

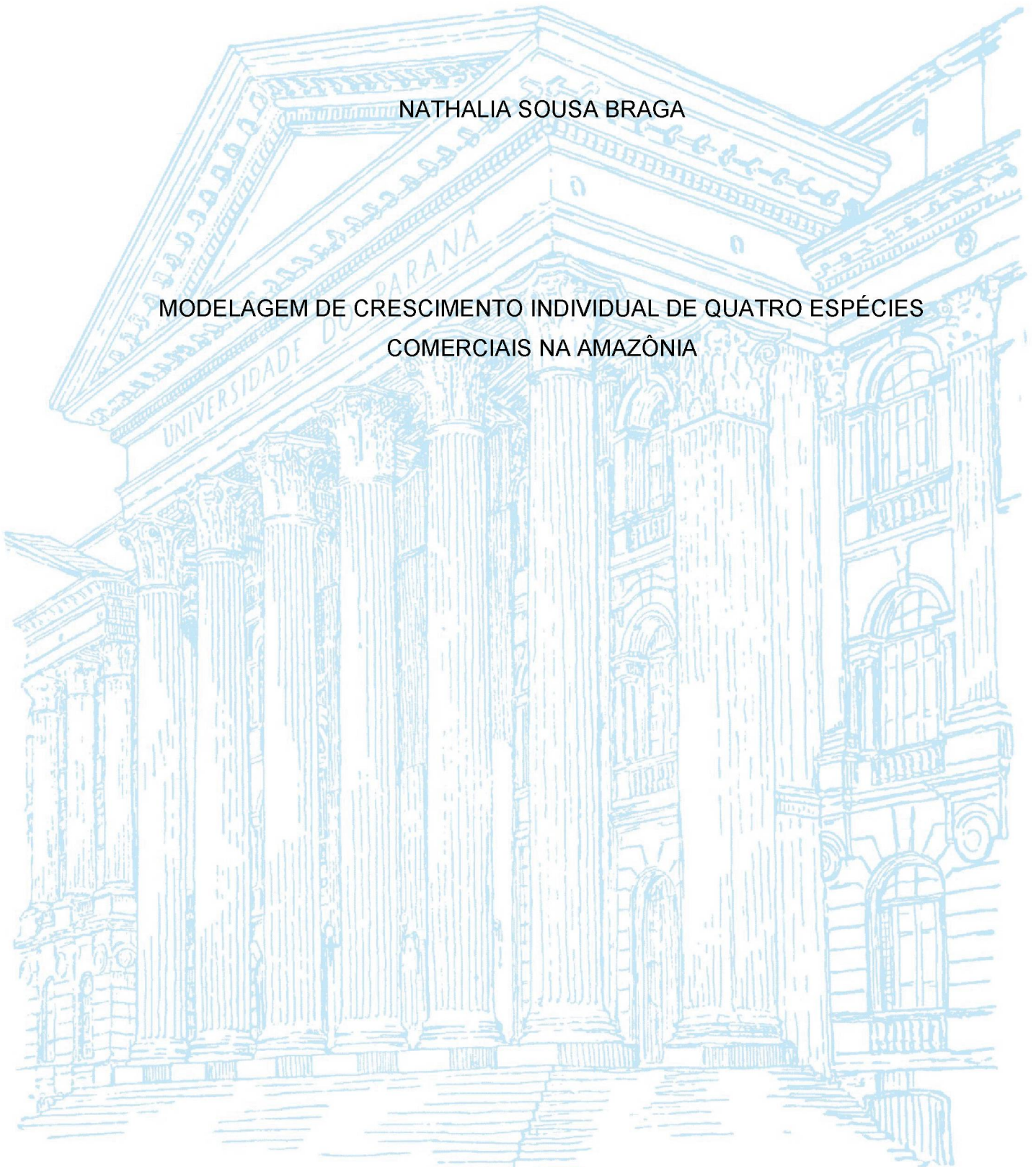
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ

NATHALIA SOUSA BRAGA

MODELAGEM DE CRESCIMENTO INDIVIDUAL DE QUATRO ESPÉCIES
COMERCIAIS NA AMAZÔNIA

CURITIBA - PR

2022



NATHALIA SOUSA BRAGA

MODELAGEM DE CRESCIMENTO INDIVIDUAL DE QUATRO ESPÉCIES
COMERCIAIS NA AMAZÔNIA

Dissertação apresentada ao curso de Pós-Graduação em Engenharia Florestal Setor de Agrárias, Universidade Federal do Paraná, como requisito parcial à obtenção do título de Mestre em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Henrique Soares Koehler.

CURITIBA - PR

2022

Ficha catalográfica elaborada pela
Biblioteca de Ciências Florestais e da Madeira - UFPR

Braga, Nathalia Sousa

Modelagem de crescimento individual de quatro espécies comerciais
na Amazônia / Nathalia Sousa Braga. – Curitiba, 2022.
1 recurso on-line : PDF.

Orientador: Prof. Dr. Henrique Soares Koehler.
Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal do Paraná, Setor de
Ciências Agrárias, Programa de Pós-Graduação em Engenharia Florestal.
Defesa: Curitiba, 26/08/2022.
Área de concentração: Manejo Florestal.

1. Árvores - Crescimento - Amazônia. 2. Florestas - Manejo. 3. Árvores
- Medição. 4. Equações. 5. Teses. I. Koehler, Henrique Soares.
II. Universidade Federal do Paraná, Setor de Ciências Agrárias. III. Título.

CDD – 634.9
CDU – 634.0.524(811)

Bibliotecária: Berenice Rodrigues Ferreira – CRB 9/1160



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SETOR DE CIÊNCIAS AGRÁRIAS
UNIVERSIDADE FEDERAL DO PARANÁ
PRÓ-REITORIA DE PESQUISA E PÓS-GRADUAÇÃO
PROGRAMA DE PÓS-GRADUAÇÃO ENGENHARIA
FLORESTAL - 40001016015P0

TERMO DE APROVAÇÃO

Os membros da Banca Examinadora designada pelo Colegiado do Programa de Pós-Graduação ENGENHARIA FLORESTAL da Universidade Federal do Paraná foram convocados para realizar a arguição da dissertação de Mestrado de **NATHALIA SOUSA BRAGA** intitulada: **MODELAGEM DE CRESCIMENTO INDIVIDUAL DE QUATRO ESPÉCIES COMERCIAIS NA AMAZÔNIA**, sob orientação do Prof. Dr. HENRIQUE SOARES KOEHLER, que após terem inquirido a aluna e realizada a avaliação do trabalho, são de parecer pela sua **APROVAÇÃO** no rito de defesa.

A outorga do título de mestra está sujeita à homologação pelo colegiado, ao atendimento de todas as indicações e correções solicitadas pela banca e ao pleno atendimento das demandas regimentais do Programa de Pós-Graduação.

CURITIBA, 26 de Agosto de 2022.

Assinatura Eletrônica

31/08/2022 11:29:22.0

HENRIQUE SOARES KOEHLER

Presidente da Banca Examinadora

Assinatura Eletrônica

03/09/2022 20:38:13.0

JÓÃO OLEGÁRIO PEREIRA DE CARVALHO

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA)

Assinatura Eletrônica

31/08/2022 08:56:13.0

JONATHAN WILLIAM TRAUTENMÜLLER

Avaliador Externo (UNIVERSIDADE FEDERAL RURAL DA AMAZÔNIA)

Avenida Lothário Meissner, 632 - CURITIBA - Paraná - Brasil
CEP 80210-170 - Tel: (41) 3360-4212 - E-mail: pgfloresta@gmail.com

Documento assinado eletronicamente de acordo com o disposto na legislação federal Decreto 8539 de 08 de outubro de 2015.

Gerado e autenticado pelo SIGA-UFPR, com a seguinte identificação única: 219111

Para autenticar este documento/assinatura, acesse <https://www.prppg.ufpr.br/siga/visitante/autenticacaoassinaturas.jsp> e insira o código 219111

*Marcilene Sousa, Sezisnando Braga, Erchides Monteiro
(in memoriam), Zilda Monteiro e Ana Sousa.*

DEDICO.

AGRADECIMENTOS

A Deus, que é a minha base para tudo.

À Universidade Federal do Paraná – UFPR, ao Programa de Pós Graduação em Engenharia Florestal por ter me dado oportunidade da realização do mestrado.

À Embrapa Amazônia Oriental, pela disponibilização dos dados de grande importância para os Estudos Florestais.

Ao CNPq, pela bolsa concedida durante a execução dessa pesquisa.

Ao meu orientador Prof. Dr. Henrique Soares Koehler, por sua disponibilidade e compreensão durante o curso.

Ao professor Dr. João Olegário P. de Carvalho e ao Dr. Hassan C. David, que tenho grande admiração e que me ajudaram na construção dessa pesquisa, meus sinceros agradecimentos.

À minha mãe (Marcilene Sousa) e ao meu pai (Sezislano Braga), por me incentivarem. Aos meus irmãos Ananda Braga, Arthur Braga e Gabriel Braga. Ao meu tio Elias, por ter me escutado e me incentivado.

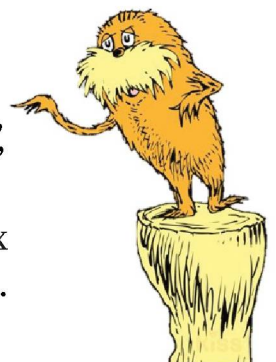
Aos meus avós, Erchides Monteiro (*in memoriam*), Zilda Cordovil e Ana Sousa.

À Bianca Lima, por ter me ajudado durante esse período.

Ao meu pet Louie, meu companheiro de todos os momentos.

“Unless someone like you cares a whole awful lot,
Nothing is going to get better. It's not.”

Livro: The Lorax
Seuss, 1971.



RESUMO

O manejo florestal conduzido dentro da legalidade propicia sustentabilidade da produção de madeira ao longo do tempo. A atual legislação brasileira possibilita a substituição do Diâmetro Mínimo de Corte (DMC) generalizado para o DMC específico por espécie, se forem apresentados estudos científicos prévios. Para tal, foram testadas as seguintes hipóteses: i) o padrão diamétrico das espécies arbóreas amazônicas é favorecido com a aplicação de tratamentos silviculturais pós extração; ii) os modelos para árvores individuais testados são capazes de expressar o crescimento das espécies arbóreas amazônicas; iii) o crescimento em diâmetro é sensível aos tratamentos silviculturais pós extração e iv) as espécies possuem dinâmica diferentes possibilitando DMC e Ciclo de Corte (CC) específico por espécie para garantir a sustentabilidade da floresta. O objetivo desta pesquisa foi avaliar os efeitos a médio prazo de 30 anos após a exploração e 18 anos após os tratamentos silviculturais na estrutura diamétrica e no crescimento individual de árvores para determinação de DMC e CC específico por espécie comerciais na Amazônia brasileira. A área experimental pertence a EMBRAPA Oriental, localizado na Floresta Nacional (Flona) do Tapajós – PA. A área experimental é constituída por parcelas permanentes com dois tratamentos: T0 – área de controle e T1 – área manejada, com período de medição de 31 anos. Determinaram-se funções de densidade de probabilidade para estimativa da distribuição diamétrica das espécies. Foram ajustadas equações que possibilitaram a determinação do padrão de crescimento das espécies selecionadas e foi estimada a maximização do incremento em volume, sendo estimado o DMC e CC para as quatro espécies. O padrão de crescimento das espécies foi representado, de forma geral, pela equação de Richards. Para o DMC específicos, os valores estiveram tanto acima como abaixo do atual pela legislação (50 cm), variando de 23 a 61 cm de diâmetro. Os CC variaram de 17 a 72 anos, com valores menores para área manejada “T1”. Com isso, sugere-se a flexibilização do DMC e CC generalizados para específico por espécie ou grupos de espécies com características semelhantes.

Palavra-chave: Modelagem. Manejo Florestal. Amazônia.

ABSTRACT

Forest management guarantees the legality and sustainability of wood production over time. Current Brazilian legislation makes it possible to replace the generalized Minimum Cutting Diameter (MCD) for species-specific MCD, if previous scientific studies are presented. Thus, the following hypotheses were tested: i) the diameter pattern of the Amazonian tree species is favored with post-extraction thinning; ii) the models tested are capable of expressing the growth of Amazonian tree species; iii) diameter growth is sensitive to post-extraction thinning and iv) species have different dynamics, which allows species-specific MCD and Cutting Cycle (CC) to ensure sustainability. The objective of this research was to evaluate the medium-term effects of 30 years of post-harvest thinning on diameter structure and tree-level growth for commercial species-specific MCD and CC in the Brazilian Amazon. The experimental area belongs to EMBRAPA Oriental, located in the National Forest of Tapajós - PA. Experimental area consists of permanent plots with two treatments: T0 – control area and T1 – managed area, with a measurement period of 31 years. Probability density functions were determined to estimate the diameter distribution of the species. Equations were adjusted that allowed the determination of the growth pattern of the selected species and the maximization of the increment in volume was estimated, being estimated the MCD and CC for the four species. The species growth pattern was represented, in general, by the Richards equation. For the specific MCD, the values were both above and below the current legislation (~ 50 cm), ranging from 23 to 61 cm in diameter. The CC ranged from 17 to 72 years, with lower values for the managed area “T1”. With this, it is suggested to make the generalized MCD and CC more flexible to specific by species or groups of species with similar characteristics.

Keyword: Modeling. Forest management. Amazon.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 – EXEMPLO DE FERRAMENTAS PARA O PLANEJAMENTO DE MÉDIO E LONGO PRAZO, OFERECENDO SUBSÍDIOS TÉCNICOS PARA A DECISÃO SOBRE A IC, DMC E CC.....	18
FIGURA 2 – FLEXIBILIDADE DA FUNÇÃO DE CRESCIMENTO LUNDQVIST-KORF COM VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS.....	26
FIGURA 3 – FLEXIBILIDADE DA FUNÇÃO DE CRESCIMENTO RICHARDS COM VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS.....	29
FIGURA 4 – FLEXIBILIDADE DA FUNÇÃO DE CRESCIMENTO HOSSFELD IV COM VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS.....	31
FIGURA 5 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E TIPOS DE VEGETAÇÃO DA FLORESTA NACIONAL DO TAPAJÓS, PA.....	38
FIGURA 6 – DISPOSIÇÃO DOS DADOS DURANTE OS PERÍODOS DE MEDIÇÃO (1981 – 1 ANO ANTES DA EIR; 1989 – 7 ANOS APÓS EIR E 5 ANOS ANTES DOS TRATAMENTOS SILVICULTURAIS; E 2012 – AOS 30 ANOS APÓS A EIR E AOS 18 ANOS APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS SILVICULTURAIS) DO EXPERIMENTO NO KM 114 DA FLORESTA NACIONAL DO TAPAJÓS, PA.....	48
FIGURA 7 – HISTOGRAMAS DA DISTRIBUIÇÃO DOS DIÂMETROS DAS ESPÉCIES (DAP \geq 5 CM) NO EXPERIMENTO DE 144 HA NA FLORESTA NACIONAL DO TAPAJÓS, PA. A – PRÉ EXPLORAÇÃO (1981); B – PÓS EXPLORAÇÃO/PRÉ TRATAMENTO SILVICULTURAL (1989); C – PÓS TRATAMENTO SILVICULTURAL (2012).....	50
FIGURA 8 – CURVA DE DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA GERADA PELOS TRÊS MELHORES MODELOS TESTADOS PARA OS DADOS DOS DIÂMETROS DAS ESPÉCIES (DAP \geq 5 CM) NO EXPERIMENTO DE 144 HA NA FLORESTA NACIONAL DO TAPAJÓS, PA. 1981 – PRÉ EXPLORAÇÃO; 1989 – PÓS EXPLORAÇÃO/PRÉ TRATAMENTO SILVICULTURAL; 2012 – PÓS TRATAMENTO SILVICULTURAL.....	55
FIGURA 9 – RELAÇÃO ENTRE DAP OBSERVADO E ESTIMADO DE ESPÉCIES ARBÓREAS COMERCIAIS NO EXPERIMENTO DO KM 114 NA FLONA DE TAPAJÓS, PA. (A) CONTROLE. (B) ÁREA MANEJADA.....	59

FIGURA 10 – CURVAS DE CRESCIMENTO DE DIÂMETRO DE ESPÉCIES ARBÓREAS COMERCIAIS NO EXPERIMENTO DO KM 114 NA FLONA DE TAPAJÓS, PA. (A) CONTROLE. (B) ÁREA MANEJADA. LINHA TRACEJADA PRETA: DIÂMETRO MÍNIMO DE CORTE DE 50 CM.....	60
FIGURA 11 – CURVAS DE INCREMENTO EM VOLUME PARA ÁRVORES INDIVIDUAIS PARA QUATRO ESPÉCIES DO EXPERIMENTO NO KM 114 DA FLORESTA NACIONAL DO TAPAJÓS, PA. (A) CONTROLE. (B) ÁREA MANEJADA. LINHA VERMELHA: IDADE DMC ESPECÍFICO (ANOS).....	63
FIGURA 12 – CURVAS DE CRESCIMENTO DE DIÂMETRO DE TODAS AS ESPÉCIES NO EXPERIMENTO DO KM 114 NA FLONA DE TAPAJÓS, PA. (A) CONTROLE. (B) ÁREA MANEJADA. LINHA TRACEJADA PRETA: DIÂMETRO MÍNIMO DE CORTE DE 50 CM.....	81
FIGURA 13 – INCREMENTO PERIÓDICO ANUAL EXTRA (IPA EXTRA, CM.ANO ⁻¹) EM DIÂMETRO FORNECIDO PELO TRATAMENTO DA ÁREA MANEJADA EM RELAÇÃO AO TRATAMENTO CONTROLE DO EXPERIMENTO NO KM 114 DA FLORESTA NACIONAL DO TAPAJÓS, PA., COM BASE NAS ESTIMATIVAS DO MC DE RICHARD.....	82

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 – TRATAMENTOS APLICADOS AO EXPERIMENTO FLORESTAL NO KM 114 DA FLORESTA NACIONAL DO TAPAJÓS, PA.....	40
TABELA 2 – MODELOS TESTADOS PARA ESTIMAR O NÚMERO DE ÁRVORES COM DAP \geq 5 CM POR CLASSE DIAMÉTRICA DAS ESPÉCIES SELECIONADAS DO EXPERIMENTO NO KM 114 DA FLORESTA NACIONAL DO TAPAJÓS, PA..	41
TABELA 3 – FUNÇÕES DE CRESCIMENTO PARA IDADE DESCONHECIDA.....	44
TABELA 4 – ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DO DIÂMETRO A 1,3 M DO SOLO DE QUATRO ESPÉCIES AMAZÔNICAS (DAP \geq 5 CM) DURANTE O PERÍODO DE MEDIÇÃO (1981 – 1 ANO ANTES DA EIR; 1989 – 7 ANOS APÓS EIR E 5 ANOS ANTES DOS TRATAMENTOS SILVICULTURAIS; E 2012 – AOS 30 ANOS APÓS A EIR E AOS 18 ANOS APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS SILVICULTURAIS) DO EXPERIMENTO NO KM 114 DA FLORESTA NACIONAL DO TAPAJÓS, PA.....	49
TABELA 5 – ESTATÍSTICAS DOS MODELOS DE FUNÇÃO DENSIDADE PROBABILÍSTICA (FDP) PARA AS QUATROS ESPÉCIES ANALISADAS (DAP \geq 5 CM) DURANTE O PERÍODO DE MEDIÇÃO (1981 – 1 ANO ANTES DA EIR; 1989 – 7 ANOS APÓS EIR E 5 ANOS ANTES DOS TRATAMENTOS SILVICULTURAIS; E 2012 – AOS 30 ANOS APÓS A EIR E AOS 18 ANOS APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS SILVICULTURAIS) DO EXPERIMENTO NO KM 114 DA FLORESTA NACIONAL DO TAPAJÓS, PA.....	53
TABELA 6 – COEFICIENTES E ESTATÍSTICAS DE QUALIDADE DE AJUSTE DOS MODELOS DE CRESCIMENTO AJUSTADOS POR ESPÉCIE E TRATAMENTO DO EXPERIMENTO NO KM 114 DA FLORESTA NACIONAL DO TAPAJÓS, PA.....	57
TABELA 7 – INCREMENTO PERIÓDICO ANUAL EXTRA (IPA EXTRA, CM.ANO ⁻¹) EM DIÂMETRO FORNECIDO PELO TRATAMENTO DA ÁREA MANEJADA EM RELAÇÃO AO TRATAMENTO CONTROLE DO EXPERIMENTO NO KM 114 DA FLORESTA NACIONAL DO TAPAJÓS, PA., COM BASE NAS ESTIMATIVAS DO MC DE RICHARDS.....	61
TABELA 8 – CICLO DE CORTE ESTIMADO DE ACORDO COM O MÉTODO GOL (ICA _{MÁX.}) POR ESPÉCIE, PARA UMA ÁREA EXPERIMENTAL DO KM 114 NA FLORESTA NACIONAL DE TAPAJÓS, PA.....	64

