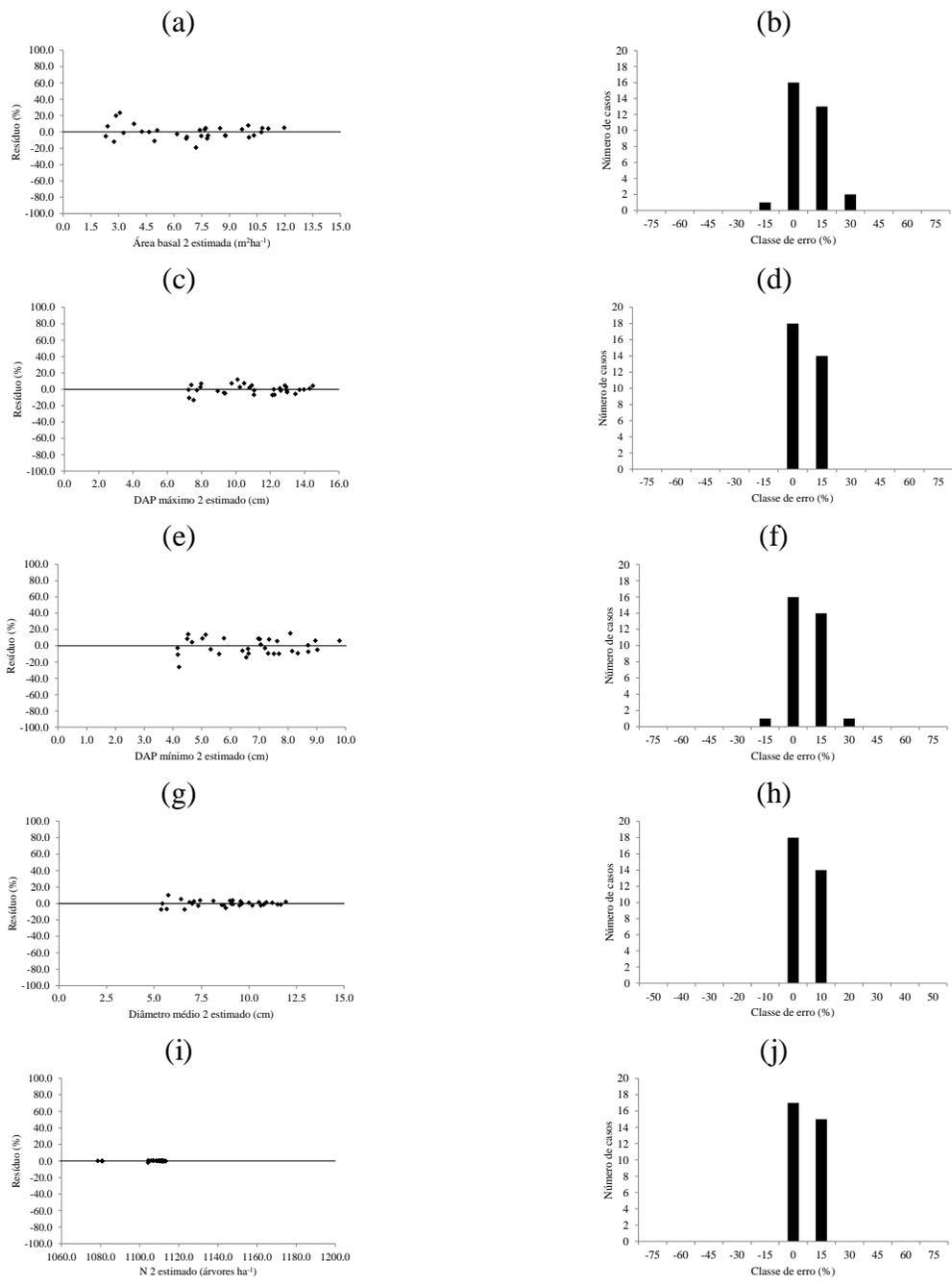
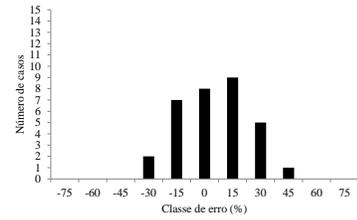
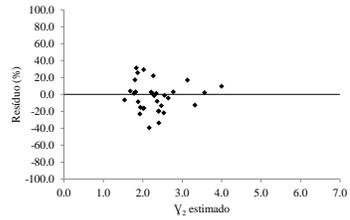
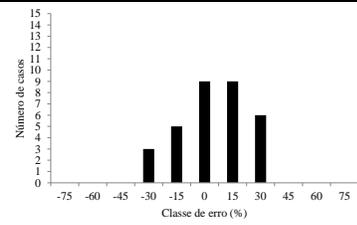
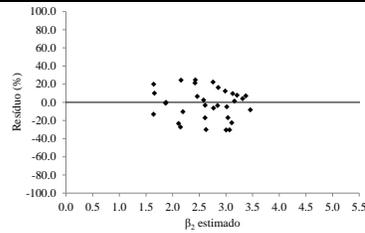