TABELA 9 – COEFICIENTES E ESTATÍSTICAS DE QUALIDADE DE AJUSTE DOS MODELOS DE CRESCIMENTO AJUSTADOS PARA TODAS AS ESPÉCIES E TRATAMENTO DO EXPERIMENTO NO KM 114 DA FLORESTA NACIONAL DO TAPAJÓS, PA.....	81
---	----

LISTA DE SIGLAS

CC	- Ciclo de Corte
DMC	- Diâmetro Mínimo de Corte
DMC _{esp.}	- Diâmetro Mínimo de Corte Específico
CC _{esp.}	- Ciclo de Corte Específico
IN	- Instrução Normativa
MMA	- Ministério do Meio Ambiente
DAP	- Altura em relação ao nível do solo (1,3 m)
IC	- Intensidade de Corte
EIR	- Exploração de Impacto Reduzido
ICMBIO	- Instituto Chico Mendes de Conservação da Biodiversidade
MC	- Modelo de Crescimento
IPA	- Incremento Periódico Anual
RNA	- Rede Neural Artificial
ICV _{máx}	- Incremento Corrente Volumétrico Máximo
GOL	- Growth-Oriented Logging

SUMÁRIO

1	INTRODUÇÃO.....	16
1.1	OBJETIVOS.....	19
1.1.1	Objetivo Geral.....	19
1.1.2	Objetivo Específico.....	19
2	REVISÃO DE LITERATURA.....	20
2.1	MANEJO FLORESTAL.....	20
2.2	MODELOS DE CRESCIMENTO E PRODUÇÃO FLORESTAL.....	21
2.3	MODELOS DE ÁRVORES INDIVIDUAIS.....	22
2.4	LEIS DO CRESCIMENTO BIOLÓGICO.....	23
2.5	MODELOS DE CRESCIMENTO BIOLÓGICO.....	24
2.6	MODELOS DE CRESCIMENTO BIOLÓGICOS SEM IDADE EXPLÍCITA... 31	
2.7	ESPÉCIES SELECIONADAS.....	34
2.7.1	<i>Zygia racemosa</i> (Ducke) Barneby e J.W.Grimes.....	34
2.7.2	<i>Tapirira guianensis</i> Aubl.....	35
2.7.3	<i>Minuartia guianensis</i> Aubl.....	36
2.7.4	<i>Apeiba albiflora</i> Ducke.....	37
3	MATERIAL E MÉTODOS.....	38
3.1	ÁREA DE ESTUDO.....	38
3.2	EXPERIMENTO.....	39
3.3	ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA PARA AS ESPÉCIES SELECIONADAS.....	40
3.4	MODELAGEM DE CRESCIMENTO DE DIÂMETRO.....	43
3.4.1	Incremento extra adicionado pelo manejo.....	45
3.4.2	Critérios específicos para espécies.....	46
4	RESULTADOS.....	47
4.1	PADRÃO DA DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA DAS ESPÉCIES ESTUDADAS.	47

4.2	MODELOS DE CRESCIMENTO EM DIÂMETRO PARA ÁRVORES INDIVIDUAIS POR ESPÉCIE.....	57
5	DISCUSSÃO.....	65
5.1	PADRÃO DIAMÉTRICO DAS ESPÉCIES ESTUDADAS NATIVAS DA AMAZÔNIA.....	65
5.2	CRESCIMENTO DIAMÉTRICO A NÍVEL DE ÁRVORE INDIVIDUAL POR ESPÉCIE.....	66
5.3	DMC E CC ESPECÍFICOS PARA ESPÉCIES COMERCIAIS AMAZÔNICAS.	68
6	CONCLUSÕES.....	68
	REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA.....	70
	ANEXO 1 – MODELAGEM DE CRESCIMENTO DE TODAS AS ESPÉCIES	81
	ANEXO 2 – EXEMPLO DE ROTEIRO EM LINGUAGEM ‘R’ PARA AJUSTES DOS MODELOS DE DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA DE <i>T. guianensis</i> EM 2012, NA ÁREA EXPERIMENTAL DA FLONA DE TAPAJÓS, PA.....	83
	ANEXO 3 – EXEMPLO DE ROTEIRO EM LINGUAGEM ‘R’ PARA AJUSTES DOS MODELOS DE CRESCIMENTO COM IDADE IMPLÍCITA DA ESPÉCIE <i>Z. racemosa</i> NA ÁREA EXPERIMENTAL MANEJADA DA FLONA DE TAPAJÓS, PA.....	89

1 INTRODUÇÃO

A floresta amazônica possui um grande reservatório da biodiversidade mundial (GODAR et al. 2012). Contudo, o desmatamento é uma grande ameaça. Soma-se a isto o pouco conhecimento sobre a dinâmica e comportamento da floresta em decorrência a atividades antrópicas. O manejo florestal conduzido dentro da legalidade propicia a sustentabilidade da produção de madeira ao longo do tempo, tanto do ponto de vista econômico (SANTANA et al., 2012) como ambiental (REIS et al., 2015).

Os estudos silviculturais em florestas naturais no Brasil tomaram impulso na década de 1950, com base no Código Florestal (Decreto Federal nº 23.793/1934 e Lei Federal nº 4.771/1965). No final da década de 1980 e início da década de 1990, seguindo as sugestões de Silva (1993) em relação à produção sustentada de madeira em sistema policíclico, o sistema silvicultural a ser adotado na Amazônia já estava delineado (YARED et al., 2000) e passou a ser regulamentado e implementado a partir da Instrução Normativa (IN) MMA No. 5 de dezembro de 2006 (BRASIL, 2006).

Os sistemas policíclicos são aqueles nos quais a colheita da madeira de indivíduos selecionados de algumas espécies comerciais é feita em intervalos regulares, conhecidos como ciclos de cortes (CC). São exemplos desses sistemas todos aqueles que se baseiam em corte seletivo, tais como os tradicionais métodos Filipino e Indonésio, como, o sistema CELOS, no Suriname (YARED e SOUZA, 1993).

A IN MMA No. 5 de dezembro de 2006 (BRASIL, 2006) estabelece que as explorações dos planos de manejo florestal na Amazônia, devem possuir CC variando de 25 a 35 anos para cortes com intensidade máxima de 30 m³/ha, e com pelo menos 10 anos para baixas intensidades com intensidade máxima de 10 m³/ha (vide Instrução Normativa nº 5, 2006). O Diâmetro Mínimo de Corte (DMC) generalizado sugere que as espécies sejam exploradas com no mínimo 50 cm em diâmetro a altura do peito (DAP), estabelecido em lei. Contudo, a atual regulamentação aceita um DMC específico, baseado em estudos científicos prévios, para substituir o DMC genérico.

Schöngart et al., 2017 mencionam que a legislação atual sobre manejo florestal não obriga o conhecimento sobre a variação no crescimento das árvores de diferentes espécies e ambientes, não levando em consideração a dinâmica futura da espécie, que pode ocasionalmente sofrer uma superexploração. Muitas das espécies são incapazes de se regenerar e se estabelecer, para substituir o volume colhido em um ciclo de corte, levando a longo prazo, declínios das suas populações (MOSTACEDO E FREDERICKSEN, 2000; PEÑA-CLAROS et al., 2008).

Assim, estudos envolvendo modelagem de crescimento e da estrutura diamétrica das espécies levam a uma compreensão detalhada sobre seu estoque de madeira no presente e futuro, e na dinâmica (recrutamento, mortalidade e crescimento) dessas espécies na floresta. Os modelos de árvores individuais são complexos ao tentar estimar com precisão e acurácia a realidade, dada a complexidade das florestas naturais tropicais. A árvore é a unidade utilizada para a simulação deste crescimento. Estudos do comportamento de árvores individuais desenvolvidos e modelos foram propostos para árvores de florestas naturais na Amazônia. Como exemplos pode-se citar alguns simuladores que preveem o crescimento de árvores, como o CAFOGROM (ALDER e SILVA, 2000), o SYMFOR (PHILLIPS et al., 2004) e outros modelos adaptados que descrevem o crescimento, como os por Silva et al. (2002); Cunha et al. (2016); Reis et al. (2016); Scolforo et al. (2017); Andrade et al. (2019); David et al. (2019); Batista et al. (2020). O primeiro passo no estabelecimento destes modelos é a compreensão das taxas de crescimento de cada árvore, por espécie, e em determinada situação e local.

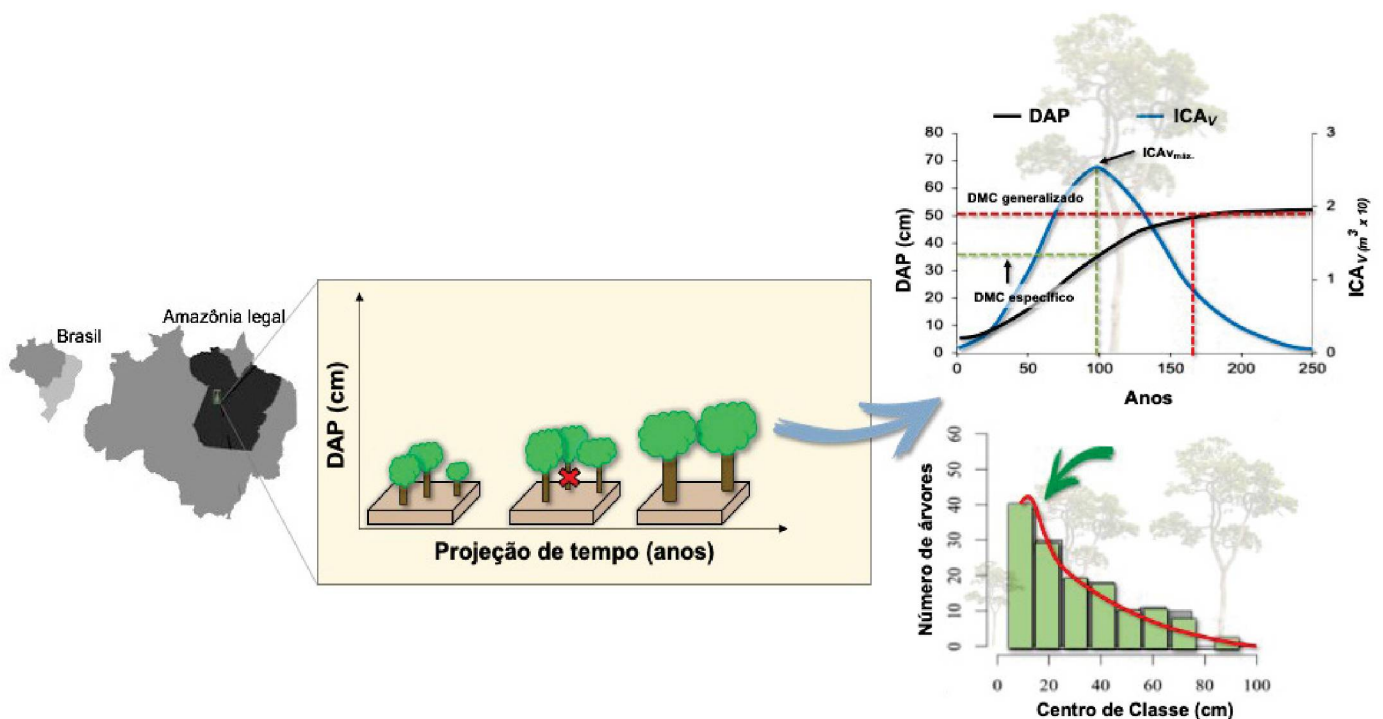
Existem algumas problemáticas ao analisar os modelos de crescimento e a distribuição diamétrica das espécies de florestas naturais individualmente, isso porque: i) número limitado de árvores de determinada espécie por hectare nos inventários, na maioria, menor que 1 árvore/ha.; ii) distribuição diferentes por espécies, onde, algumas funções de densidade probabilística são menos sensíveis, podendo extrapolar as estimativas dos parâmetros; iii) as variações no padrão diamétrico das espécies ao longo do tempo, ocasionadas por alguma perturbação (por exemplo, exploração), podendo comprometer o estoque futuro de determinada espécie. iv) as espécies de florestas nativas possuem formas de crescimento distintos ou iguais, os modelos de crescimento de todas as espécies aglomeradas não são capazes de descrever esses comportamentos de forma individual; v) CC e

DMC generalizados podem não atender a realidade de cada espécie, e assim comprometer a sustentabilidade durante a exploração contínua de florestas nativas.

Para tal, foram testadas as seguintes hipóteses: i) o padrão diamétrico das espécies arbóreas amazônicas é favorecido com a aplicação de tratamentos silviculturais pós-extração; ii) os modelos para árvores individuais testados são capazes de expressar o crescimento das espécies arbóreas amazônicas; iii) o crescimento em diâmetro é sensível aos tratos silviculturais pós-extração; e iv) as espécies possuem dinâmicas diferentes possibilitando DMC e Ciclo de Corte (CC) específico por espécie para garantir a sustentabilidade da floresta.

A implementação destas informações em modelos simples, pode tornar-se uma ferramenta para o planejamento em médio e longo prazo, oferecendo subsídios técnicos para a decisão sobre a intensidade de corte (IC) e o CC mais adequado para a sustentabilidade da floresta (Figura 1).

FIGURA 1 – EXEMPLO DE FERRAMENTAS PARA O PLANEJAMENTO DE MÉDIO E LONGO PRAZO, OFERECENDO SUBSÍDIOS TÉCNICOS PARA A DECISÃO SOBRE A IC, DMC E CC.



FONTE: A autora (2022).

1.1 OBJETIVOS

1.1.1 Objetivo Geral

Avaliar os efeitos da exploração e dos tratamentos silviculturais pós-corte, durante 30 anos, na estrutura diamétrica e no crescimento individual de árvores, para determinação de um Diâmetro Mínimo de Corte (DMC) e de um Ciclo de Corte (CC) Específico, para quatro espécies comerciais na Amazônia brasileira.

1.1.2 Objetivo Específico

- (i) Modelar a distribuição diamétrica por espécie em períodos diferentes em área manejada;
- (ii) Modelar o crescimento individual de árvores das espécies selecionadas em áreas manejada e não manejada;
- (iii) Determinar o Diâmetro Mínimo de Corte (DMC) específico por espécie;
- (iv) Sugerir um Ciclo de Corte (CC) específico para cada espécie estudada.

2 REVISÃO DE LITERATURA

2.1 MANEJO FLORESTAL

O manejo florestal está previsto no Código Florestal (Art. 15º da Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965, revogada pela lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012), como instrumento necessário para a exploração de florestas primitivas na bacia amazônica, tendo sido regulamentado pelo Decreto nº 5.975, de 30 de novembro de 2006 (BRASIL, 2006, BRASIL, 2012). Compreende a administração da floresta para a obtenção de benefícios econômicos, sociais e ambientais, respeitando-se os mecanismos de sustentação do ecossistema objeto do manejo, considerando cumulativa ou alternativamente, a utilização de múltiplas espécies madeireiras, de múltiplos produtos e subprodutos não madeireiros bem como a utilização de outros bens e serviços de natureza florestal, conforme previsto no Item VI do Art. 3º da Lei nº 11.284, de 2 de março de 2006 (BRASIL, 2006).

O termo manejo florestal tem várias implicações, ou seja, pode ser um tipo de exploração realizada de maneira planejada com propósito de assegurar a manutenção da floresta para outro CC (SABOGAL et al., 2006). Para alcançar esse objetivo, o Manejo florestal deve considerar a Exploração de Impacto Reduzido (EIR), que também inclui a aplicação de tratamentos silviculturais.

Para Carvalho (1999), os planos de manejo de florestas naturais devem atender várias demandas: a composição florística da área, a diversidade das espécies, a estrutura da floresta, o crescimento dos indivíduos, o recrutamento e a mortalidade, e todo o processo dinâmico de recomposição e reestruturação da floresta. Devem ser considerados dois pontos i) a primeira exploração: a densidade da floresta, o estoque existente, a composição florística e a distribuição espacial dos indivíduos na área a ser explorada (clareiras). ii) próximas explorações: todos os parâmetros anteriores citados devem ser considerados, bem como a taxa de crescimento das espécies, o recrutamento, o ingresso e a mortalidade.

Um bom manejo seria, segundo Silva et al. (1996), a realização de uma exploração cuidadosa (sendo necessário o uso racional dos recursos florestais) em conjunto com a aplicação de tratamentos silviculturais com dois propósitos:

regeneração e crescimento florestal para a próxima colheita. O monitoramento é essencial para a tomada de decisões técnicas e administrativas presentes e futuras.

2.2 MODELOS DE CRESCIMENTO E PRODUÇÃO FLORESTAL

Os modelos utilizados para prognosticar o crescimento e a produção florestal são divididos em três categorias: i) modelos globais ou de povoamento; ii) modelos em classes de diâmetros e iii) modelos individuais.

Para Vanclay (1994), é de extrema importância a inferência correta sobre o crescimento de uma árvore ou povoamento para diversas finalidades, como por exemplo definir a rotação silvicultural e prognosticar a produção florestal. A projeção e/ou a prognose do crescimento e da produção florestal é um dos produtos do manejo florestal. Conhecer a floresta é necessário para ocorrer uma boa gestão dos produtos florestais (CAMPOS e LEITE, 2013).

A modelagem de projeção e/ou prognose é uma ferramenta capaz de auxiliar em muitos aspectos, como prever os rendimentos futuros e explorar opções de silvicultura (VANCLAY, 1994). Assim sendo, diante da importância dessa técnica, as tomadas de decisão do manejo florestal, têm sido cada vez mais tomadas com base em modelos matemáticos e/ou estatísticos (MAESTRI et al., 2003).

Na classificação genérica dos modelos florestais são considerados dois fatores: *i*) o tipo de povoamento florestal a ser estudado e as *ii*) variáveis incluídas no modelo. Dependendo do tipo de informações, os modelos são, ainda, classificados como do tipo *i*) povoamento total, *ii*) modelos de distribuição diamétrica e *iii*) modelos de árvore individual (CAMPOS e LEITE, 2002).

Em florestas naturais, por conta da grande heterogeneidade das variáveis, torna-se necessário o ajuste de modelos de crescimento mais complexos do que os aplicados à povoamentos homogêneos. A existência de bancos de dados completos, para ajuste destes modelos, possibilita expressar melhor a realidade, pois os modelos ajustados podem ser mais acurados e precisos em suas estimativas. Para Vanclay (1994), as ferramentas mais utilizadas para modelagem do crescimento e produção são baseadas em projeções por classe diamétrica.

A floresta tropical é composta por diversas espécies, que mesmo com idades indeterminadas, possuem uma ampla gama de padrões de crescimento e dimensões de fuste, sendo vários os modelos de crescimento para florestas inequiduais

(BRAZ, 2010). A prognose do crescimento permite projetar a estrutura futura da floresta, bem como estimar sua capacidade de recuperação. A estimativa do estoque futuro permite a tomada de decisões com relação a taxas de corte que não comprometam a capacidade da produção da floresta.

2.3 MODELOS DE ÁRVORES INDIVIDUAIS

O primeiro modelo de crescimento e produção florestal por árvore individual foi desenvolvido por Newnham em 1964 (LIU e ASHTON, 1995). Esses modelos foram ajustados por árvores, e o produto foi o detalhamento individual do crescimento. Além disso, pode ser obtido a modelagem de competição, mortalidade, e do recrutamento individual. Deste modo, a utilização desta ferramenta é necessária pois fornece informações detalhadas sobre a dinâmica florestal (LIU e ASHTON, 1995).

Para Wallach et al., (2006) a estratégia de modelagem do crescimento individual da planta é simples: i) Uma função adequada da taxa de crescimento relativo é selecionada ii) Identifica-se uma característica do tamanho da planta primária, por exemplo o diâmetro da árvore. iii) Características secundárias do tamanho da planta, por exemplo, a altura e o diâmetro da árvore, estão ligadas à função da taxa de crescimento relativa do tamanho da planta primária. iv) Os parâmetros dos modelos da função da taxa de crescimento são estimados.

Wenk et al., (1990.) selecionaram características do tamanho da planta primária e secundária de tal forma que a propagação de erros foi efetivamente reduzida, identificaram o volume de árvores como de tamanho tridimensional e característica primária, e que a altura total e o diâmetro do caule das árvores são características secundárias. No entanto, por se tratar de uma abordagem genérica, não há necessidade de se seguir rigorosamente essa recomendação.

A árvore é a unidade básica nessa categoria de modelo de crescimento individual (AVERY; BURKHART, 2002). Nesse sentido, o torna mais flexível pois estima com maior precisão e acurácia o crescimento, sob uma variedade de condições (WEISKITTEL et al., 2011).

Para Vanclay (1994), os modelos de árvores individuais simulam cada indivíduo com relação ao crescimento e mortalidade. Simulam o crescimento individual em diâmetro, podendo também prever em que circunstâncias aquela

árvore se encontrará em i anos. Podem prever o quanto crescerá em diâmetro, podendo também indicar se a árvore irá morrer ou viver em determinado tempo e qual será a sua altura e a circunferência da copa. São n possibilidades que podem ser determinadas a nível de árvores.

Para DANIELS et al., (1986), essa categoria de modelos é mais complexa quando comparados aos modelos para povoamento ou por classe de diâmetro. Isto se deve a dois grandes fatores: *i*) são formados por submodelos para estimar as variáveis pretendidas e *ii*) algumas variáveis são de difícil medição, como por exemplo, as variáveis relacionadas às medições das copas das árvores.

2.4 LEIS DO CRESCIMENTO BIOLÓGICO

Para Imaña et al., (2005) o crescimento biológico é regido por leis, nas quais, é necessário ter atenção crítica, pois podem perder precisão e acuracidade à medida que o período de tempo sob o qual elas são aplicadas diminui. No crescimento individual, o autor Medawar (1941) menciona cinco leis, sendo:

A 1ª Lei: o tamanho é uma função monotônica crescente da idade. Isto representa que os organismos não decrescem em tamanho quando ficam mais velhos. Ao considerar as funções mais comuns, elas incluem um valor limite para que este organismo cresça (assíntota), não excluindo a possibilidade de alcançar um tamanho máximo e que seja estacionário. Isso mostra que é necessário compreender as características da espécie a ser estudada para não ocorrerem erros de padrões biológicos.

2ª Lei: os resultados do crescimento biológico são, por si só, tipicamente capazes de crescer. O crescimento biológico é fundamentalmente do tipo multiplicativo. Esta é a única "Lei do Crescimento" comumente reconhecida como tal.

Isto justifica o uso quase universal da diferencial relativa $\frac{dw}{dt} = \frac{d}{dt} \cdot [\ln(w)]$ como uma das mais prováveis em expressar, de modo significativo, mudanças de tamanho. A estimativa que esta expressão fornece é a da taxa de crescimento específico ou taxa relativa de crescimento. O caso especial de crescimento pela lei do interesse composto corresponde a uma taxa de crescimento uniforme específica.

3ª Lei: em um ambiente constante, o crescimento ocorre com velocidade constante, uniforme e específica. A constância que a lei requer não é apenas do

ambiente externo, mas do interno também. Do lado externo, o trabalho deve ser feito sobre um sistema de crescimento se o ambiente permanece constante, e desde que o meio interno dos organismos complexos não seja acessível ao tipo de controle experimental que é exigido, apenas em culturas de tecidos e em populações de organismos não celulares que podem ser induzidos a crescer exponencialmente por uma extensão de tempo significativa.

A quarta lei, então, relata a segunda para condições que atualmente possuem o desenvolvimento de organismos com muitas células.

4ª Lei: sob as atuais condições de desenvolvimento, a aceleração específica de crescimento é sempre negativa. Enquanto a taxa de crescimento pode elevar-se e então cair, como ocorre em qualquer organismo, o crescimento é descrito por uma curva sigmóide e a taxa específica de crescimento sempre cai. Há pouca, se alguma, exceção para esta regra geral. De modo grosseiro, isto significa que "aqueles resultados do crescimento biológico, embora capazes de crescer, não são capazes de crescer tão rápido quanto seus precursores". Portanto, a senescência é um processo que acontece continuamente ao longo da vida.

5ª Lei: a taxa específica de crescimento declina mais e mais lentamente a medida que o organismo aumenta em idade: A aceleração específica do crescimento $\frac{d}{dt} \left[\frac{dw}{dt \cdot W} \right]$ enquanto sempre negativa, caminha progressivamente para zero durante o curso da vida. De modo breve, "organismos envelhecem mais rápido quando eles são jovens" ou, ainda, "organismos envelhecem mais lentamente quando eles ficam mais velhos". A taxa em que a taxa específica de crescimento declina é um importante parâmetro em qualquer equação de crescimento, e seu valor pode, em certas circunstâncias, ser medido por meios experimentais.

2.5 MODELOS DE CRESCIMENTO BIOLÓGICO

Conforme Vanclay (1994) e Avery e Burkhart (2002), crescimento refere-se ao aumento das dimensões de um ou mais indivíduos em uma floresta durante um determinado período de tempo. O crescimento dos organismos vivos segue uma curva sigmoide, a qual inicia-se com uma fase relativamente rápida com a concavidade voltada para cima, seguida de uma segunda fase retilínea, e termina com um período de senescência, caracterizado por um crescimento cada vez mais

lento, apresentando curva com concavidade voltada para baixo e atingindo, no final, a maior dimensão (assíntota) (ZEIDE, 1993).

Os modelos de crescimento biológico são funções matemáticas que descrevem a curva de crescimento sigmoidal de seres vivos. Esses modelos apresentam estruturas não-lineares e estimam o crescimento unicamente em função da idade. Burkhart e Tomé (2012) classificam esses modelos ou funções de crescimento de acordo com tipo de estrutura matemática, sendo: Função do Tipo Lundqvist-Korf, Função do Tipo Richards e Função do Tipo Hossfeld IV.

i. Função Lundqvist-Korf

Outra generalização Lundqvist-Korff Eq. (1) (KORF, 1939; LUNDQVIST, 1957). O Correspondente da função Eq. (2).

$$\frac{1}{Y} \frac{dY}{dt} = k \frac{m}{t^{(m+1)}} \quad (1)$$

$$Y = Ae^{-k \frac{1}{t}} \quad (2)$$

Em que:

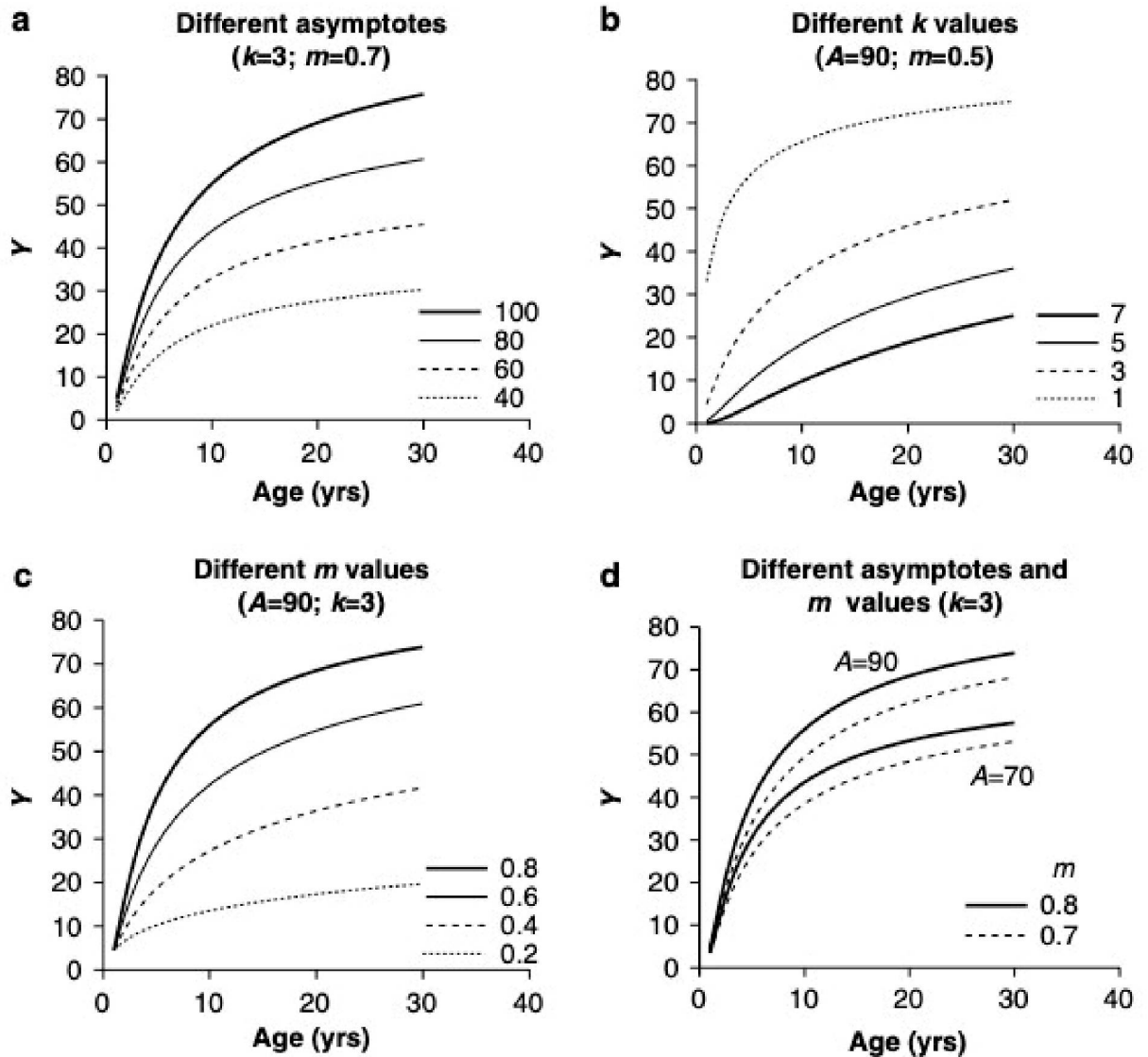
$A: Y_0 e^{\frac{k}{t_0^m}}$ é a assisntota;

$t, Y:$ são os valores iniciais.

O parâmetro k está inversamente relacionado à taxa de crescimento, mas também é influenciado pelo parâmetro m , adicionando flexibilidade à curva. A Figura 2 ilustra a flexibilidade da função Lundqvist. Alterando os parâmetros (assíntota, k e m) é possível cobrir uma grande variedade de formas. Ao fixar os outros parâmetros, o parâmetro k tem uma relação inversa com a taxa de crescimento, enquanto o inverso é verdadeiro para o parâmetro m . É importante enfatizar que os três parâmetros interagem como é mostrado na Figura 2. É possível obter maior crescimento com um valor menor de m , se este último for combinado com uma maior assíntota. A localização do ponto de inflexão não depende do valor da assíntota, mas nos valores combinados de k e m , aumentando com k . O efeito de m é altamente dependente do valor de k . A Figura 2 mostra o efeito combinado dos

dois parâmetros de forma na idade em que a inflexão ocorre. O respectivo valor de Y_0 , no entanto, não depende do parâmetro k , mas da assíntota e m valores dos parâmetros (Figura 2), ocorrendo em valores Y mais altos, maior a assíntota e o valor de m .

FIGURA 2 – FLEXIBILIDADE DA FUNÇÃO DE CRESCIMENTO LUNDQVIST-KORF COM VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS.



FONTE: Burkhart e Tomé (2012).

ii. Função Richards

Richards (1959) generalizou a função apresentada por von Bertalanffy (1938) para o crescimento animal (PIENAAR e TURNBULL 1973). Esta função

descreve a taxa absoluta de crescimento como a diferença entre uma taxa anabólica (metabolismo construtivo), que nas plantas é proporcional à área fotossinteticamente ativa e uma taxa catabólica que é proporcional à taxa catabólica biomassa. Se a área fotossinteticamente ativa for expressa como uma relação alométrica com a biomassa, essas relações poderão ser taxa anabólica Eq. (3), taxa catabólica Eq. (4), taxa de crescimento potencial Eq. (5) e taxa de crescimento Eq. (6).

$$c_1 S = D c_1 (c_0 Y^m) / D c_2 Y^m \quad (3)$$

$$c_3 Y \quad (4)$$

$$c_4 (c_2 Y^m - c_3 Y) \quad (5)$$

$$c_4 (c_2 Y^m - c_3 Y) \quad (6)$$

Em que:

S é a área fotossinteticamente ativa;

Y: é a biomassa (ou outra árvore / suporte variável);

m: é a constante alométrica da relação entre S e Y;

c₀; c₁; c₂; c₃: são coeficientes de proporcionalidade; e c₄ é um coeficiente de eficácia.

A seguinte forma diferencial da função Richards Eq. (7).

$$\frac{dY}{dt} = a Y^m - b Y \quad (7)$$

Por integração (equação diferencial de Bernoulli), a função de rendimento correspondente Eq. (8).

$$Y = A (1 - c e^{-kt})^{\frac{1}{1-m}} \quad (8)$$

Onde os parâmetros c Eq. (9), k Eq. (10) A Eq. (11).

$$c = e^{-(1-m)kto} = e^{-kto} \quad (9)$$

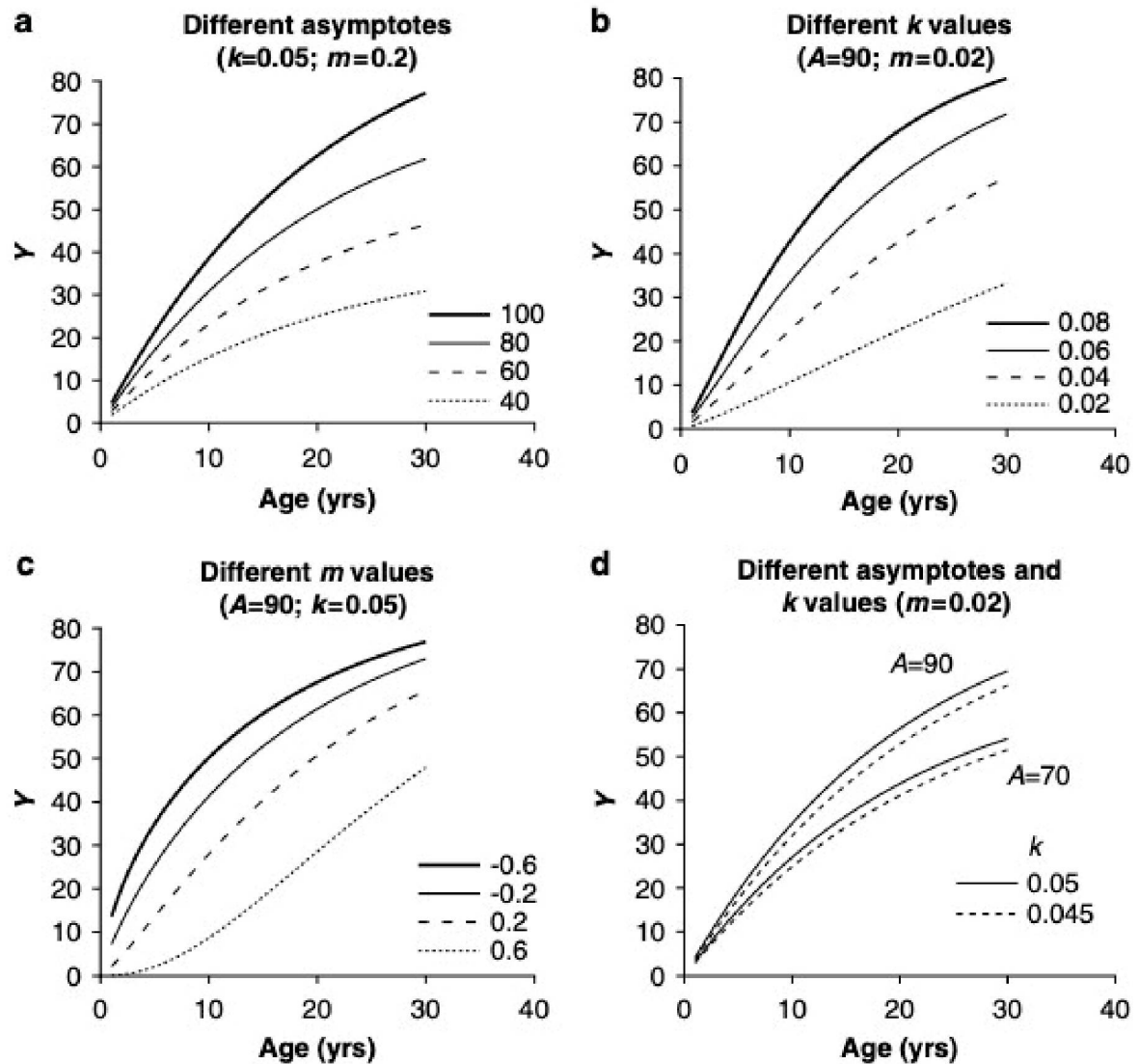
$$K=(1-m)b \quad (10)$$

$$A=\left(\frac{a}{b}\right)^{\frac{1}{1-m}} \quad (11)$$

O expoente m é frequentemente considerado igual a $2/3$. É importante observar que as funções monomoleculares, logísticas e Gompert são funções particulares da função de Richards quando o parâmetro m assume, respectivamente, os valores 0, 2 ou tende a 1. A Figura 3 mostra a flexibilidade da função Richards, bem como o efeito dos três parâmetros nos respectivos parâmetros. Valores mais altos de k produzem taxas de crescimento mais altas, enquanto, em contrapartida, pequenos valores de resultados resultam em maiores taxas de crescimento. Como esperado, a assíntota também está positivamente relacionada com rendimentos mais altos. As figuras 1 e 2 mostram os efeitos da alteração dos valores dos parâmetros na localização do ponto de inflexão e no valor Y correspondente.

A Figura 3 mostra que valores mais altos do parâmetro k resultam em pontos de inflexão anteriores, enquanto o relacionamento oposto pode ser observado com o parâmetro m . O valor de Y no momento em que o ponto de inflexão ocorre é mais alto para valores mais altos de assíntota, mas está inversamente relacionado ao valor do parâmetro m . Causton e Venus (1981) apresentam um estudo detalhado sobre a aplicação da função de Richards na modelagem de crescimento de plantas.

FIGURA 3 – FLEXIBILIDADE DA FUNÇÃO DE CRESCIMENTO RICHARDS COM VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS.



FONTE: Burkhart e Tomé (2012).

iii. Função Hossfeld IV

A função de Hossfeld IV é uma função sigmoide (ZEIDE, 1993) para a descrição do crescimento de árvores. A formulação da função de Lundqvist como uma equação de diferença independente de idade (Lundqvist-t) é aparentemente complexa, por causa de seu significado biológico intrínseco, converge muito bem quando ajustada aos dados (TOMÉ et al., 2006).

A função Hossfeld IV é uma função sigmoide, proposta originalmente em 1822 (ZEIDE 1993), para a descrição do crescimento das árvores Eq. (12).

$$Y = \frac{t^k}{c + \frac{t^k}{A}} = A \frac{t^k}{Ac + t^k} = A \frac{t^k}{c_1 + t^k} \quad (12)$$

Em que:

A: é a assíntota;

t: é a idade;

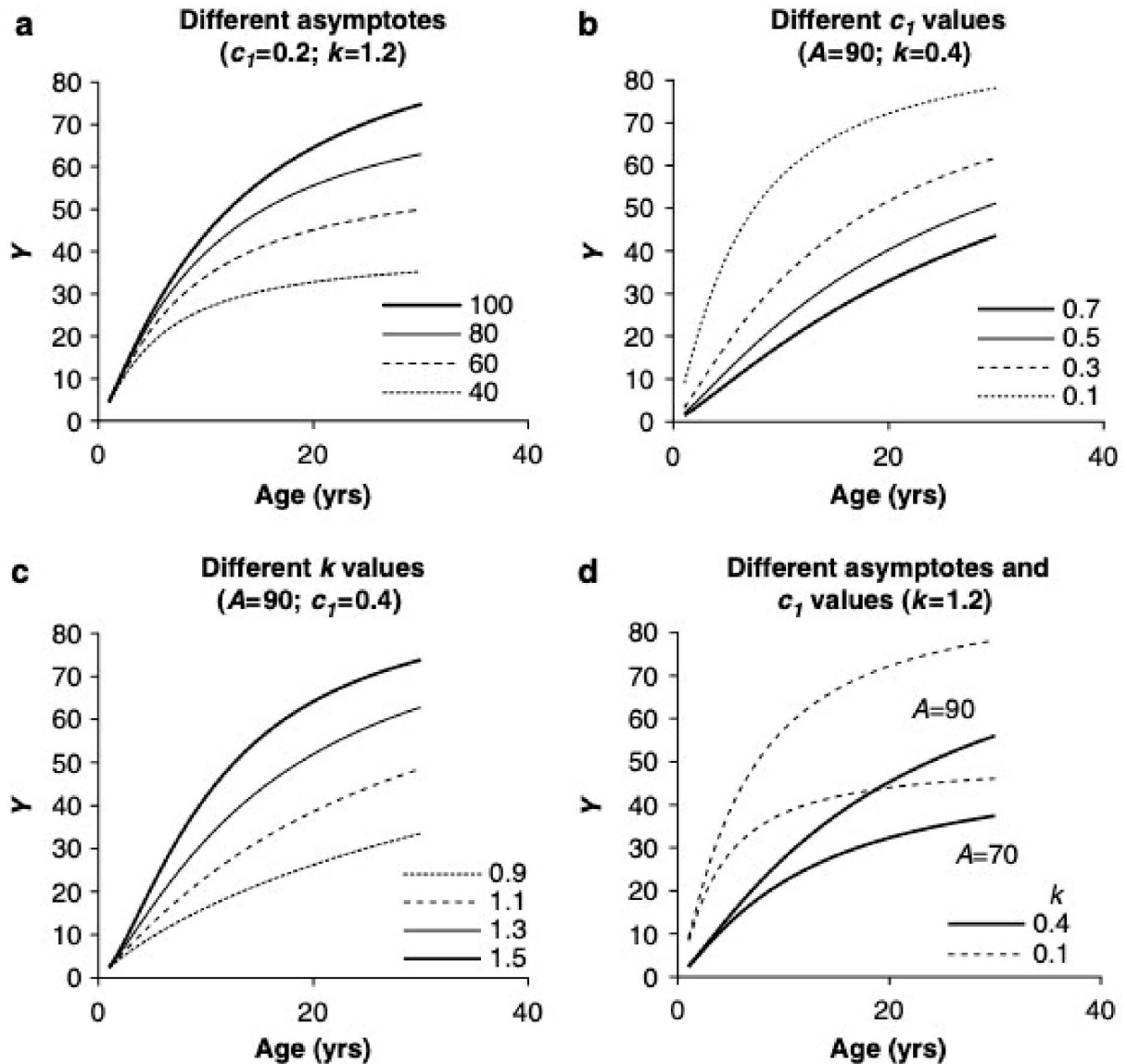
c e k: são parâmetros.