Figura 4.1. Gráficos de dispersão e histogramas da distribuição de resíduos para estimativas da área basal (a, b), *DAP* máximo (c, d), *DAP* mínimo (e, f), diâmetro médio (g, h) frequência de árvores por hectare (i, j) em uma idade futura de plantio experimental de *Azadirachta indica*.

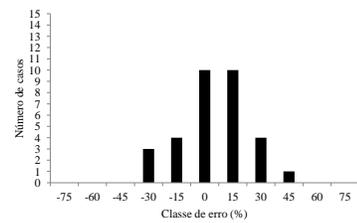
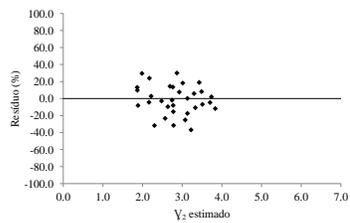
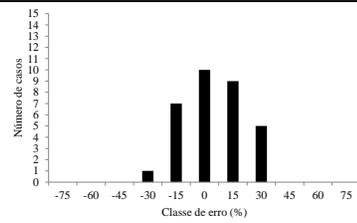
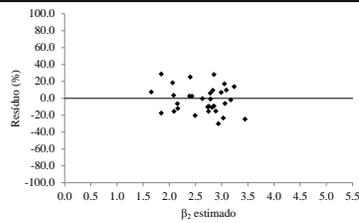
As estimativas dos parâmetros Beta e Gama da função Weibull, em geral, apresentaram dispersão de resíduos alta quando comparados às estimativas obtidas para as variáveis de povoamento. Para amplitudes de classe 0,75; 1,0 e 1,5 cm, a dispersão de resíduos foi menor e

mais homocedástica do que para as estimativas dos parâmetros da função nas amplitudes de 2,0 e 3,0 cm (Figura 4.2).

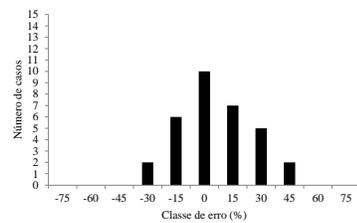
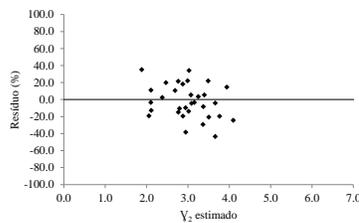
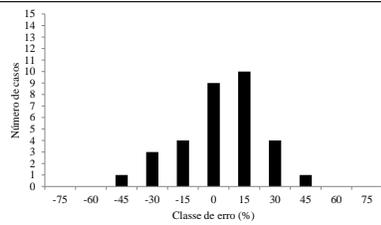
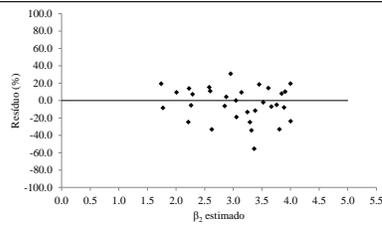
0,75 cm