A função também pode ser obtida a partir da função logística generalizada na usando $f(X, t) = -k \ln(t)$. Consequentemente, alguns autores (por exemplo, CIESZEWSKI 2000) o designam como a função de crescimento logístico.

A equação não se baseia em nenhuma lógica biológica específica, mas geralmente apresenta um bom desempenho. Segundo Kiviste (1988), é a terceira mais acurada das 31 equações de três parâmetros, quando as três principais variáveis de suporte (altura total da árvore, diâmetro do caule e volume) são consideradas juntas. Kiviste (1988) descobriu ainda que era a melhor equação para o crescimento do volume.

A função Hossfeld IV é capaz de assumir várias formas e produzir pontos de inflexão localizados mais cedo ou mais tarde na vida da árvore ou do suporte (Figura 4).

FIGURA 4 – FLEXIBILIDADE DA FUNÇÃO DE CRESCIMENTO HOSSFELD IV COM VARIAÇÃO DOS PARÂMETROS.



FONTE: Burkhart e Tomé (2012).

2.6 MODELOS DE CRESCIMENTO BIOLÓGICOS SEM IDADE EXPLÍCITA

Os modelos de crescimento biológico possuem idade como única variável independente. No entanto, a idade não é geralmente disponível em florestas naturais. Para as espécies arbóreas nativas, como na floresta amazônica, a obtenção da variável idade é de difícil determinação (IMANÑA et al., 2005).

Para empregar modelos de crescimento no caso em que idade é indisponível, esses modelos são reformulados para que se considere o intervalo de tempo de crescimento da árvore, e não a idade da árvore Eq. (13).

$$Y = A e^{-kt} \quad (13)$$

Considerando a Eq. (13), a produção Y na idade t_1 Eq. (14) e t_2 Eq. (15).

$$Y_1 = A e^{-kt_1} \quad (14)$$

$$Y_2 = A e^{-kt_2} \quad (15)$$

Isolando-se A , temos Eq. (16) e Eq. (17).

$$A = \frac{Y_1}{e^{-kt_1}} \quad (16)$$

$$A = \frac{Y_2}{e^{-kt_2}} \quad (17)$$

Igualando-se as duas expressões Eq. (16) e Eq. (17), obtêm as Eq. (18) e Eq. (19).

$$\frac{Y_1}{e^{-kt_1}} = \frac{Y_2}{e^{-kt_2}} \quad (18)$$

$$Y_2 = Y_1 e^{-k(t_2 - t_1)} \quad (19)$$

As equações de crescimento na sua forma integral, na maioria, não são usadas para simular o crescimento de povoamentos de idade desconhecida, pois existe a dependência desta. Entretanto, Tomé et al., (2006) propuseram uma metodologia para ajustar funções de crescimento como equações de diferenças, nas quais a idade não está explícita, aplicando este conceito às funções de Lundqvist-

Korf e Richards. Mais recentemente, Burkhart e Tomé (2012) aplicaram a mesma metodologia à função de Hossfeld IV. Estas equações representam uma família de funções de crescimento com todos os parâmetros comuns exceto um, denominado de parâmetro livre (TOMÉ et al., 2006).

Tomé et al. (2006) mostraram que é possível obter modelagem de como o crescimento funciona utilizando equações de diferença, nas quais a idade não é explícita. Os modelos de diferença independentes da idade podem ser obtidos resolvendo a equação para a idade (t) e substituindo-a na expressão da função de crescimento por $a = t_2 - t_1$, em que a é o intervalo de tempo de crescimento (ou projeção). Dessa forma, a Eq. (20) pode ser assim reescrita:

$$Y_2 = Y_1 e^{-k(a)} \quad \text{ou} \quad Y_{t+a} = Y_t e^{-k(a)} \quad (20)$$

O modelo de diferença que não depende da idade, pode ser obtido por um procedimento semelhante ao normalmente utilizado para ajustar funções de crescimento como equações de diferença (por exemplo, Amaro et al., 1998). Para exemplificar o procedimento com a função Ludqvist, é possível ajusta-la por idade t_i .

$$Y_i = A e^{-k \frac{1}{t_i^m}} \quad (21)$$

$$t_i = \left[\frac{-k}{\ln(Y_i/A)} \right]^{\frac{1}{m}} \quad (22)$$

$$Y_{t+a} = A e^{-k \frac{1}{(t+a)^m}} \quad (23)$$

$$Y_{t+a} = A e^{-k \frac{1}{\left[\left(\frac{-k}{\ln(Y_t/A)} \right)^{\frac{1}{m}} + a \right]^m}} \quad (24)$$

$$Y_{t+a} = A \left\{ 1 - e^{-ka} \left[1 - \left(\frac{Y_t}{A} \right)^{1-m} \right] \right\}^{\frac{1}{1-m}} \quad (25)$$

2.7 ESPÉCIES SELECIONADAS

2.7.1 *Zygia racemosa* (Ducke) Barneby e J.W.Grimes

Zygia racemosa (Ducke) Barneby e J.W.Grimes é uma espécie arbórea de grande importância na indústria da madeira devido à sua dureza, pertence à família Leguminosae/Mimosoideae e, segundo Lima et al. (2004), encontra-se no estrato superior 25-30 metros de altura. Segundo Alencar (1998), a espécie é perene, floresce entre julho e outubro e frutifica entre setembro e fevereiro. Restrita à América do Sul (Brasil, Colômbia, Guiana, Guiana Francesa, Peru e Suriname) (BARNEBY e GRIMES, 1997) e amplamente distribuída na Amazônia brasileira (Amapá, Amazonas, Maranhão, Mato Grosso, Pará e Rondônia), ocorrendo em florestas de terra firme, de solo argiloso e, segundo Barneby e Grimes (1997), podendo ocorrer também na caatinga amazônica (campina), em solo arenoso.

A espécie é semelhante à *Z. basijuga* e a *Z. claviflora* pelo aspecto vegetativo. Assemelha-se à *Z. claviflora* por apresentar estípulas lanceoladas longas e papiráceas, da qual difere pelos nectários foliares na base do pecíolo, cupuliformes transversalmente comprimidos entre os pares de pinas e entre os foliólulos, ocasionalmente dois entre as pinas, cupuliformes circulares, pelo tamanho da corola (3,5-5,0 mm compr.) e por apresentar pseudoracemo de capítulos. Essa espécie tem grande importância madeireira, conhecida no Brasil como “angelim-pedra”, “angelim-rajado”, “ingárana” e “urubuzeiro” (BARNEBY e GRIMES 1997).

Z. racemosa na década de 90 pertenceu a lista de espécies protegidas pelo Instituto Brasileiro de Proteção ao Meio Ambiente e Recursos Naturais Renováveis – IBAMA devido à alta exploração de sua madeira, sendo classificada como espécie ameaçada de extinção, contudo, atualmente, não faz parte (vide portaria MMA nº 561, 15 de dezembro de 2021).

Madeira muito pesada (0,95-1,00 g/cm³), cerne castanho-amarelo-claro sobre fundo amarelo-pardacento, alburno amarelo, grã revessa ou direita, textura média para grosseira, ausência de brilho e com cheiro imperceptível (MEIO e GOMES, 1979). Apresenta vasos com diâmetro tangencial de 110-200j./m (em média 150 j./m), a forma da seção dos vasos é oval, com tendência a circular e elementos vasculares de 140- 580j./m de comprimento (média 370j./m). O parênquima axial é

aliforme confluyente unindo alguns vasos. As camadas de crescimento são pouco distintas. Sua madeira pode ser usada para tacos de assoalhos, construção em geral, compensado, marcenaria de luxo, carpintaria, cabo de talheres, bengalas, objetos de adorno entre outros usos (FERREIRA et al. 2001).

2.7.2 *Tapirira guianensis* Aubl.

Tapirira é um gênero neotropical com oito espécies, distribuído desde o sul do México até o sul do Brasil, Bolívia e Paraguai (MITCHELL, 1995; SILVA-LUZ, 2011). No Brasil, existem três espécies de *Tapirira*, das quais *T. guianensis* Aubl. é a espécie mais amplamente distribuída, ocorrendo em todos os estados brasileiros, com exceção de registros para o Rio Grande do Sul (SILVA-LUZ e PIRANI, 2022).

T. guianensis popularmente conhecida como “peito-de-pombo” é encontrada em várias formações vegetacionais da Amazônia, em matas ciliares e em florestas pluviais do Nordeste, Sudoeste e Sul e em formações secundárias, sobre solo úmido (SILVA-LUZ, 2011). Apresenta-se como árvore que pode alcançar 30 m de altura por 1 m de diâmetro, com tronco reto ou tortuoso (TERRAZAS e WENDT, 1995), com sapopemas medindo de 40 cm a 60 cm de altura, casca cinza-escura ou marrom, rugosa e com fendas longitudinais, casca viva (interna) avermelhada. As folhas são compostas, dispostas de forma alternada, portando de 3 a 11 folíolos (uma parte da folha composta) opostos, muito variáveis na forma e no tamanho, delicados ao tato e sem pilosidade (COSTA et al., 2014).

A ecologia da espécie é de estágio sucessional secundário inicial, síndrome de dispersão zoocórica, perenidade das folhas perenifólia, de crescimento rápido, densidade da copa média, com floração de setembro a novembro, ocorrendo em solos arenosos, extremamente ácidos e pobres. Espécie tolerante a alumínio e com boa adaptação em terrenos alagados (COSTA et al., 2014).

A madeira é de leve a moderadamente pesada (0,45 a 0,65 g/cm³), cerne bege a rosado, grã direita, textura fina a média, superfície lisa ao tato, fácil de serrar, aplainamento médio, moderadamente dura ao corte (FEDALTO et al., 1989; INSTITUTO BRASILEIRO DE DESENVOLVIMENTO FLORESTAL, 1981; UNIVERSIDADE DE LOS ANDES, 1974; PAULA e ALVES, 2007). A espécie pode ser utilizada na fabricação de cabos de vassoura, contraplacado, aglomerado, celulose, movelaria, artesanato, brinquedos, painéis, compensados, embalagens

leves, obras de entalhe, móveis comuns, saltos para calçados, urna funerária, carvão, lenha, forros, lambris, molduras e caixotaria leve (CARVALHO, 2006).

A espécie é importante elemento do estrato lenhoso de matas do Brasil Central (SILVA JÚNIOR et al. 1998). Sua ampla distribuição contrasta com a presença de sementes dióicas, que exigem transferência de pólen entre indivíduos e está geralmente associada às plantas lenhosas mais raras e características de estágios tardios de sucessão (ACKERLY et al., 1990, IBARRA-MANRÍQUEZ e OYAMA 1992). Guapyassú (1994), estudando as fases sucessionais da floresta atlântica-submontana, registrou a presença de *T. guianensis* apenas no estágio sucessional de capoeirão, com baixa frequência de indivíduos no primeiro estrato. Para esta situação, foi relatado com destaque a altura dos indivíduos. Para as fases de capoeira e floresta primária não se verificou a presença da espécie.

2.7.3 *Minquartia guianensis* Aubl.

Minquartia guianensis Aubl., pertencente à família Olacaceae, é conhecida popularmente como acariquara, acariquara-roxa ou aquariquara. É encontrada na Bolívia, Brasil, Colômbia, Costa Rica, Equador, Guiana, Guiana Francesa, Nicarágua, Panamá, Peru, Suriname e Venezuela (SLEUMER, 1984). No Brasil ocorre nos estados do Acre, Amazonas, Amapá, Maranhão, Mato Grosso, Pará, Rondônia, Roraima, em floresta de terra firme (NOGUEIRA et al., 2005), de várzea e de igapó (CARIM, 2016), assim como em área de transição entre o cerrado e a floresta (BATISTA et al., 2015). Ocorre em solos arenosos ou argilosos em áreas de elevada precipitação pluviométrica (SLEUMER, 1984).

É uma espécie clímax que atinge o dossel de florestas tropicais, com até 25 m de altura e 120 cm de DAP (diâmetro à altura do peito, medido a 1,30 m do solo) (LIBERATO, 2005), considerada promissora para reflorestamento na Amazônia peruana, com elevado valor comercial (ARÓSTEGUI VARGAS e DIAZ PORTOCARRERO, 1992). A madeira apresenta elevada durabilidade natural (GJOVIK et al., 1991) por ser resistente ao ataque de grande variedade de organismos presentes no solo (CARDIAS, 1985), podendo resistir por até 150 anos (CORDERO e BOSHIER, 2003; SANTOS, 1987).

A densidade da madeira varia de 0,75 g/cm³ a 0,98 g/cm³, dura ao corte, alburno amarelado, muito escasso e cerne de cor castanho escura, grã irregular,

textura fina, superfície lisa ao tato, cheiro e gosto imperceptíveis. É considerada de alta resistência ao apodrecimento e ao ataque de organismos xilófagos, principalmente a brocas marinhas (ARÓSTEGUI VARGAS e DIAZ PORTOCARRERO, 1992; CORDERO e BOSHIER, 2003; HERRERO-JÁUREGUI et al., 2009; NEBEL e MEILBY, 2005; NOGUEIRA et al., 2005; REYES et al., 1992; WOODCOCK, 2000).

Sua madeira é extraída para fins de subsistência, construção de casas, e comercialização, principalmente como moirões e estacas, devido à sua elevada durabilidade (NEBEL, 2001), vigas e caibros (SÁNCHEZ et al., 2005). O tronco é geralmente utilizado como poste de iluminação e nas estruturas das casas devido à sua resistência a cupins (RIBEIRO et al., 1999).

2.7.4 *Apeiba albiflora* Ducke

A espécie *Apeiba albiflora* Ducke, popularmente chamada de pau-jangada, pente-de-macaco e cortiça, é uma planta perenifólia, pertencente à família Malvaceae, e que ocorre principalmente em formações secundárias, sendo pouco frequente no interior da mata primária densa. Apresenta altura de 10-15 m, com tronco de 40-60 cm de diâmetro, ramos novos e pecíolos foliares revestidos por tomento ferruginoso (LORENZI, 2002).

Apeiba albiflora é uma espécie nativa típica de floresta de terra firme, não endêmica no Brasil, com distribuição geográfica no Norte, Nordeste e Centro-oeste. No Norte sua ocorrência se dá nos estados do Amapá, Pará, Roraima, enquanto que no Nordeste ocorre em Alagoas, Bahia, Ceará, Maranhão e Paraíba. No Centro-oeste a espécie ocorre no estado de Mato Grosso (ESTEVEZ, 2015).

Essa espécie é pioneira (WERNECK et al., 2000) ou clímax exigente em luz (PINTO, 1997). A madeira do pau-de-jangada é muito leve ($0,18 \text{ g.cm}^{-3}$ a $0,26 \text{ g.cm}^{-3}$), o alburno é branco, o qual torna-se verde em bandas concêntricas, com grossas bandas de parênquima paratraqueal (PENNINGTON e SARAKHÁN, 1998).

Trata-se de espécie útil à produção de polpa para papel. A madeira dessa espécie pode ser usada na confecção de pequenas embarcações, como jangadas, com as quais se pescam em todo o litoral nordestino. Suas fibras, conhecidas como “embras”, são usadas na confecção de cordas e o pau-de-jangada é recomendado

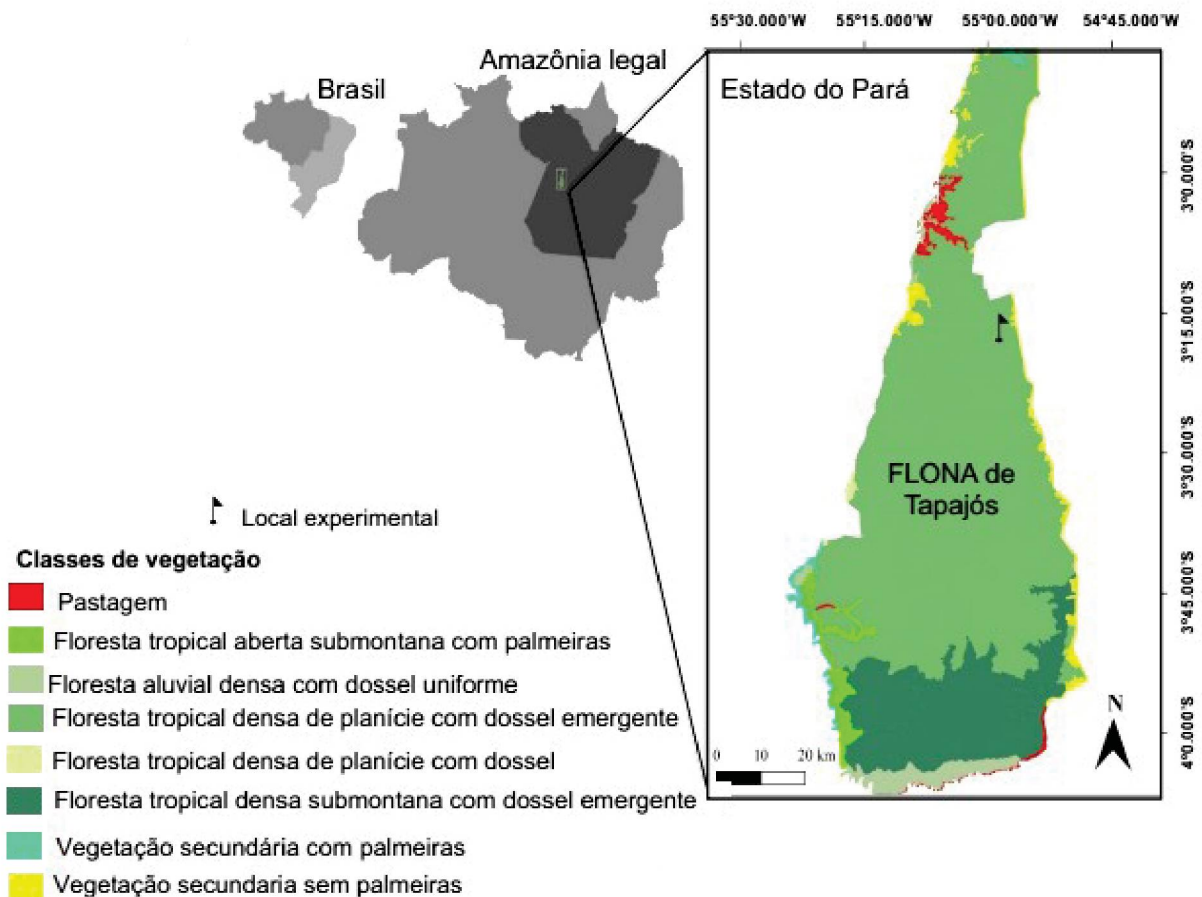
para plantios em áreas de preservação permanente, em encostas íngremes e em margens de rios (PENNINGTON e SARA KHAN, 1998).

3 MATERIAL E MÉTODOS

3.1 ÁREA DE ESTUDO

A área de estudo está localizada à altura do km 114 da BR 163, Rodovia Santarém-Cuiabá ($2^{\circ}40' - 4^{\circ}10'S$; $54^{\circ}45' - 55^{\circ}30' W$), na Floresta Nacional do Tapajós, município de Belterra, Estado do Pará, Brasil (Figura 5).

FIGURA 5 – LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO E TIPOS DE VEGETAÇÃO DA FLORESTA NACIONAL DO TAPAJÓS, PA.



FONTE: Adaptado de ICMBio (2020) e Veloso et al., (1991).

Segundo a classificação de Köppen-Geiger, o clima do local é do tipo Am, sendo um clima tropical com uma estação seca de 2 a 3 meses por ano e precipitação anual acima de 2000 mm, com média de temperatura de 25 °C, com

médias mínimas de 18,4 °C, e máxima média de 32,6°C. A umidade relativa é de aproximadamente 86% (76 – 93%) (OLIVEIRA, 2006; ALVARES, 2013).

Foram selecionadas quatro espécies de árvores: (i) *Zygia racemosa* (Ducke) Barneby e J.W.Grimes., (ii) *Tapirira guianensis* Aubl., (iii) *Miquartia guianensis* Aubl., e (iv) *Apeiba albiflora* Ducke. Essas espécies foram selecionadas devido ao valor comercial de madeira e à sua ampla gama de DAP e tempo de monitoramento, sendo as duas últimas importantes para modelar a robustez dos parâmetros e, portanto, a boa qualidade das estimativas de crescimento.