1,0 cm



1,5 cm



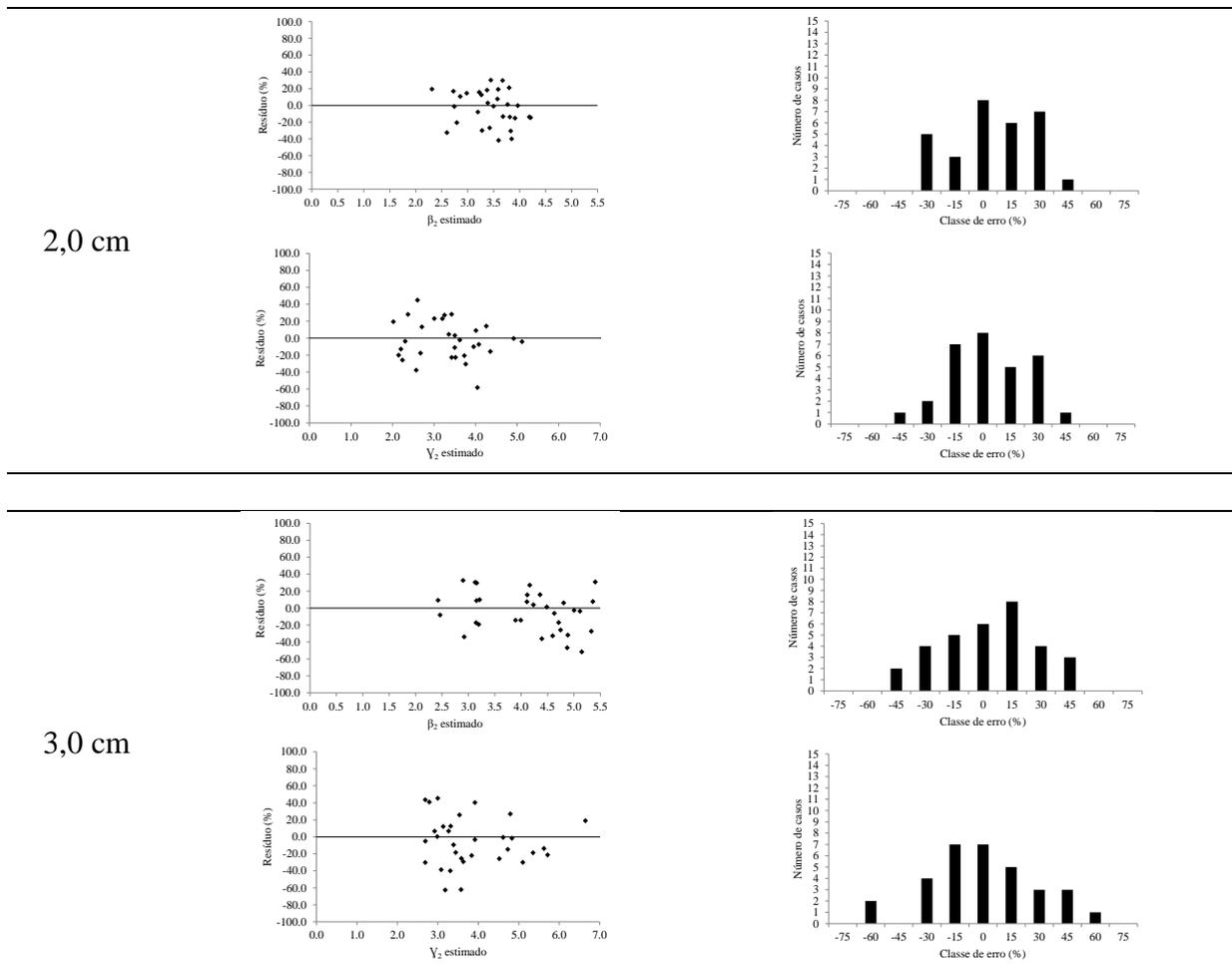


Figura 4.2. Gráficos de dispersão e histogramas da distribuição de resíduos para as estimativas dos parâmetros, Beta (β) e Gama (γ), da função Weibull em uma idade futura, para as amplitudes de classe diamétricas de 0,75; 1,0; 1,5; 2,0 e 3,0 cm utilizadas na projeção da distribuição diamétrica de plantio experimental de *Azadirachta indica*.

As distribuições diamétricas estimadas para as amplitudes de classe de 0,75; 1,0 e 1,5 cm seguiram a tendência lógica e biológica de crescimento, ou seja, com o aumento da idade do povoamento observou-se o deslocamento da curva de distribuição diamétrica para a direita, como consequência do crescimento diamétrico e mudança de classe. Para florestas plantadas cita-se, além do deslocamento das curvas, o achatamento das mesmas (NOGUEIRA, 2003). Esses dois comportamentos foram observados simultaneamente, envolvendo todas as prognoses, para as amplitudes de classe de 0,75; 1,0 e 1,5 cm (Figura 4.3).