3.2 EXPERIMENTO

O experimento foi instalado em 1981 pela Embrapa Amazônia Oriental. Foi configurado como um delineamento completamente randomizado composto por dois tratamentos (Tabela 1). A área experimental é de 180 ha, dividida em cinco subáreas retangulares de 36 ha (300 m x 1.200 m): uma subárea destinada ao controle ('T0', Tabela 1), onde nenhuma intervenção (exploração madeireira ou tratamentos silviculturais) foi realizada; e quatro subáreas manejadas ('T1', Tabela 1), com atividades de exploração de impacto reduzido e de tratamentos silviculturais. Dentro de cada subárea de 36 ha, foram instaladas 12 parcelas de 50 m x 50 m para monitorar permanentemente o crescimento de todas as árvores com DAP \geq 5 cm, totalizando assim 60 parcelas permanentes, ou seja, a área manejada (144 ha), representada por 48 parcelas permanentes e a área não manejada (36 ha), representada por 12 parcelas.

Os tratamentos estão descritos na Tabela 1. Maiores informações sobre a característica da área experimental e sobre a composição das espécies podem ser consultadas em Avila et al. (2015; 2017).

TABELA 1 – TRATAMENTOS APLICADOS AO EXPERIMENTO FLORESTAL NO KM 114 DA FLORESTA NACIONAL DO TAPAJÓS, PA.

Tratamentos	Descrição
'T0'	Controle, sem intervenção na área.
'T1'	Manejo Florestal, colheita de árvores comerciais com DAP \geq 45 cm + tratamentos silviculturais para favorecer as árvores remanescentes.

FONTE: Avila et al., (2015).

A Redução percentual na área basal por meio de extração de madeira, dano de corte e dos tratamentos silviculturais foi aproximadamente de 30,1%. Todas as árvores com diâmetro à altura do peito (DAP) \geq 5 cm foram amostradas nas 60 parcelas permanentes e marcadas permanentemente com etiquetas de alumínio. As espécies foram identificadas por seus nomes vernaculares por parataxonomistas e para as espécies menos comuns, o material vegetal foi coletado para identificação no herbário da Embrapa Amazônia Oriental. As parcelas amostrais permanentes foram inventariadas em 1981, 1983, 1987, 1989, 1995, 2003, 2008 e 2012, exceto a área de controle que não foi medida em 1981 (AVILA et al., 2015).

O início do experimento foi em 1981, com a instalação das parcelas permanentes e primeira coleta de dados. No ano seguinte (1982), foi realizada uma Exploração de Impacto Reduzido nas quatro subáreas que formam o 'T1' (Tabela 1), na qual foram colhidas árvores de 38 espécies, com densidade média de 12 árvores ha⁻¹ e volume médio de madeira de 90 m³ ha⁻¹. As espécies colhidas foram selecionadas com base em sua maior abundância e estoque de madeira, e em seu valor comercial (CARVALHO et al., 2004).

Os tratamentos silviculturais (Tabela 1) foram aplicados aos 12 anos após a exploração madeireira (1994), com finalidade de reduzir o número de árvores de espécies consideradas não comerciais, para reduzir a área basal do povoamento e, com isso, proporcionar maior entrada de luz, favorecendo o estabelecimento e desenvolvimento de espécies comerciais. Os tratamentos silviculturais foram realizados por meio da anelagem com entalhes, que consiste em fazer um anel com golpes contínuos de machadinha em torno do fuste das árvores, sem a retirada da casca, mais a aplicação de uma mistura de um produto químico (concentração de 5%) e óleo diesel (concentração de 95%) (COSTA et al., 2001).

3.3 ANÁLISE DA DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA PARA AS ESPÉCIES SELECIONADAS

Na área manejada (144 ha) (Tabela 1), representada por 48 parcelas permanentes foram selecionados os anos de medições para a determinação da distribuição diamétrica: 1981 (por ter sido antes da exploração, ou seja, em floresta não alterada); 1989 (a medição mais próxima antes da realização dos tratamentos silviculturais); e 2012 (última medição realizada na área – aos 30 anos após a exploração e aos 18 anos após a aplicação dos tratamentos silviculturais).

Para análise das distribuições diamétricas do número de indivíduos das espécies, foram estabelecidas classes de diâmetros com a amplitude de 10,0 cm. Para projetar a distribuição, foram ajustadas as funções de densidade probabilidade Normal, Log-Normal, SB de Johnson, Beta, Gama e Weibull 3P (Tabela 2).

TABELA 2 – MODELOS TESTADOS PARA ESTIMAR O NÚMERO DE ÁRVORES COM DAP ≥ 5 CM POR CLASSE DIAMÉTRICA DAS ESPÉCIES SELECIONADAS DO EXPERIMENTO NO KM 114 DA FLORESTA NACIONAL DO TAPAJÓS, PA.

Denominação	Modelo (FDP)	Eq.
Normal	$f_X = \frac{1}{\sigma\sqrt{2\pi}} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{x-\mu}{\sigma}\right)^2}$	(26)
Log-Normal	$f_X = \frac{1}{x(\sqrt{2\pi}\sigma^2)} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{\ln x - \mu}{\sigma}\right)^2}$	(27)
Weibull 3P	$f_X = \frac{c}{b} \left(\frac{x-a}{b}\right)^{c-1} e^{-\left(\frac{x-a}{b}\right)^c}$	(28)
SB de Johnson	$f_X = \frac{\delta}{\sqrt{2\pi}} \frac{\lambda}{(x-\varepsilon)(\lambda+\varepsilon-x)} e^{\left\{\frac{-1}{2}\left[\gamma+\delta\ln\left(\frac{x-\varepsilon}{\lambda+\varepsilon-x}\right)\right]^2\right\}}$	(29)
Gama	$f_X = \frac{x^{\alpha-1} e^{-\frac{x}{\beta}}}{\beta^\alpha \cdot \Gamma(\alpha)}$	(30)
Beta	$f_X = \left(\frac{\Gamma(\alpha+\beta)}{\Gamma(\alpha)\Gamma(\beta)}\right) \cdot \left(\frac{1}{(x_{\max}-x_{\min})^{\alpha+\beta-1}}\right) (x-x_{\min})^{\alpha-1} \cdot (x_{\max}-x)^{\beta-1}$	(31)

σ = desvio padrão da variável x ; μ = média da variável x ; $\pi = 3,141519$; e = constante de Euler; δ , λ , ε , γ , a , b , c , d = coeficientes das funções.

Para a seleção das melhores funções de densidade probabilísticas, foi realizada uma classificação com base no teste de aderência de Kolmogorov-Smirnov (K-S) (MASSEY et al., 1951) ao nível de significância de 95%. O teste K-S pode ser obtido pela equação 2:

$$d_{calc} = \frac{(\max |F_o(X) - F_e(X)|)}{n} \quad (32)$$

Em que:

$F_o(X)$: é a frequência observada acumulada;

$F_e(X)$: é a frequência esperada acumulada e;

n : o número de observações.

Se d_{calc} for menor que o limite tabelado, aceita-se o ajuste, indicando que as projeções geraram estimativas condizentes com a realidade (aderência).

A comparação entre os modelos foi realizada por meio dos critérios propostos por Akaike (AIC) (WOLFINGER, 1993) e Bayesiano de Schwarz (BIC) (NÚÑEZ-ANTÓN & ZIMMERMAN, 2000), que permitem a comparação de modelos não aninhados e penalizam modelos mais parametrizados, sendo o BIC o mais rigoroso, ou seja, o critério que favorece modelos mais parcimoniosos:

$$AIC = -2 \log L + 2p \quad (33)$$

$$BIC = -2 \log L_{plog}(n-r) \quad (34)$$

Em que:

L : valor máximo da função de verossimilhança para o modelo;

p : número de parâmetros do modelo;

N : total de observações; e

r : posto da matriz X (matriz de incidência para os efeitos fixos).

Valores menores de AIC e BIC indicam melhor ajuste do modelo.

Avaliou-se ainda, a existência de diferença significativa entre o número de indivíduos em relação aos pontos cardiais. Para tal análise foi utilizado o teste não paramétrico de Kruskal-Wallis (1952) (K-W) (Teste H) (Eq. 35), visto que o teste de

Shapiro-Wilk apontou que os dados não possuem normalidade em sua distribuição. O teste de comparações múltiplas de Dunn (1961) foi utilizado após o teste de K-W, se e somente se o teste de K-W permite rejeitar H_0 .

$$H = \frac{12}{N(N+1)} \left(\sum \frac{R_i^2}{n_i} \right) - (N+1) \quad (35)$$

Em que:

N : é o número dados em todos os grupos;

n_i : é o número de sujeitos em cada grupo;

R_i^2 : é a somatória dos postos em cada grupo.

O ajuste dos parâmetros da regressão e todas as demais análises estatísticas foram realizadas no ambiente estatístico R (R, Core Team, 2020) (Anexo 1).

3.4 MODELAGEM DE CRESCIMENTO DE DIÂMETRO

Modelos de crescimento (MCs) sem idade explícita foram aplicados ao diâmetro na altura do peito (DAP) para indivíduos da mesma espécie. Os dados coletados para ajustar os MCs consistiam em pares de DAP (cm) e período de crescimento (anos), de árvores com DAP ≥ 5 cm monitorados durante um período de 31 anos (1981 a 2012). Como a idade das árvores não está disponível, o período de crescimento substitui a idade das árvores. Tal procedimento requer derivativos dos MCs na função da idade, resultando assim em MCs sem idade explícita. Tomé et al. (2006) abordam procedimentos de derivativos de alguns MCs geralmente aplicados a fins florestais. Tais MCs são comumente aplicados à modelagem biológica, cujas formulações apresentam os parâmetros típicos de assíntota (A), inclinação (k) e forma (m) (Tabela 3).

TABELA 3 – FUNÇÕES DE CRESCIMENTO PARA IDADE DESCONHECIDA.

Função	Fórmula original	Fórmula para idade desconhecida	Eq.
Lundqvist-Korf	$Y_i = Ae^{\frac{-k}{t_i^m}}$	$Y_{t+a} = Ae^{-k \left(\frac{1}{\left(\left[\frac{-k}{\ln(Y_t/A)} \right]^{\frac{1}{m+a}} \right)^m}$	(36)
Richards	$Y_i = A \left(1 + e^{-kt_i} \right)^{\frac{1}{1-m}}$	$Y_{t+a} = A \left(1 - e^{-ka} \left(1 - \left(\frac{Y_t}{A} \right)^{1-m} \right) \right)^{\frac{1}{1-m}}$	(37)
Hossfeld IV	$Y_i = \frac{At_i^m}{K + t_i^m}$	$Y_{t+a} = A \frac{\left(\left(\frac{cY_t}{A - Y_t} \right)^{\frac{1}{k}} + a \right)^k}{c + \left(\left(\frac{cY_t}{A - Y_t} \right)^{\frac{1}{k}} + a \right)^k}$	(38)

Em que, Y_i : variável Y no momento t ; a : horizonte de projeção, em anos; \ln : logarítmico natural; m : parâmetro de forma; A : assíntota e k : parâmetro relacionado a inclinação da curva.

Fonte: Burkhardt e Tomé (2012).

Para ajustar os MCs sem idade explícita, utilizou-se os métodos de ajuste de modelo, análise e interpretação de dados propostos por David et al. (2019), descritos da seguinte forma. Esses autores testaram os MCs de Lundqvist-Korf (Eq. 35), Richards (Eq. 36) e Hossfeld IV (Eq. 37), cujas formulações e exemplos de aplicações na silvicultura são vistas em Burkhardt e Tomé (2012).

O ajuste do modelo foi específico para cada espécie e foi utilizado um conjunto de dados de árvores individuais. Em seguida, os autores selecionaram o melhor modelo baseado em estatísticas de qualidade do ajuste (Raiz Quadrada do Quadrado Médio do Erro – RQME mais baixo e Coeficiente de Determinação – R^2 mais alto) para projetar DAP em 100 anos à frente.

Para cada espécie e tratamento (Tabela 1), modelou-se MCs de Hossfeld IV, Lundqvist-Korf e Richards e selecionou-se aquele com melhor desempenho. As fórmulas para obtenção do RQME e R^2 são:

$$RQME \% = 100 / \bar{Y} \left[\frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{n - p} \right]^{1/2} \quad (39)$$

$$R^2 = 1 - \frac{\sum_{i=1}^n (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{\sum_{i=1}^n (Y_i - \bar{Y})^2} \quad (40)$$

Em que:

Y_i : DAP observado, em cm;

\hat{Y}_i : DAP estimado, em cm;

\bar{Y} : média observada DAP, em cm;

n: número de observações;

p: número de parâmetros do modelo.

Em seguida, os modelos geraram quatro curvas de projeção a partir de DAPs iniciais para cada espécie, crescendo respectivamente 5, 10, 20 e 30 cm, ao invés de se obter uma curva única para as quatro espécies, crescendo a partir de 5 cm (menor DAP).

O uso deste procedimento foi devido a: (i) que algumas espécies de crescimento lento podem não atingir o DMC em 100 anos (a partir de 5 cm), e (ii) as projeções necessárias para árvores com DAP ≥ 30 cm. Foi realizado um script em linguagem R para a aplicação da modelagem (R, Core Team, 2020) (Anexo 2).

3.4.1 Incremento extra adicionado pelo manejo

Tanto na área manejada (T1) quanto na área controle (T0), calculou-se o Incremento Periódico Anual em DAP (IPA, cm ano⁻¹) (Eq. 40), para a obtenção dos IPAs extras (PAI_{extra.}, cm ano⁻¹) (Eq.41) resultantes da diferença entre IPA dos tratamentos ('T0' e 'T1', Tabela 1). Isso representa o efeito do tratamento da área manejada sobre o controle.

$$IPA = \frac{Dap_f - Dap_i}{CP} \quad (41)$$

$$IPA_{extra} = IPA_{manejo} - IPA_{controle} \quad (42)$$

Em que:

IPA : incremento anual periódico, em cm ano^{-1} .

IPA_{extra} : incremento anual periódico extra, em cm ano^{-1} .

Dap_i : diâmetro na altura do peito na medição inicial, em cm

Dap_f : diâmetro na altura do peito na medição final, em cm;

CP: duração da projeção, em anos.

3.4.2 Critérios específicos para espécies

Foram obtidos DMCs e CCs específicos para cada espécie e tratamento, por meio dos métodos usados por Schöngart (2008) e Miranda et al. (2018). Para se obter os DMCs específicos das espécies, os autores se basearam na suposição assumida por Nebel (2001) de que o DMC corresponde ao ponto para a produção ideal de volume. Schöngart (2008) obteve incremento anual atual do volume de árvores (ICA_V , m^3) para encontrar o $ICA_{V_{\max}}$.

O DMC deve então estar situado na posição de $ICA_{V_{\max}}$, para a estimativa do volume comercial ao longo do período de projeção de 1-200 anos por meio de duas equações genéricas de volume (Eq. 43 e Eq. 44) ajustadas especificamente para a Floresta Nacional do Tapajós (Silva et al., 1984a; 1984b). A equação (43) foi utilizada para DAPs na faixa de 15-45 cm e (Eq. 44) para DAPs ≥ 45 cm.

$$ICA_{V_i} = \hat{V}_{i(t+1)} - \hat{V}_{i(t)} \quad (43)$$

$$\hat{V}_{i(t)} = -0.0994 + 9.1941 * 10^{-4} DAP_{i(t)}^2 \quad (44)$$

$$\ln \hat{V}_{i(t)} = -7.62812 + 2.1809 \ln DAP_{i(t)} \quad (45)$$

Em que:

ICA_{V_i} : incremento corrente anual volumétrico ($\text{m}^3.\text{ano}^{-1}$);

DAP : diâmetro a altura do peito (1,3 m).

$\hat{V}_{i(t)}$: estimativa baseada em equação de volume comercial (m^3);

ln: logaritmo natural ou neperiano.

Em seguida, obteve-se os CCs específicos das quatro espécies Schöngart (2008) e Miranda et al. (2018). Esses autores atribuíram CC ao tempo médio que as espécies levam para ultrapassar classes de 10 cm de diâmetro até atingir o DMC específico. Por exemplo, tendo um DMC de 50 cm e idade da árvore no DMC (idadeDMC) de 50 anos, o tempo médio para ultrapassar 10 cm de diâmetro é de 10 anos. Assim, CC específico da espécie pode ser estimado pela equação (45).

$$\text{Ciclo de Corte} = \frac{\text{idadeDMC}}{0,1 \text{DMCe}} \quad (46)$$

Em que:

CC: intervalo de tempo entre explorações na floresta;

IdadeDMC: idade em que a espécie atinge o DMC específico;

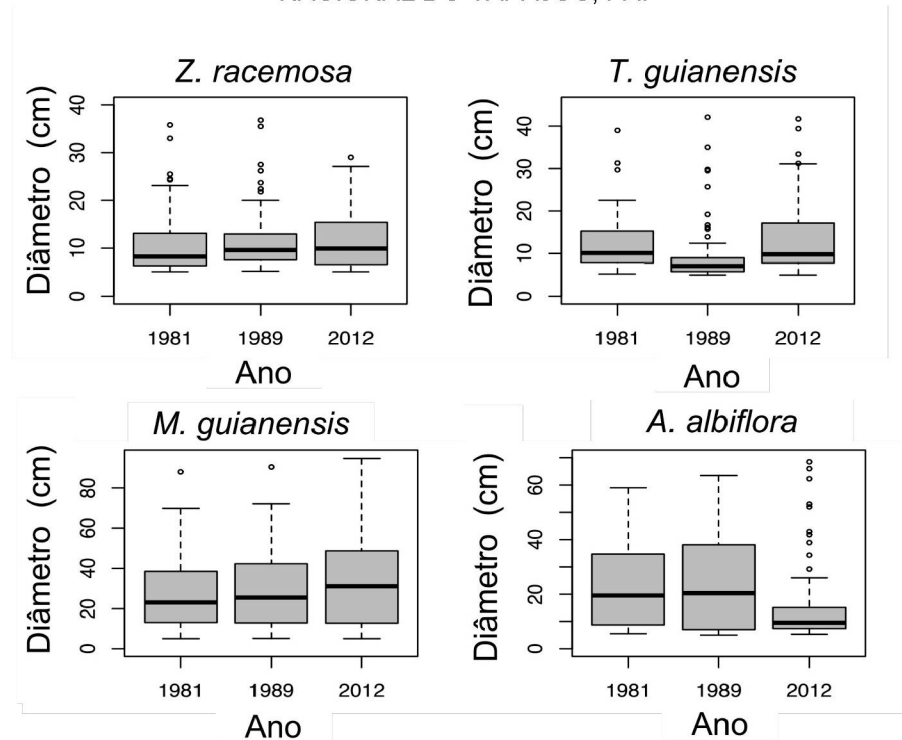
DMCe: diâmetro mínimo de corte, definido como o diâmetro em que a espécie atinge o máximo ICA.

4 RESULTADOS

4.1 PADRÃO DA DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA DAS ESPÉCIES ESTUDADAS

A disposição dos diâmetros nos anos analisados para cada espécie pode ser visualizada na Figura 6. No que diz respeito às estatísticas descritivas, observa-se que as espécies diferem entre si, tanto na amplitude diamétrica quanto na ocorrência de indivíduos. As estatísticas descritivas das distribuições de diâmetros para as espécies estudadas da área manejada (144 ha) são apresentadas na Tabela 4.

FIGURA 6 – DISPOSIÇÃO DOS DADOS DURANTE OS PERÍODOS DE MEDIÇÃO (1981 – 1 ANO ANTES DA EIR; 1989 – 7 ANOS APÓS EIR E 5 ANOS ANTES DOS TRATAMENTOS SILVICULTURAIS; E 2012 – AOS 30 ANOS APÓS A EIR E AOS 18 ANOS APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS SILVICULTURAIS) DO EXPERIMENTO NO KM 114 DA FLORESTA NACIONAL DO TAPAJÓS, PA.



FONTE: A autora (2022).

A espécie *M. guianensis*, por exemplo, em 1981 possuía aproximadamente sete vezes mais indivíduos que o *T. guianensis*. A espécie *Z. racemosa* possui 2,4 vezes mais indivíduos que a *T. guianensis*, porém os números de classes são menores. A espécie *M. guianensis* possui uma maior amplitude em diâmetro e consequentemente o maior número de classes em todas os anos analisados.

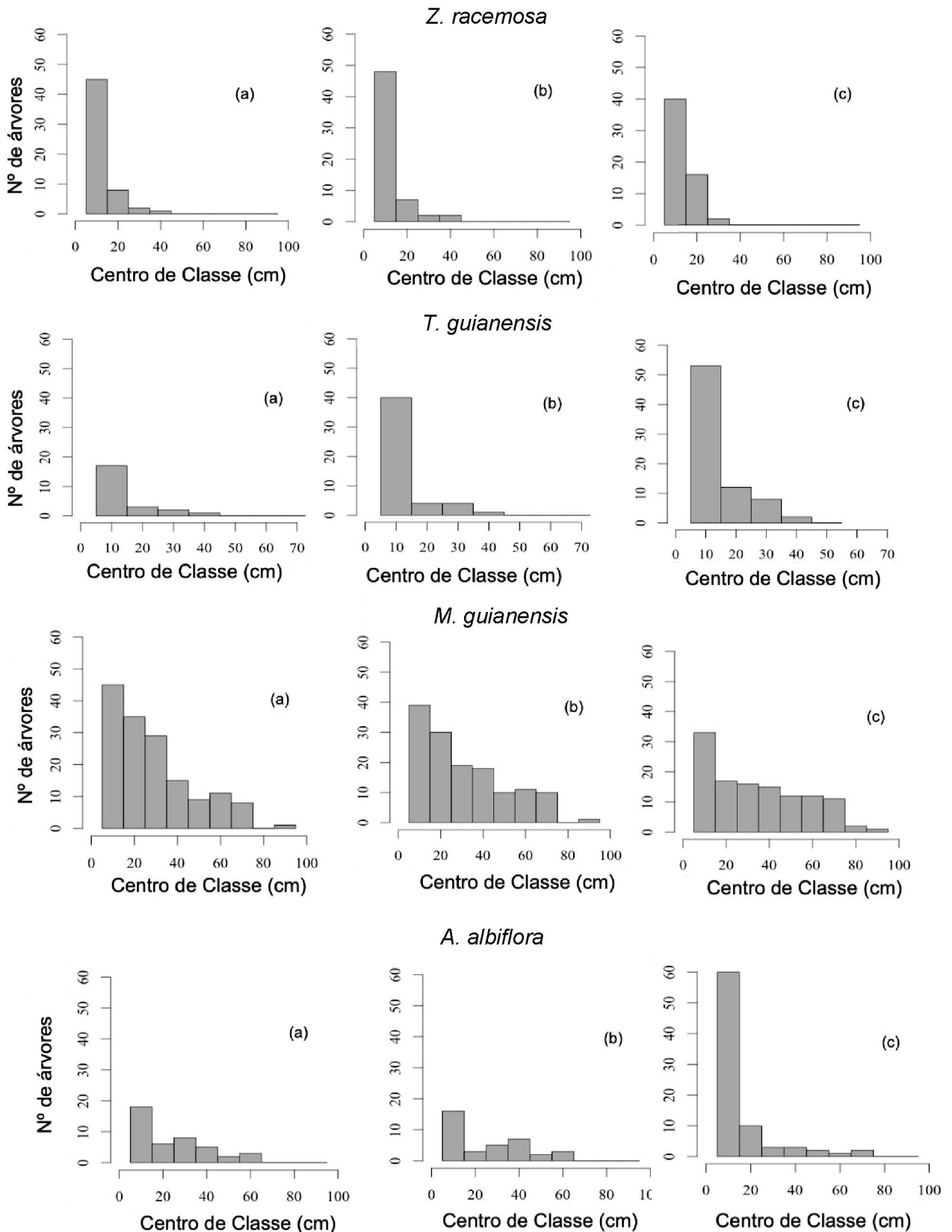
TABELA 4 – ESTATÍSTICAS DESCRITIVAS DO DIÂMETRO A 1,3 M DO SOLO DE QUATRO ESPÉCIES AMAZÔNICAS (DAP \geq 5 CM) DURANTE O PERÍODO DE MEDIÇÃO (1981 – 1 ANO ANTES DA EIR; 1989 – 7 ANOS APÓS EIR E 5 ANOS ANTES DOS TRATAMENTOS SILVICULTURAIS; E 2012 – AOS 30 ANOS APÓS A EIR E AOS 18 ANOS APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS SILVICULTURAIS) DO EXPERIMENTO NO KM 114 DA FLORESTA NACIONAL DO TAPAJÓS, PA.

Estatística descritiva	Ano	Espécies			
		<i>Z. racemosa</i>	<i>T. guianensis</i>	<i>M. guianensis</i>	<i>A. albiflora</i>
Mínimo (cm)	1981	5,0	5,0	5,0	5,0
	1989	5,1	5,0	5,0	5,0
	2012	5,0	5,0	5,0	5,3
Média (cm)	1981	11,1	14,0	27,7	23,6
	1989	11,7	10,5	30,2	24,7
	2012	11,9	13,6	34,0	15,2
Mediana (cm)	1981	8,2	10,1	23,1	20,4
	1989	9,6	7,1	25,5	19,6
	2012	9,5	9,8	31,1	9,5
Máximo (cm)	1981	35,8	39,0	88,0	59,0
	1989	36,8	42,1	90,4	63,5
	2012	29,0	41,7	94,6	68,5
Amplitude (cm)	1981	30,8	34,0	83,0	54,0
	1989	31,7	37,1	85,4	58,5
	2012	24,0	36,7	89,6	63,2
Classe (nº)	1981	4	7	8	6
	1989	4	3	8	6
	2012	3	7	9	7
Nº de árvores (nº)	1981	56	23	153	42
	1989	59	49	138	36
	2012	58	75	119	81

FONTE: A autora (2022).

Na Figura 7 são apresentados os histogramas de frequência das quatro espécies estudadas. Verifica-se uma configuração da distribuição do tipo “J” invertido, que é o principal e mais comum comportamento da floresta Amazônica

FIGURA 7 – HISTOGRAMAS DA DISTRIBUIÇÃO DOS DIÂMETROS DAS ESPÉCIES (DAP \geq 5 CM) NO EXPERIMENTO DE 144 HA NA FLORESTA NACIONAL DO TAPAJÓS, PA. A – PRÉ EXPLORAÇÃO (1981); B – PÓS EXPLORAÇÃO/PRÉ TRATAMENTO SILVICULTURAL (1989); C – PÓS TRATAMENTO SILVICULTURAL (2012).



FONTE: A autora (2022).

Em 1981, a espécie *Z. racemosa* apresentou 80% dos indivíduos concentrados na classe 5-15 cm, em 1989 houve um aumento de 1%. Em 2012, na última medição, 100% dos indivíduos estavam nas três primeiras classes, ou seja, não ultrapassando a classe de 25-35 cm. Ainda em 2012, ocorreu um decréscimo de 11% da ocupação dos indivíduos na primeira classe em relação ao ano de 1981, e um aumento na segunda classe com 27% dos indivíduos. A espécie *Z. racemosa* apresentou mais indivíduos nas classes iniciais, com um comportamento “J” invertido em todos os anos. O teste de Kruskal-Wallis mostrou que não há diferença significativa entre as classes dos diâmetros ($\chi^2_{(2)} = 2,23$; $p > 0,05$) entre os anos analisados. A espécie *Z. racemosa* apresentou o menor número de classes em todos os anos em comparação com as outras espécies.

T. guianensis, apresentou em 1981 uma concentração de 74% dos indivíduos na primeira classe (5 – 15 cm) e 13% na segunda classe (15 – 25 cm). Em 1989, a espécie apresentou a maior concentração (82%) de indivíduos na primeira classe (5–15 cm). Em 2012, a concentração dos indivíduos em classes maiores que 25–35 cm foi de 11%. A espécie *T. guianensis* apresentou um padrão semelhante de distribuição ao da espécie *Z. racemosa*. Porém, o teste de Kruskal-Wallis mostrou que há diferença significativa entre as classes dos diâmetros ($\chi^2_{(2)} = 13,78$; $p < 0,05$) nos anos analisados. O post-hoc de Dunn mostrou que no ano 1989 (7,1 cm e 3,2 cm, mediana e amplitude interquartil) a espécie apresentou um comportamento diamétrico diferente dos anos 1981 (10,1 cm e 7,45 cm) e 2012 (9,8 cm e 9,35 cm).

A espécie *M. guianensis*, em 1981 apresentou uma concentração de 29% dos indivíduos na primeira classe, 22% pertencentes a classe 15 - 25 cm, aproximadamente 19% a classe de 25 – 35 cm, e aproximadamente 29% para classes superiores ou iguais a 35 - 45 cm. A menor concentração de indivíduos na primeira classe (27%) aconteceu no ano de 2012, apresentando neste mesmo ano, 44% dos indivíduos em classes superiores a 25-35 cm. A espécie *M. guianensis*, como as espécies anteriores analisadas, também apresentou um padrão “J” invertido. O teste de Kruskal-Wallis mostrou que não há diferença significativa entre as classes dos diâmetros da espécie ($\chi^2_{(2)} = 5,19$; $p < 0,05$) nos anos analisados.

Ocorreu um aumento no número de indivíduos na classe 5-15 cm 31% entre os anos 1981 a 2012 para a espécie *A. Albiflora*. apresentando no geral, uma maior concentração nas três primeiras classes, tendo apenas 10% em classes superiores

a 25-35 cm. Os diâmetros da espécie *A. Albiflora* nos anos analisados apresentaram diferenças significativas ($\chi^2_{(2)} = 8,59$; $p < 0,05$). O post-hoc de Dunn mostrou que o ano 1981 (19,6 cm e 25,8 cm, mediana e amplitude interquartil) apresentou um comportamento diamétrico diferente do ano 2012 (9,5 cm e 7,8 cm). Em 2012, essa espécie apresentou a maior frequência absoluta na primeira classe diamétrica (60 árvores).

Na Tabela 5, são apresentados os resultados obtidos para avaliar as estimativas geradas para cada função densidade de probabilidade, considerando todas as árvores com $DAP \geq 5$ cm para os três períodos (1981, 1989 e 2012). As curvas da distribuição diamétrica geradas pelos três melhores modelos testados para os dados das espécies estudadas ($DAP \geq 5$ cm) são apresentadas na Figura 8.

TABELA 5 – ESTADÍSTICAS DOS MODELOS DE FUNÇÃO DENSIDADE PROBABILÍSTICA (FDP) PARA AS QUATRO ESPÉCIES ANALISADAS (DAP ≥ 5 CM) DURANTE O PERÍODO DE MEDIÇÃO (1981 – 1 ANO ANTES DA EIR; 1989 – 7 ANOS APÓS EIR E 5 ANOS ANTES DOS TRATAMENTOS SILVICULTURAIS; E 2012 – AOS 30 ANOS APÓS A EIR E AOS 18 ANOS APÓS A APLICAÇÃO DOS TRATAMENTOS SILVICULTURAIS) DO EXPERIMENTO NO KM 114 DA FLORESTA NACIONAL DO TAPAJÓS, PA.

Anos	<i>Z. racemosa</i>						<i>T. guianensis</i>					
	Funções						Funções					
	Normal	Log-normal	Gama	Beta	Weibull 3P	SB Johnson	Normal	Log-normal	Gama	Beta	Weibull 3P	SB Johnson
1981	Estimativas dos	$\bar{x} = 10,87$	$\bar{x} = 2,29$	$a = 4,30$	$a = 0,06$	$a = 6,52$	$a = 0,93$	$\bar{x} = 5,40$	$\bar{x} = 2,27$	$a = 3,57$	$a = 0,97$	$a = -7,60$
	Parâmetros	$s_s = 4,88$	$s_s = -0,49$	$b = 2,50$	$b = 6,94$	$B = 4,95$ $C = 0,8$	$L = 99,68$ $e = 5,14$ $y = 2,70$	$s_s = 9,96$	$s = -0,54$	$b = 2,92$	$b = 9,48$	$L = 77,09$ $e = 0,61$ $y = 1,26$
	D_{cal}	0,05 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,003 ^{ns}	0,004 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,08 ^{ns}	0,10 ^{ns}	0,09 ^{ns}	0,13 ^{ns}
	D'	0,18						0,28				
	BIC	-87,21	-99,50	-91,62	-115,69	-114,29	-112,62	-52,88	-56,82	-54,48	-55,56	-50,75
AIC	-87,81	-100,09	-92,21	-116,28	-115,08	-113,61	-52,72	-56,65	-54,32	-55,40	-50,48	
1989	Estimativas dos	$\bar{x} = 10,40$	$\bar{x} = 2,24$	$a = 4,32$	$a = 0,04$	$a = 7,43$	$a = 0,64$	$\bar{x} = 4,87$	$\bar{x} = -2,18$	$a = 4,37$	$a = 1,11$	$a = -8,48$
	Parâmetros	$s_s = 4,88$	$s_s = -0,49$	$b = 2,37$	$b = 7,93$	$B = 3,48$ $C = 0,57$	$L = 96,77$ $e = 6,77$ $y = 2,20$	$s_s = 9,55$	$s_s = 0,47$	$b = 2,19$	$b = 13,62$	$L = 75,87$ $e = 0,61$ $y = 0,88$
	D_{cal}	0,07 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,10 ^{ns}	0,08 ^{ns}	0,09 ^{ns}	0,08 ^{ns}	0,03 ^{ns}
	D'	0,17						0,19				0,82*
	BIC	-83,84	-88,69	-85,65	-93,79	-96,96	-95,24	-54,8300	-56,35	-55,40	-55,66	-29,78
AIC	-84,43	-89,28	-86,24	-94,39	-97,75	-96,23	-54,6600	-56,19	-55,20	-55,49	-29,51	
2012	Estimativas dos	$\bar{x} = 12,63$	$\bar{x} = 2,56$	$a = 4,43$	$a = 0,15$	$a = 10,00$	$a = 2,41$	$\bar{x} = 5,65$	$\bar{x} = -2,50$	$a = 3,35$	$a = 0,95$	$a = -6,96$
	Parâmetros	$s_s = 5,07$	$s_s = 0,50$	$b = 3,03$	$b = 3,90$	$B = 6,50$ $C = 1,00$	$L = 83,40$ $e = -6,60$ $y = 3,48$	$s_s = 10,30$	$s_s = 2,35$	$b = 3,34$	$b = 7,94$	$L = 76,58$ $e = 0,59$ $y = 1,46$
	D_{cal}	0,03 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,012 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,95*	0,002 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,06 ^{ns}	0,10 ^{ns}	0,07 ^{ns}	0,02 ^{ns}
	D'	0,18						0,15				
	BIC	-90,83	-89,17	-116,33	-69,42	-29,78	-136,86	-51,26	-57,20	-53,97	-56,07	-61,85

Continua...

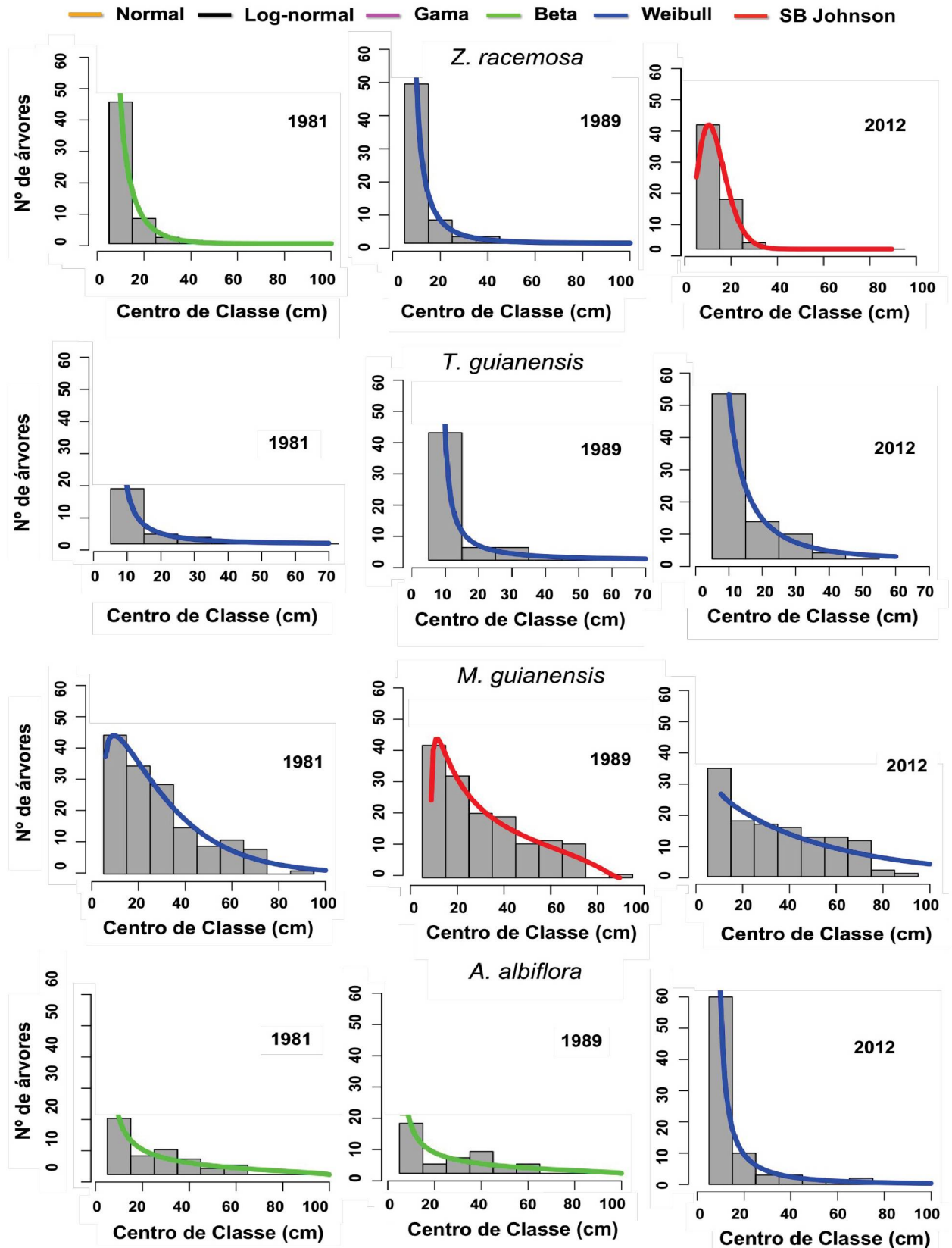
	AIC	-91,42	-89,76	-116,91	-70,01	-30,57	-137,84	-51,09	-57,04	-53,81	-55,91	-61,63	-60,81
A. albiflora													
Funções													
Anos	Normal	Log-normal	Gama	Beta	Weibull 3P	SB Johnson	Normal	Log-normal	Gama	Beta	Weibull 3P	SB Johnson	
1981	Estimativas dos Parâmetros	$\bar{X} = 16,49$ $S_s = 15,63$	$\bar{X} = 3,15$ $S_s = 0,80$	$a=1,74$ $b=14,94$	$a=0,44$ $b=1,23$	$a=5,47$ $B=26,76$ $C=1,12$	$\bar{X} = 10,88$ $S_s = 4,88$	$\bar{X} = 2,29$ $S_s = -0,49$	$a=3,60$ $b=2,81$	$a=0,06$ $b=6,94$	$a=6,52$ $B=4,95$ $C=0,78$	$a=0,93$ $L=99,68$ $e=5,14$ $y=2,70$ $0,04^{ns}$	
	D_{cal}	0,22*	0,07 ^{ns}	0,09 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,05 ^{ns}	0,02 ^{ns}	0,12 ^{ns}	0,00 ^{ns}	0,004 ^{ns}	0,04 ^{ns}	
	D'	0,11					0,18						
	BIC	-68,40	-80,55	-80,29	-81,02	-79,00	-87,21	-99,50	-91,62	-115,69	-114,29	-112,63	
	AIC	-68,99	-81,14	-80,88	-81,81	-79,98	-87,81	-100,09	-92,21	-116,28	-115,08	-113,61	
1989	Estimativas dos Parâmetros	$\bar{X} = 16,48$ $S_s = 17,91$	$\bar{X} = 3,27$ $S_s = 0,87$	$a=1,49$ $b=18,75$	$a=0,45$ $b=1,16$	$a=7,26$ $B=31,71$ $C=1,02$	$\bar{X} = 5,81$ $S_s = 7,88$	$\bar{X} = 2,59$ $S_s = 0,97$	$a=1,20$ $b=13,94$	$a=0,31$ $b=1,65$	$a=8,63$ $B=31,95$ $C=0,79$	$a=0,45$ $L=98,72$ $e=8,72$ $y=0,35$ $0,07^{ns}$	
	D_{cal}	0,26*	0,11 ^{ns}	0,12*	0,08 ^{ns}	0,04 ^{ns}	0,45 ^{ns}	0,21 ^{ns}	0,24*	0,08 ^{ns}	0,11 ^{ns}	0,07 ^{ns}	
	D'	0,11					0,230						
	BIC	-65,05	-76,96	-76,44	-70,83	-79,86	-53,52	-58,08	-56,51	-61,82	-59,10	-58,01	
	AIC	-65,63	-77,54	-77,03	-71,42	-80,84	-54,12	-58,68	-57,09	-62,41	-59,89	-59,00	
2012	Estimativas dos Parâmetros	$\bar{X} = 21,18$ $S_s = 24,42$	$\bar{X} = 3,29$ $S_s = 1,03$	$a=1,20$ $b=27,23$	$a=0,46$ $b=1,05$	$a=10,00$ $B=48,90$ $C=0,98$	$\bar{X} = 9,81$ $S_s = 5,38$	$\bar{X} = 2,22$ $S_s = -0,53$	$a=3,60$ $b=2,81$	$a=0,06$ $b=6,78$	$a=7,95$ $B=4,44$ $C=0,43$	$a=0,43$ $L=99,09$ $e=7,62$ $y=1,53$ $0,01^{ns}$	
	D_{cal}	0,25*	0,18 ^{ns}	0,17*	0,05 ^{ns}	0,09 ^{ns}	0,13 ^{ns}	0,10 ^{ns}	0,12 ^{ns}	0,07 ^{ns}	0,01 ^{ns}	0,01 ^{ns}	
	D'	0,12					0,15						
	BIC	-61,89	-68,96	-69,52	-73,43	-73,93	-78,63	-82,39	-80,18	-85,22	-92,69	-91,18	
	AIC	-62,48	-69,55	-70,11	-74,02	-74,92	-79,22	-82,99	-80,78	-85,81	-93,48	-92,16	

S_s = desvio padrão da variável x ; \bar{X} = média da variável x ; $\pi = 3,141519$; e = constante de Euler; δ , λ , ε , γ , a , b , c , d = coeficientes das funções.