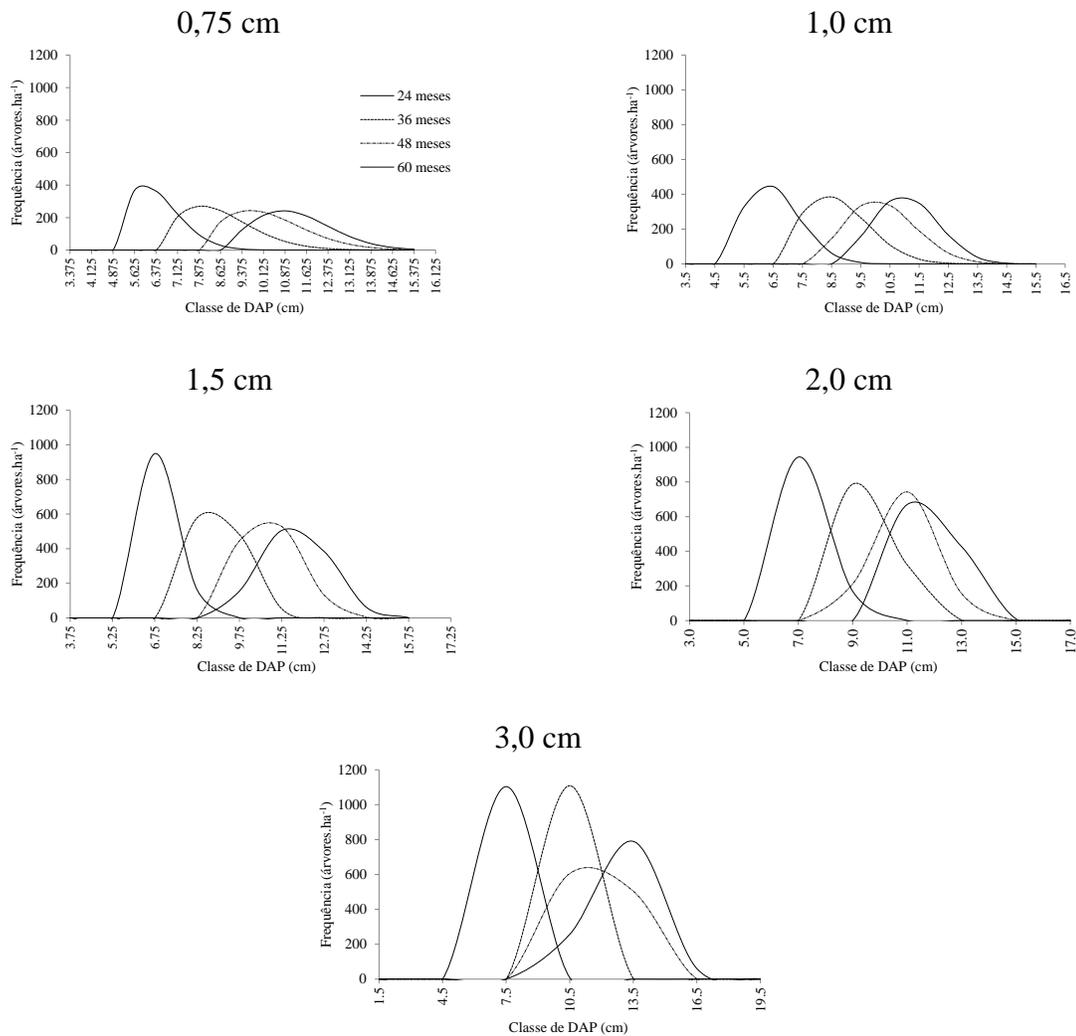


Figura 4.3. Simulação distribuição diamétrica de plantio experimental de *Azadirachta indica* em quatro prognoses, aos 24, 36, 48 e 60 meses, realizadas para as amplitudes de classe diamétrica de 0,75; 1,0; 1,5; 2,0 e 3,0 cm.

Para representar as distribuições diamétricas em cada amplitude de classe selecionou-se uma parcela ao acaso. A flexibilidade da função Weibull permitiu descrever as tendências apresentadas, geralmente linear e normal. Para as amplitudes de 0,75; 1,0 e 1,5 cm foram observadas distribuições observadas e estimadas com menor diferença, enquanto que para as amplitudes de 2,0 e 3,0 cm foram obtidas estimativas subestimadas e superestimadas em uma ou mais idades (Figura 4.4).

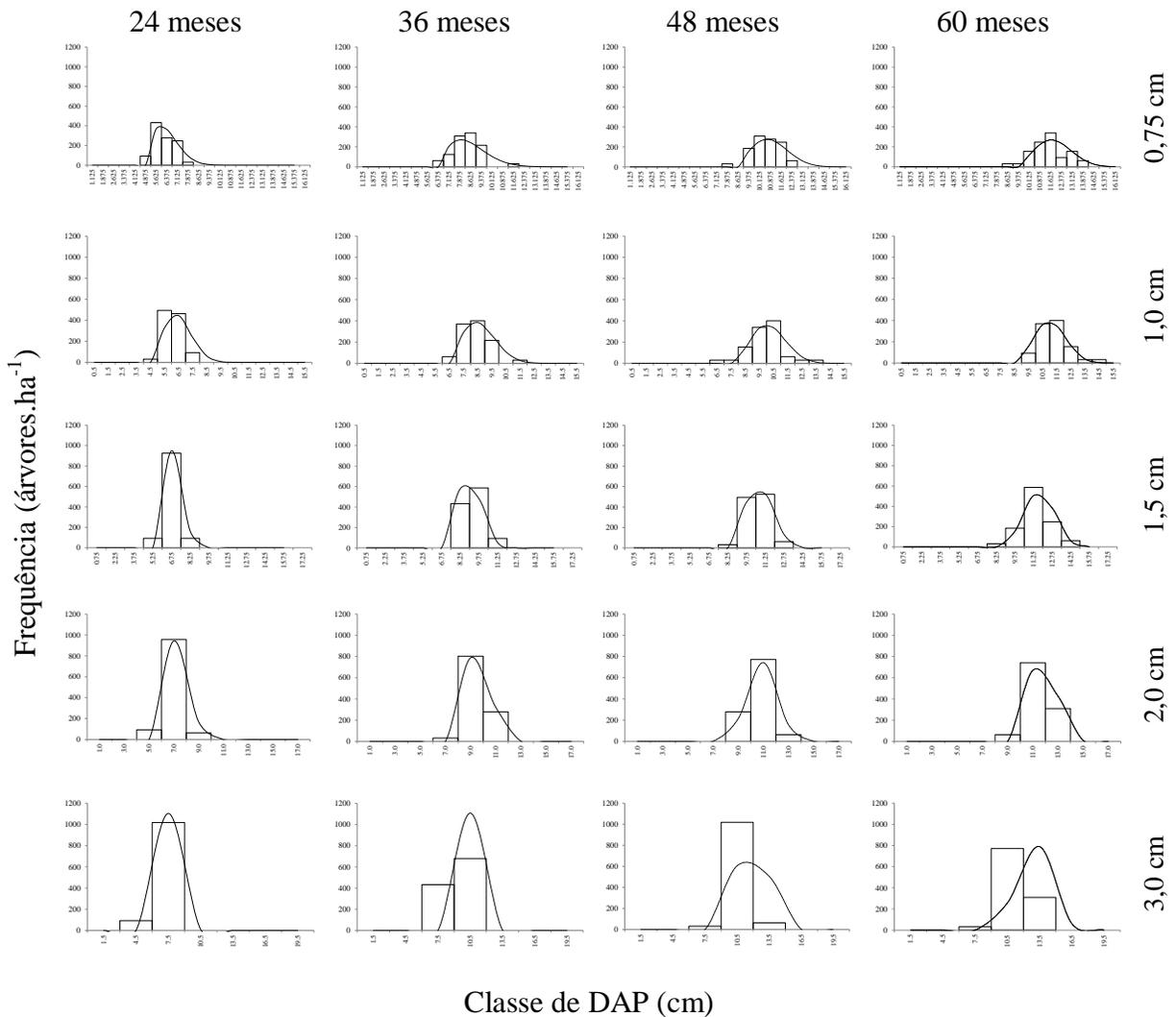


Figura 4.4 – Comparação entre distribuições diamétricas observada (barras) e estimada (linhas) de plantio experimental de *Azadirachta indica* para amplitudes de classe diamétrica de 0,75; 1,0; 1,5; 2,0 e 3,0 cm, nas idades de 24, 36, 48 e 60 meses.