FONTE: Autora (2022).

Continuação.

FIGURA 8 – CURVA DE DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA GERADA PELOS TRÊS MELHORES MODELOS TESTADOS PARA OS DADOS DOS DIÂMETROS DAS ESPÉCIES (DAP \geq 5 CM) NO EXPERIMENTO DE 144 HA NA FLORESTA NACIONAL DO TAPAJÓS, PA. 1981 – PRÉ EXPLORAÇÃO; 1989 – PÓS EXPLORAÇÃO/PRÉ TRATAMENTO SILVICULTURAL; 2012 – PÓS TRATAMENTO SILVICULTURAL.



FONTE: A autora (2022).

Os modelos Beta, Weibull 3P e SB Johnson apresentaram os melhores resultados para descrever o comportamento da distribuição diamétrica da espécie *Z. racemosa*, no ano antes da exploração (1981), ou seja, na floresta não alterada. Com isso, a função Beta apresentou o melhor ajuste apresentando um menor BIC (-115,69) e IAC (-116,28), e também menor $D_{cal} = 0,003$ em relação a Weibull 3P e SB Johnson. Em 1989 (após a exploração e antes dos tratamentos silviculturais), as funções para estimativa da distribuição diamétrica foram iguais a do ano 1981. Entretanto, a melhor função foi a de Weibull 3P apresentando um menor D_{cal} para o teste de K-S e para as estatísticas BIC e IAC. No último ano de medição (2012, 30 anos após a exploração e 18 anos após os tratamentos silviculturais) a função Normal está entre as três melhores funções, porém apresenta uma superestimativa na primeira classe. Com isso, a melhor função para o ano de 2012 foi a proposta por SB Johnson.

A espécie *T. guianensis*, no ano antes da exploração (1981) e após a exploração (1989), apresentou resultados semelhantes, sendo as três melhores funções: Log - Normal, Beta e Weibull 3P. A função de Weibull 3P foi escolhida por possuir BIC (-63,67 e -60,99, respectivamente 1981 e 1989) e IAC (-63,95 e -60,78) menores que os demais modelos. Após 30 anos da exploração e 18 anos após os tratamentos silviculturais, a distribuição da espécie foi descrita com mais acuidade pela função Weibull 3P, sendo esta a função que melhor representa a distribuição da espécie *T. guianensis*.

A função Weibull 3P foi a que apresentou mais acuidade na descrição da distribuição diamétrica da espécie *M. guianensis* para os anos 1981 e 2012, tendo resultados semelhantes aos da espécie *T. guianensis*, com exceção do ano 1989, que apresentou a função de SB Johnson como a melhor. A espécie *A. albiflora* em 2012, possuía aproximadamente o somatório dos indivíduos dos dois anos analisados (1981 e 1989), ocorrendo um aumento na frequência absoluta na sua primeira classe diamétrica. Esse comportamento foi bem representado pela função de Weibull 3P.

As funções de maneira geral se comportaram bem, destacando-se negativamente as funções Normal e Gama, pois apresentam não aderência à distribuição dimétrica das espécies.

4.2 MODELOS DE CRESCIMENTO EM DIÂMETRO PARA ÁRVORES INDIVIDUAIS POR ESPÉCIE

A Tabela 6 apresenta os resultados referentes à qualidade do ajuste por espécie e tratamentos. O RQME (raiz quadrada do quadrado médio do erro) atingiu um valor máximo de 25,64% para a equação de Lundqvist-Korf, enquanto que o MC de Richards possui o maior R² 99% e o menor RQME (5,87%), indicando um bom ajuste do modelo não-linear com boa flexibilidade.

TABELA 6 – COEFICIENTES E ESTATÍSTICAS DE QUALIDADE DE AJUSTE DOS MODELOS DE CRESCIMENTO AJUSTADOS POR ESPÉCIE E TRATAMENTO DO EXPERIMENTO NO KM 114 DA FLORESTA NACIONAL DO TAPAJÓS, PA.

Espécie	Modelo de crescimento	Trat.	Coeficientes do modelo				Estatísticas	
			A	K	m	c	RQME	R ²
<i>Z. racemosa</i>	Richards	t0	34,78	0,01	2,00		7,69	0,98
	Lundqvist-Korf	t0	50,00	3,00	0,17		12,03	0,95
	Hossfeld IV	t0	472,00	1,02		550,50	8,05	0,97
	Richards	t1	35,88	0,03	1,98		15,06	0,92
	Lundqvist-Korf	t1	50,00	3,00	0,22		18,04	0,90
	Hossfeld IV	t1	191,40	1,07		119,20	18,14	0,90
<i>T. guianensis</i>	Richards	t0	33,58	0,06	2,03		15,09	0,85
	Lundqvist-Korf	t0	156,07	5,00	0,27		19,41	0,79
	Hossfeld IV	t0	71,36	1,18		221,60	17,01	0,82
	Richards	t1	42,04	0,06	2,00		16,91	0,90
	Lundqvist-Korf	t1	48,18	2,30	0,30		25,64	0,85
	Hossfeld IV	t1	145,04	1,15		419,34	15,83	0,91
<i>M. guianensis</i>	Richards	t0	61,49	0,02	2,00		6,18	0,99
	Lundqvist-Korf	t0	92,58	0,71	-0,02		21,81	0,95
	Hossfeld IV	t0	384,70	1,05	336,30	336,30	21,81	0,95
	Richards	t1	89,88	0,01	1,98		5,87	0,99
	Lundqvist-Korf	t1	73,63	1,66	-0,01		14,43	0,98
	Hossfeld IV	t1	584,80	1,06		346,80	6,17	0,99
<i>A. albiflora</i>	Richards	t0	52,49	0,03	1,97		11,14	0,97
	Lundqvist-Korf	t0	61,30	0,08	-0,02		20,74	0,96
	Hossfeld IV	t0	198,50	1,10		775,70	8,76	0,98
	Richards	t1	79,06	0,02	1,98		8,89	0,97
	Lundqvist-Korf	t1	61,93	0,08	-0,01		16,27	0,95
	Hossfeld IV	t1	467,10	1,07		192,60	8,15	0,97

A: assíntota. k: parâmetro de inclinação. m e c: parâmetro de forma. R²: coeficiente de determinação.

RMEQ: raiz quadrada do erro quadrático médio.

FONTE: A autora (2022).

O MC de Hossfeld IV não possui flexibilidade suficiente, possivelmente pela

robustez dos dados. Os RQME desse MC foram semelhantes ao MC de Lundqvist-Korf, contudo, Hossfeld IV apresentou uma superestimativa da assíntota 'A' (valor máximo em diâmetro), valores esses que não se enquadram com a realidade das espécies estudadas. Com isso, optou-se por utilizar as predições em diâmetro ao longo do tempo pertencente ao melhor MC (Richards).

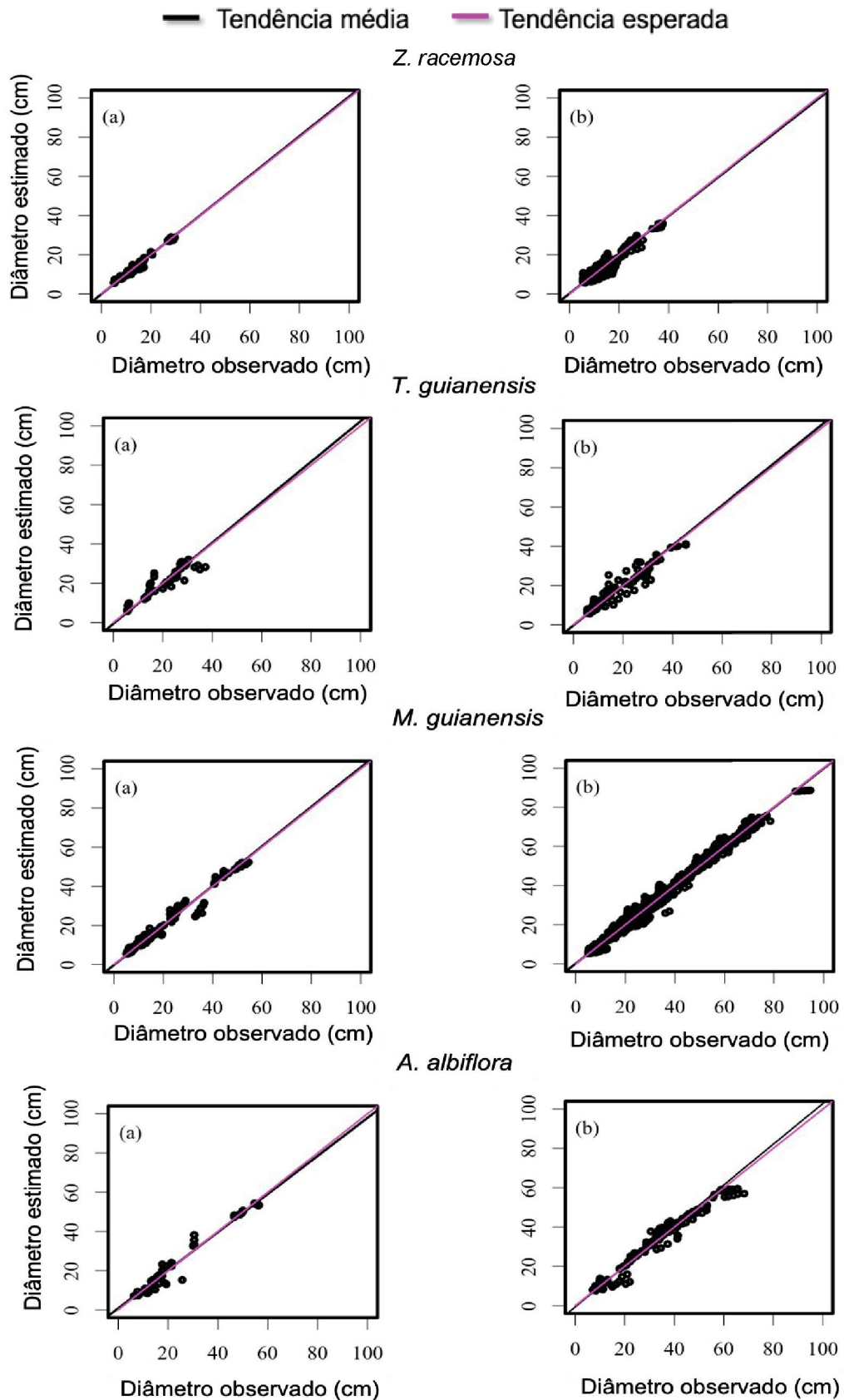
Como esperado, a área manejada 'T1' possui valores da assíntota 'A' maiores para todas as espécies. Foi observada uma sutil variação das estimativas dos parâmetros "k" entre as espécies e os tratamentos, com uma variação de 0,05 e, para a estimativa do parâmetro "m", uma variação de 0,06.

Houve pequena variação da estimativa do parâmetro 'A' entre o tratamento e controle para a espécie *Z. racemosa*, revelando que a espécie atinge diâmetros máximos e forma da curva de crescimento equivalentes com ou sem manejo. Porém a espécie apresentou uma variação para a estimativa do parâmetro de inclinação 'k', esse sendo maior para 'T1' (0,03).

No geral, as espécies *M. guianensis* e *A. albiflora* apresentaram no 'T1' valores menores da estimativa do parâmetro de inclinação 'k' em relação ao 'T0', podendo indicar um crescimento lento para estas espécies em área manejada, contudo o crescimento máximo 'A' dos tratamentos obteve uma alta variação.

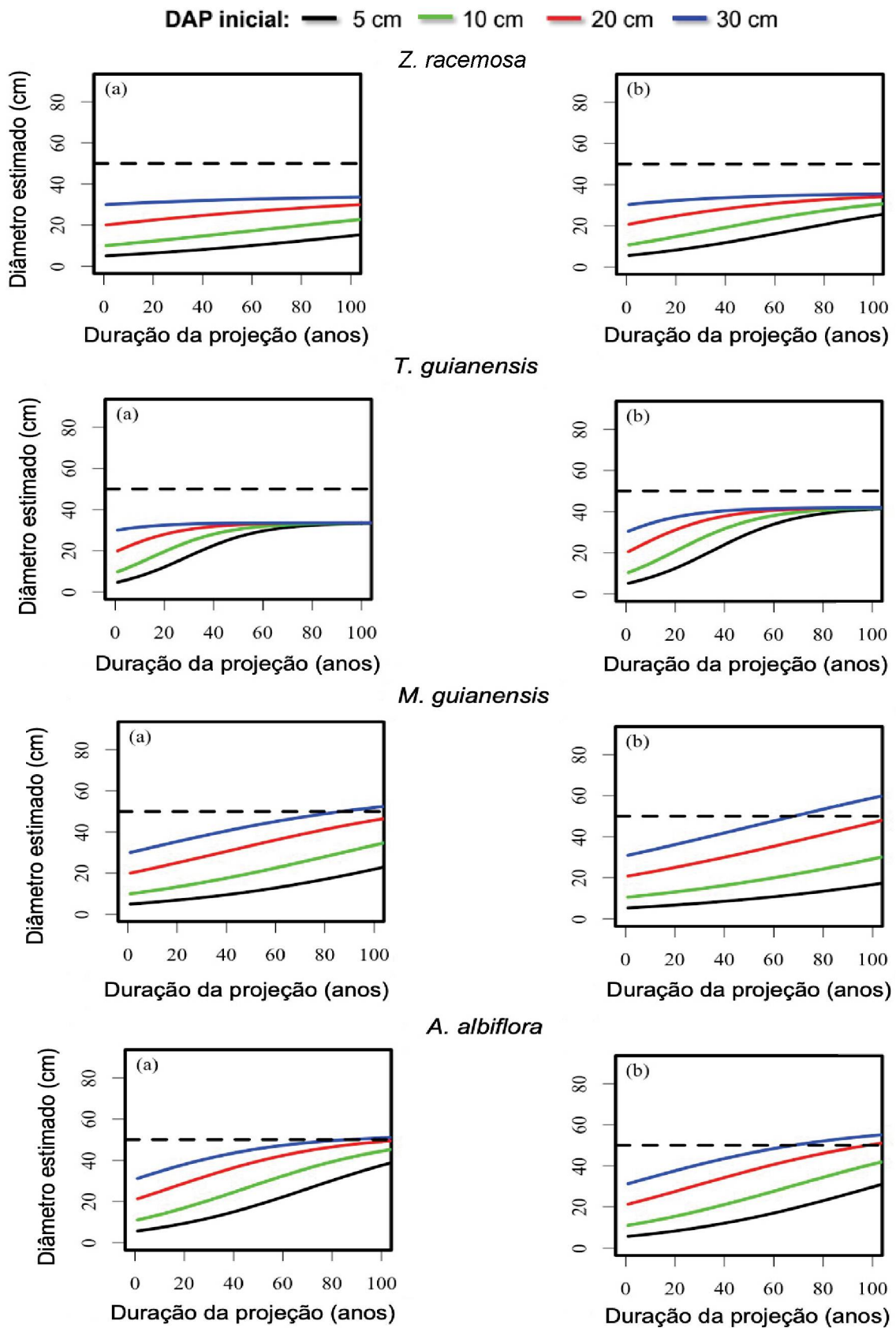
Na Figura 9 são apresentadas as relações entre os diâmetros observados e estimados pelos MCs. Observa-se boa qualidade de ajuste, revelando que as estimativas não apresentam tendências de sub ou superestimativa em função do aumento dos DAPs. Na Figura 10 são apresentadas as curvas de crescimento em diâmetro por espécie e tratamentos. As curvas de crescimento foram estabelecidas para os DAPs iniciais de 5, 10, 20 e 30 cm, considerando um CP de 100 anos. Os IPAs por espécie e tratamento foram computados com base nas estimativas do MC de Richards. A Tabela 7 apresenta os IPAs extras decorrentes do efeito do tratamento, em relação ao controle (área não manejada).

FIGURA 9 – RELAÇÃO ENTRE DAP OBSERVADO E ESTIMADO DE ESPÉCIES ARBÓREAS COMERCIAIS NO EXPERIMENTO DO KM 114 NA FLONA DE TAPAJÓS, PA. (A) CONTROLE. (B) ÁREA MANEJADA.



FONTE: A autora (2022).

FIGURA 10 – CURVAS DE CRESCIMENTO DE DIÂMETRO DE ESPÉCIES ARBÓREAS COMERCIAIS NO EXPERIMENTO DO KM 114 NA FLONA DE TAPAJÓS, PA. (A) CONTROLE. (B) ÁREA MANEJADA. LINHA TRACEJADA PRETA: DIÂMETRO MÍNIMO DE CORTE DE 50 CM.



FONTE: A autora (2022).

TABELA 7 – INCREMENTO PERIÓDICO ANUAL EXTRA (IPA EXTRA, CM.ANO⁻¹) EM DIÂMETRO FORNECIDO PELO TRATAMENTO DA ÁREA MANEJADA EM RELAÇÃO AO TRATAMENTO CONTROLE DO EXPERIMENTO NO KM 114 DA FLORESTA NACIONAL DO TAPAJÓS, PA., COM BASE NAS ESTIMATIVAS DO MC DE RICHARDS.
DAP_i: DAP inicial.

Tratamentos	DAP _i (cm)	Projeção de crescimento (anos)										
		1	10	20	30	40	50	60	70	80	90	100
<i>Z. racemosa</i>												
'T1'	5	0,069	0,067	0,065	0,063	0,061	0,058	0,056	0,054	0,052	0,051	0,049
	10	0,114	0,113	0,111	0,110	0,109	0,108	0,108	0,108	0,109	0,110	0,111
	20	0,140	0,141	0,143	0,145	0,147	0,149	0,151	0,154	0,156	0,159	0,162
	30	0,085	0,087	0,088	0,090	0,091	0,092	0,093	0,094	0,095	0,096	0,096
<i>T. guianensis</i>												
'T1'	5	-0,017	-0,020	-0,017	-0,003	0,021	0,047	0,067	0,079	0,082	0,081	0,078
	10	-0,008	0,005	0,029	0,059	0,084	0,098	0,102	0,100	0,095	0,088	0,081
	20	0,087	0,119	0,143	0,151	0,147	0,137	0,125	0,112	0,101	0,092	0,083
	30	0,284	0,267	0,238	0,206	0,178	0,153	0,133	0,117	0,104	0,093	0,084
<i>M. guianensis</i>												
'T1'	5	0,004	0,005	0,006	0,007	0,009	0,011	0,013	0,016	0,019	0,023	0,027
	10	0,012	0,015	0,018	0,021	0,025	0,030	0,035	0,041	0,047	0,054	0,060
	20	0,041	0,048	0,055	0,063	0,071	0,080	0,088	0,096	0,103	0,109	0,115
	30	0,088	0,097	0,107	0,117	0,126	0,133	0,140	0,146	0,150	0,152	0,154
<i>A. albiflora</i>												
'T1'	5	0,004	0,006	0,009	0,014	0,021	0,030	0,041	0,055	0,070	0,085	0,100
	10	0,019	0,026	0,037	0,050	0,066	0,084	0,102	0,120	0,135	0,148	0,156
	20	0,079	0,099	0,122	0,145	0,167	0,184	0,197	0,205	0,209	0,208	0,204
	30	0,177	0,202	0,226	0,244	0,255	0,261	0,260	0,255	0,247	0,237	0,225

Fonte: A autora (2022).

A espécie *Z. racemosa* na área manejada 'T1', apresentou um saldo positivo no seu crescimento em relação ao controle (Tabela 7). Contudo, esta espécie não possui um crescimento natural acelerado, ou seja, mesmo com o favorecimento do manejo, o seu diâmetro não chegou a 50 cm (DMC generalizado). Com isso, analisando a Figura 10, uma árvore com DAP = 5 cm em um CC de 25 anos (CC mais curto) chega a 6,82 cm na área de controle e 9,23 cm na área manejada. No CC de 35 anos (CC longo) chega a 7,68 cm e 11,45 cm para 'T0' e 'T1', respectivamente. Uma árvore com DAP = 30 cm no CC de 35 anos atingi 24,19 cm e 33,57 cm, para 'T0' e 'T1', respectivamente. O MC de Richards estimou que em 100 anos, uma árvore com 5, 10, 20 e 30 cm atinge 14,93, 22,39, 29,85 e 33,58 cm, respectivamente.