Na figura 4.5 são apresentados gráficos de correlação entre parâmetros Beta e Gama estimados e recuperados. Em todas as amplitudes de classe observa-se a existência de correlação, sendo esta melhor para a amplitude de classe de 1,0 cm.

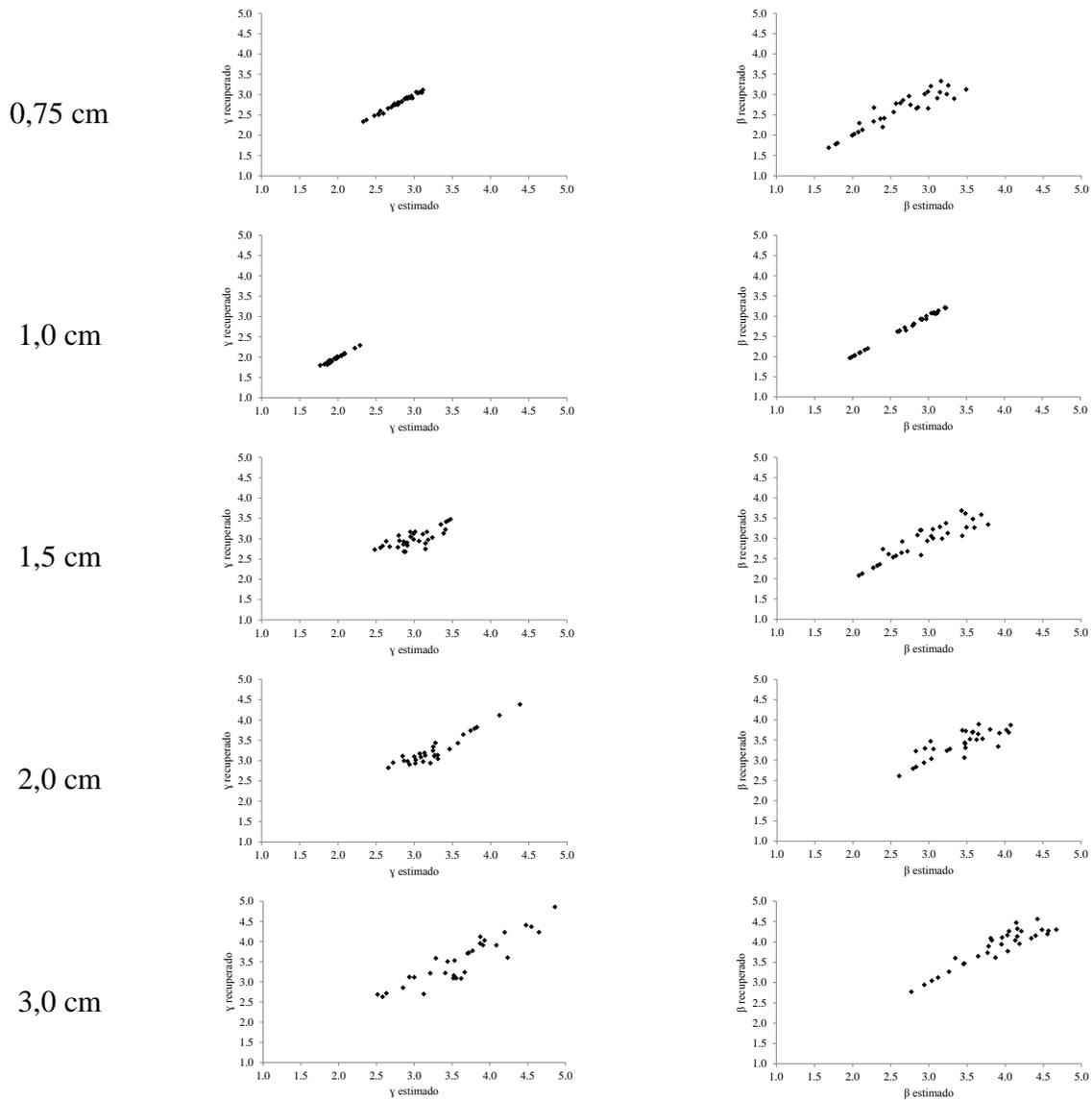


Figura 4.5. Gráfico de correlação entre parâmetros Beta e Gama estimados e recuperados

Em mais de 80% das parcelas, a utilização das amplitudes de 0,75 e 1,0 cm proporcionaram distribuição estimada sem diferenças significativas em relação à distribuição observada. Para demais amplitudes, menos de 60% das parcelas apresentaram diferenças não significativas entre frequência observada e estimada (Tabela 4.4).

Tabela 4.4. Porcentagem de diferença não significativa entre as estimativas de distribuição diamétrica estimada em relação à distribuição diamétrica observada, de plantio experimental de *Azadirachta indica*, utilizando amplitudes de classe diamétrica de 0,75; 1,0; 1,5; 2,0 e 3,0 cm.

| Amplitude de classe (cm) | Diferença não significativa (%) |
|--------------------------|---------------------------------|
| 0,75 | 81,2 |
| 1,0 | 88,0 |
| 1,5 | 59,0 |
| 2,0 | 57,0 |
| 3,0 | 41,0 |

Com medições realizadas desde os 12 meses e prognoses a partir dos 24 meses aliado ao fato de que a espécie possui crescimento lento (NEVES, 2004), as menores amplitudes permitiram melhor visualização da estrutura do povoamento, consequentemente, prognose da produção a partir dessas distribuições podem ser obtidas com maior precisão. Já nas maiores amplitudes (de 2,0 e 3,0 cm) as frequências de indivíduos encontram-se em menor número de classes, geralmente até três, resultando em um grande número de árvores concentrado em umas dessas classes, assim os indivíduos com valores de diâmetros mais próximos aos extremos da classe seriam subestimados e superestimados.

Os resultados apresentados são inéditos e importantes, no entanto, recomenda-se a realização de estudos semelhantes que envolvam dados de povoamentos em idades mais avançadas, utilizando bancos de dados mais amplos e provenientes de diferentes regiões e condições de cultivo.

4.4 – CONCLUSÕES

A função Weibull é adequada à modelagem da distribuição diamétrica dessa espécie nas condições estudadas.

A amplitude de classe influencia a projeção da distribuição diamétrica de povoamento dessa espécie, sendo mais adequado o valor de 1,0 cm a para projeção desde idades iniciais.

4.5 - REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ARAÚJO JÚNIOR, C.A.; NOGUEIRA, G.S.; OLIVEIRA, M.L.R.; MIRANDA, R.O.V.; CASTRO, R.V.O.; PELLI, E. Projeção da distribuição diamétrica de povoamentos de *Eucalyptus* em diferentes amplitudes de classe. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, Brasília, v.45, n.11, p.1275-1281, 2010.

ARAÚJO, L.C.V.; RODRIGUEZ, L.E.C.; PAES, J.B. Características físico-químicas e energéticas da madeira de nim indiano. **Scientia Forestalis**, n.57, p.153-159, 2000.

BAILEY, R.L.; DELL, J.R. Quantifying diameter distributions with the Weibull function. **Forest Science**, Bethesda, v.19, n.2, p.97-104, 1973.

BELTRÃO, V.A.; FREIRE, L.C.M.; SANTOS, M.F. **Levantamento Semidetalhado da Área do Colégio Agrícola de Jundiá – Macaíba/RN**. Recife: SUDENE – Recursos de Solos, Divisão de Reprodução, 1975. 92p.

BITTENCOURT, A.M.; SANTOS, A.J.; HOEFLICH, V.A.; BERGER, R. O cultivo do nim indiano (*Azadirachta indica* A. JUSS.): uma visão econômica. **Floresta**, Curitiba, PR, v.39, n.3, p.629-642, 2009.

BINOTI, D.H.B.; BINOTI, M.L.M.S.; LEITE, H.G.; FARDIN, L.; OLIVEIRA, J.C. 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.; NOGUEIRA, G.S.; SILVA, M.L.M.; GARCIA, S.L.R.; CRUZ, J.P. Uso da função Weibull de três parâmetros em um modelo de distribuição diamétrica para plantios de eucalipto submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, Viçosa, v.34, n.1, p.147-156, 2010.

CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 4. ed. Viçosa, MG: UFV, 2013. 605 p.

CAO, Q.V. Predicting parameters of a Weibull function for modeling diameter distribution. **Forest Science**, v.50, n.5, p.682-685, 2004.

CASTRO, R.V.O.; ARAÚJO, R.A.A.; LEITE, H.G.; CASTRO, A.F.N.M.; SILVA, A.; PEREIRA, R.S.; LEAL, F.A. 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.

EISFELD, R.L.; SANQUETTA, C.R.; ARCE, J.E.; MAESTRI, R.; WEBER, K.S. Modelagem do crescimento e da produção de *Pinus taeda* L. por meio de função probabilística. **Floresta**, Curitiba, v.35, n.2, 2005.

GOVE, J.H.; FAIRWEATHER, S.E. Maximum likelihood estimation of Weibull function parameters using a general interactive optimizer and grouped data. **Forest Ecology and Management**, Amsterdam, v.28, n.1, p.61-99, 1989.

INSTITUTO DE DESENVOLVIMENTO ECONÔMICO E MEIO AMBIENTE DO RIO GRANDE DO NORTE (IDEMA). **Perfil do Estado do Rio Grande do Norte**. IDEMA: Natal, 2002. 85p.

KOUL, O.; ISMAN, M.B.; KETKAR, C.M. Properties and uses of Neem, *Azadirachta indica*. **Canadian Journal of Botany**, v.68, p.1-11, 1990.

LEITE, H. G.; NOGUEIRA, G. S.; CAMPOS, J. C. C.; TAKIZAWA, F. H.; RODRIGUES, F. L. 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.

MARTINEZ, S.S. (Ed.). **O nim – *Azadirachta indica*: natureza, usos múltiplos, produção**. Londrina: IAPAR, 2002. 142p.

MOURÃO, S.A; ZANUNCIO, J.C.; FILHO, A.P.; GUEDES, R.N.C; CAMARGOS, A.B. Toxicidade de extratos de nim (*Azadirachta indica*) ao ácaro-vermelho-do-cafeeiro *Oligonychus ilicis*. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**. Brasília, v.39, n.8, p.827-830, 2004.

NEVES, E.J.M. **Importância dos fatores edafo-climáticos para o uso do nim (*Azadirachta indica* A. Juss) em programas florestais e agroflorestais nas diferentes regiões do Brasil**. Colombo: Embrapa Florestas, 2004. Boletim de Pesquisa Florestal, n.49, p.99-107.

NEVES, B.P.; OLIVEIRA, I.P; NOGUEIRA, J.C.M. **Cultivo e utilização do nim indiano**. Santo Antônio de Goiás: Embrapa-CNPAF, 2003. 12p.

NOGUEIRA, G.S.; LEITE, H.G.; CAMPOS, J.C.C.; TAKIZAWA, F.H.; COUTO, L. Avaliação de um modelo de distribuição diamétrica ajustado para povoamentos de *Tectona grandis* submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, v.30, n.3, p.377-387, 2006.

NOGUEIRA, G.S.; LEITE, H.G.; CAMPOS, J.C.C.; CARVALHO, A.F.; SOUZA, A.L. Modelo de distribuição diamétrica para povoamentos de *Eucalyptus* sp. submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, Viçosa, v.29, n.4, p.579-589, 2005.

NOGUEIRA, G.S. **Modelagem do crescimento e da produção de povoamentos de *Eucalyptus* sp. e de *Tectona grandis* submetidos a desbaste**. 2003. 132p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2003.

PELLI, E.; ARAÚJO JÚNIOR, C.A.; MIRANDA, R.O.V. **Weibull Trunc** (software não registrado).

SAXENA, R.C. **Neem in the new millennium: business opportunities unlimited**. Brasília, 2001. 23p.

SCHMUTTERER, H. Properties and potential of natural pesticides from the neem tree, *Azadirachta indica*. **Annual Review of Entomology**. Palo Alto, v.35, p.271-297, 1990.

SOARES, T.S.; LEITE, H.G.; SOARES, C.P.B.; VALE, A.B. Comparação de diferentes abordagens na modelagem da distribuição diamétrica. **Floresta**, v. 40, n. 4, p. 731-738, 2010.

SOKAL, R.R.; ROHLF, F.J. **Biometry**. San Francisco: Freeman.1981.