Uma árvore da espécie *T. guianensis*, com DAP inicial de 5 cm, até os 30 anos, na área manejada há um decréscimo em relação a área controle, o mesmo ocorre para uma árvore de 10 cm, porém até 1 ano, após esse tempo o manejo favorece o aumento em incremento diamétrico em uma projeção de até 100 anos.

Para a espécie *M. guianensis*, o MC de Richards mostrou que uma árvore com DAP = 30 cm, atinge o DMC generalizado (50 cm) em aproximadamente 85 anos, ou seja, três vezes a mais um CC de 25 anos e duas vezes mais do que um com CC de 35 anos. Em um CC de 25 anos, uma árvore com 5, 10, 20 e 30 cm chegam a 7,49, 4,36, 26,48 e 36,85 cm, respectivamente. Essas mesmas árvores atingiram 8,72, 16,37, 29,14, 39,38 cm considerando um CC de 35 anos. Na Tabela 3, observa-se que uma árvore com DAP de 30 cm ainda continua crescendo com 100 anos na área manejada e é superior à área sem manejo, com IPA extra 0,154 cm ano⁻¹.

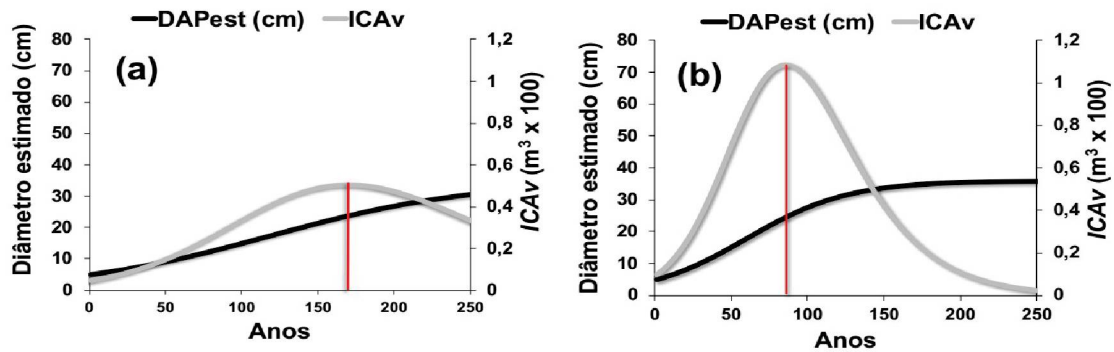
O MC de Richards mostrou que uma árvore de *A. albiflora* com DAP de 5, 10, 20 e 30 cm em um CC de 25 anos, atinge os diâmetros de 9,98, 18,68, 33,13 e 44,69 cm, respectivamente, na área manejada. Quando considerado um CC de 35 anos, essa mesma árvore atinge em DAP 12,94, 23,34, 39,05 e 50,39 cm, respectivamente. Para esses valores iniciais de DAP, na área sem manejo, houve uma diminuição do diâmetro para 2,92%, 5,79%, 10,08%, 13,17% (considerando CC de 25 anos) e 4,69%, 8,70%, 14,01% e 17,39%, considerando CC de 35 anos.

Em geral, todas as espécies obtiveram efeito positivo no crescimento do seu diâmetro na área manejada (Tabela 7). Observa-se um IPA extra maior nos indivíduos remanescentes com diâmetros iniciais de 30 cm ao longo do tempo. Além disso, nota-se que esse efeito pode abranger períodos maiores que 100 anos.

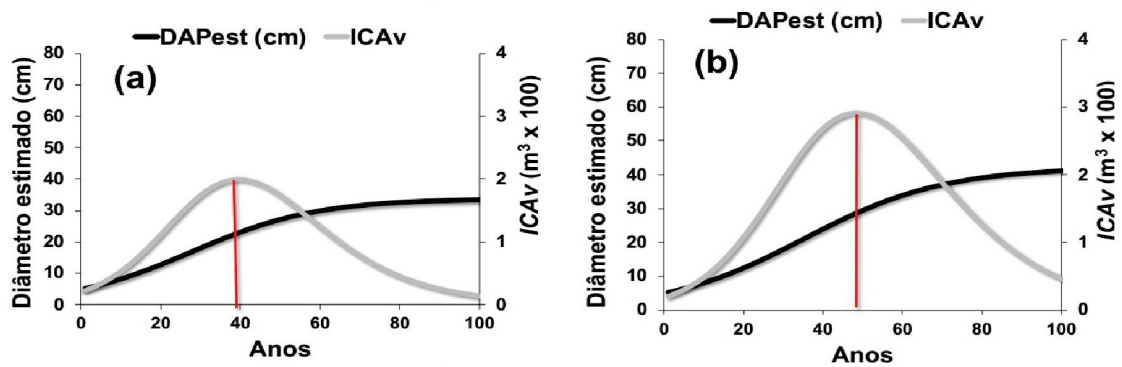
Na Figura 11, observa-se a curva dos DAPs estimados e do incremento em volume ao longo do tempo. Na Tabela 8, são apresentados os resultados obtidos para o DMC e os CC específico por espécie de acordo com Schöngart (2008).

FIGURA 11 – CURVAS DE INCREMENTO EM VOLUME PARA ÁRVORES INDIVIDUAIS PARA QUATRO ESPÉCIES DO EXPERIMENTO NO KM 114 DA FLORESTA NACIONAL DO TAPAJÓS, PA. (A) CONTROLE. (B) ÁREA MANEJADA. LINHA VERMELHA: IDADE DMC ESPECÍFICO (ANOS).

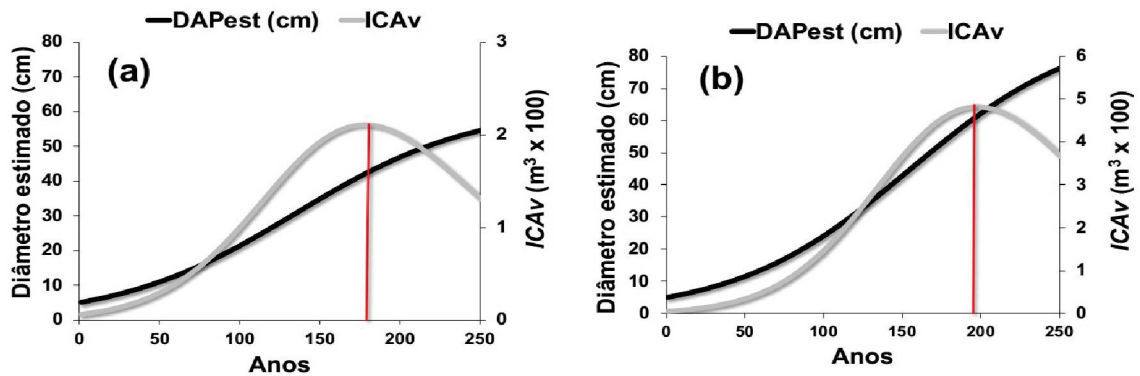
Z. racemosa



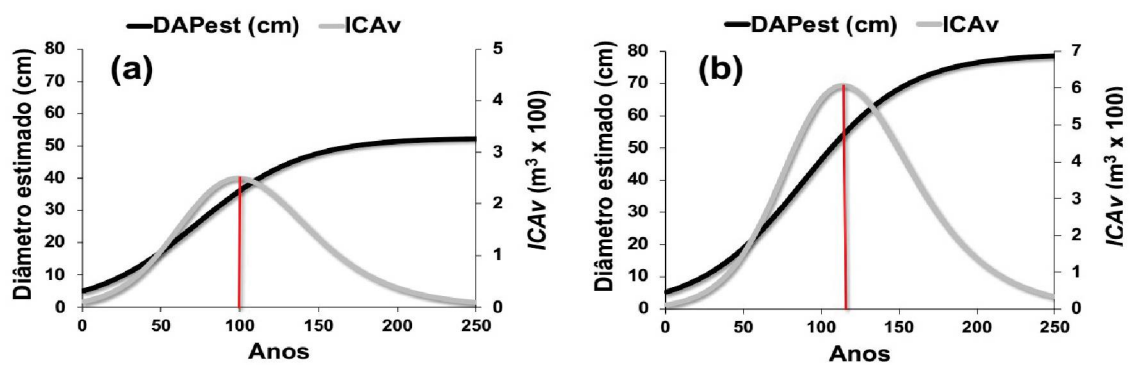
T. guianensis



M. guianensis



A. albiflora



FONTE: A autora (2022).

TABELA 8 – CICLO DE CORTE ESTIMADO DE ACORDO COM O MÉTODO GOL ($ICA_{MÁX.}$) POR ESPÉCIE, PARA UMA ÁREA EXPERIMENTAL DO KM 114 NA FLORESTA NACIONAL DE TAPAJÓS, PA.

Espécies	Tratamento	Idade DMC (anos)	DMC específico (cm)	ICA_v máx. ($m^3.ano^{-1} \times 100$)	CC específico (anos)
<i>Z. racemosa</i>	'T0'	172	23,78	0,50	72
	'T1'	85	24,40	1,09	35
<i>T. guianensis</i>	'T0'	39	22,61	1,98	17
	'T1'	48	28,40	2,90	17
<i>M. guianensis</i>	'T0'	178	42,07	2,10	42
	'T1'	198	61,42	4,82	32
<i>A. albiflora</i>	'T0'	99	35,77	2,49	28
	'T1'	114	53,83	6,08	21

FONTE: A autora (2022).

Como esperado, os DMC e CC específicos diferem para cada espécie e também por tratamento (área manejada "T1" e controle "T0"). O maior DMC específico encontrado dentre as espécies foi de 61,42 cm (*M. guianensis*, 'T1') e o menor de 22,61 cm (*T. guianensis*, 'T0'), sendo maior CC específico encontrado aos 72 anos (aproximadamente dois CC de 35 anos e três CC de 25 anos) para a espécie *Z. racemosa* na área de controle, decaindo para 35 anos na área manejada.

A espécie *T. guianensis* apresentou nos tratamentos 'T0' e 'T1' o mesmo CC específico para espécie (17 anos), entretanto com um aumento de 9 cm de diâmetro e incremento em volume máximo de $0,92 m^3 \text{ ano}^{-1}$ na área manejada. Esses valores foram os menores CC específicos dentre as espécies estudadas neste trabalho.

Os resultados mostram que com o uso do manejo "T1", o CC específico diminuiu 10 anos para a espécie *M. guianensis*. Contudo, apresentou a idade DMC maior que o tratamento controle 'T0', com um $ICA_{vmáx.}$ de $4,82 m^3.ano^{-1}$ (área manejada, 'T1') e $2,10 m^3.ano^{-1}$ (Controle, 'T0').

A. albiflora atingiu o máximo ICA_v com 99 anos na área controle e 114 anos na área manejada, possuindo, respectivamente, DMC específico de 35,77 (área controle, 'T0') e 53,83 cm (área manejada, 'T1'). Os CCs foram próximos entre os dois tratamentos, no controle foi de 28 anos e na área com práticas de manejo igual a 21 anos.

No geral, a área manejada apresentou os maiores DMC e menores CC específico por espécie quando comparados com a área de controle. Os incrementos máximos em volume também foram maiores no 'T1', indicando um benefício do manejo no crescimento e consequente otimização do DMC e CC específico.

5 DISCUSSÃO

5.1 PADRÃO DIAMÉTRICO DAS ESPÉCIES ESTUDADAS NATIVAS DA AMAZÔNIA

No geral, as espécies apresentaram recuperação em 30 anos após a exploração com as práticas de manejo, indicando que um ciclo de corte de 35 anos possivelmente pode atender à demanda ecológica ('C', Figura 8) e também econômica ('T1', Tabela 8) de cada espécie. Para Peters (1996), a estrutura diamétrica ideal de uma floresta manejada sustentavelmente seria aquela que apresenta maior número de indivíduos nas menores classes de tamanho com uma redução constante do número de indivíduos de uma classe para a outra.

T. guianensis e *A. albiflora* foram as espécies que apresentaram diferença significativa nas suas distribuições diamétricas (Figura 8) entre os períodos analisados (1981; 1989 e 2012), demonstrando uma maior sensibilidade dessas espécies ao manejo florestal. O interessante disso é o aumento no número de árvores na primeira classe de diâmetro (5 – 15 cm) da *A. albiflora*, que pode ser explicado pelo comportamento ecológico da espécie, sendo caracterizada como intolerante a sombra ou pioneira (PINHEIRO et al. 2007).

Para a espécie *T. guianensis* houve diferença somente aos 7 anos após a exploração. Depois de 30 anos após a exploração e 18 anos após a aplicação dos tratamentos silviculturais, a distribuição diamétrica entre os períodos não apresentou diferença significativa para esta espécie. O desenvolvimento da *T. guianensis* é mais lento no início do seu crescimento (SILVA, 2004), mas posteriormente acelera seu crescimento, migrando para classes superiores. É uma espécie considerada por Pinheiro et al. (2007) como intolerante a tolerante a sombra ou secundária inicial.

Tanto *Z. racemosa* como *M. guianensis*, ambas tolerantes à sombra (ANDRADE et al. 2017; OLIVEIRA et al. 2017), não foram diferentes entre os períodos analisados em suas respectivas distribuições. No estudo de Gauri (2013), *Z. racemosa* e *M. guianensis* apresentaram um aumento sutil de abundância com o passar dos anos nas áreas exploradas, após a redução inicial da população, pós-corte. Estas espécies tiveram os maiores valores de recrutamento, com 16 e 12 indivíduos recrutados de cada espécie, respectivamente, no período de 25 anos pós-exploração em uma área experimental em Manaus – AM.

As funções que se destacaram para representar o comportamento diamétrico das espécies foram Weibull 3P, Beta, e SB de Johnson e isso se deve a sua flexibilidade de ajuste para diferentes situações de dados. Também apresentaram aderência satisfatória com a realidade da distribuição diamétrica das espécies. Essa grande variedade de funções para cada espécie e período pós-exploração florestal, mostra que é necessário conhecer a distribuição diamétrica para cada espécie por apresentarem comportamentos estruturais únicos para cada situação.

Em geral, considerando o teste de K-S e a análise gráfica dos modelos de distribuição, o Weibull 3P foi o mais eficiente para representar a distribuição diamétrica das espécies estudadas. Isso pode ser explicado por conta da alta flexibilidade da função Weibull 3P, uma vez que pode ser usada em diferentes curvas e formas para várias tipologias florestais (UMAÑA e ALENCAR, 1998).

A não aderência das funções de probabilidade aos conjuntos de dados pode ser explicada pela disposição dos dados de diâmetro. Orellana e Figueiredo Filho (2017) verificaram que um grande número de observações nas primeiras classes afeta diretamente os resultados do teste de K-S, sugerindo que o teste é sensível quando a frequência é grande nas classes inferiores, podendo indicar a falta de ajuste para os modelos testados.

Existe uma dificuldade na análise da distribuição diamétrica de espécies nativas, principalmente por um pequeno número de árvores inventariadas de cada espécie, na maioria dos casos, ocorrendo apenas 1 árvore.ha⁻¹ ou até menos, como no caso desta pesquisa.

5.2 CRESCIMENTO DIAMÉTRICO A NÍVEL DE ÁRVORE INDIVIDUAL POR ESPÉCIE

O crescimento das árvores de cada espécie alterou-se de acordo com o DAP inicial 5, 10, 20 e 30 cm, ou seja, o tamanho da árvore influencia no crescimento em diâmetro das espécies (Figura 10, Tabela 7). Clark e Clark (1999) mencionam que o crescimento em diâmetro é altamente dependente do tamanho da árvore, pois classes menores tendem a possuir um incremento menor em diâmetro, devido ao número elevado de plantas e, conseqüentemente, competição por nutrientes, água e luz.

Para Vieira et al. (2005), o conhecimento da idade e das taxas de incremento em diâmetro das árvores comerciais pode ser útil para estimar o tempo que levaria para substituí-las por uma nova árvore do mesmo tamanho. Andrade et al. (2019) utilizaram a dendroecologia para realizar a modelagem de crescimento a partir dos anéis de crescimento, visto que, a idade é uma variável de difícil acesso em florestas naturais. Os modelos utilizados nesta pesquisa não necessitam da idade, e isso é uma vantagem para as estimativas de crescimento de espécies por meio de modelos biológicos simples, pois somente com o ajuste de três parâmetros consegue-se resultados estatisticamente próximos a realidade, como já mostrados por David et al. (2019). Outros trabalhos com metodologias diferentes foram realizados, como os de Reis et al. (2016), que utilizaram Redes Neurais Artificiais (RNA) para estimar o crescimento de árvores individuais na Amazônia. Ferreira et al. (2020) estimaram o crescimento de *Manilkara elata* (Allemão ex Miq.) Monach a partir de árvores com 5 cm de diâmetro por meio do modelo adaptado de Weibull.

Terra et al. (2022), projetou o crescimento de espécies utilizadas no reflorestamento do arco da Amazônia, dentre elas as nativas *Cedrela odorata* L., *Cordia alliodora* (Ruiz & Pav.) Cham., *Handroanthus heptaphyllus* (Vell.) Mattos., *Handroanthus impetiginosus* (Mart. ex DC.) Mattos., *Handroanthus serratifolius* (Vahl) S.Grose., *Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* (Huber ex Ducke) Barneby., e *Simarouba amara* Aubl., os autores utilizaram modelagem de crescimento do DAP em função da idade com RQME variando de 0,75 a 4,92 entre os modelos e as espécies. O melhor MC (Richards) desta pesquisa obteve uma variação da RQME de 5,87 a 16,91 entre os tratamentos e por espécies, isso se deve a reformulação do modelo para o DAP em função do período de medição (Y_{t+a}) ou/e a grande variabilidade dos diâmetros em conjunto com os erros aleatórios. Contudo, ainda assim, esses modelos conseguem estimar com acuracidade e precisão os DAPs futuros (Tabela 6, Figura 9).

David et al. (2019) analisaram o crescimento de cinco espécies nativas amazônicas (*Astronium lecointei*, *Chrysophyllum lucentifolium*, *Lecythis lurida*, *Manilkara paraensis*, e *Manilkara elata*), para determinação de CC específicos por espécie. A única espécie não beneficiada com o tratamento silvicultural aplicado (liberação de copa por anelamento) foi *Manilkara elata* em uma projeção de até 100 anos. Para os autores os CCs (25 e 35 anos) permitem que a *M. paraensis* alcance um DAP não superior a 60 cm no controle e 70 cm com tratamento silvicultural.

Essa pesquisa se limitou a um banco de dados de médio prazo (31 anos), sendo possível que com prazos mais longos as taxas de crescimento dessas espécies mudem. O interessante seria avaliar, nos inventários experimentais, outras covariáveis relacionadas, como clima e solo, para uma compreensão melhor do comportamento arbóreo com as características locais.

5.3 DMC E CC ESPECÍFICOS PARA ESPÉCIES COMERCIAIS AMAZÔNICAS

As espécies *Z. racemosa* e *T. guianensis* não chegaram ao DMC generalizado (50 cm), porém o comportamento das duas espécies é interessante, pois responderam positivamente em crescimento na área manejada, principalmente a espécie *Z. racemosa* ('T1', Tabela 8) que diminuiu a idade DMC específico para 85 anos, com um saldo de diâmetro em cm de 0,61, diminuindo com isso CC específico.

No período projetado pelo MC de Richards, essas espécies (*Z. racemosa* e *T. guianensis*) obtiveram o $ICAV_{máx.}$, implicando em perda de tempo na exploração ao esperar o DMC generalizado (50 cm) de uma área florestal com espécies nativas produtivas com essas mesmas características.

A pesquisa aqui sugere um CC de 35 anos para a espécie *Z. racemosa* e 17 anos para *T. guianensis*, devendo ser levado em consideração a estrutura diamétrica dessas espécies (Figura 7, Figura 8). Percebe-se um aumento de ingresso na classe inferior de 5-15 cm após apenas 7 anos da exploração na área, o que é considerado bom, pois mostra que as espécies contêm estoques futuros e possuem dinâmica após uma alteração (exploração).

As espécies possuem dinâmica diferentes possibilitando DMC e CC específico por espécie para garantir a sustentabilidade da floresta.

Existe muita controvérsia sobre a utilização do DMC específico. Seria interessante conduzir pesquisas para obter um banco de dados que contemple períodos de médio a longo prazo, que possibilitem a comparação entre área manejada e área não manejada, e que não superestimem, principalmente, o parâmetro assíntota da modelagem, respeitando o crescimento natural da espécie, então o DMC específico poderia ser utilizado para otimização de CC e DMC por espécie.

Neste estudo aplicou-se o conceito GOL (SCHÖNGART, 2008) sendo a primeira derivada da curva de crescimento ou a idade do DMC em que a espécie atinge o maior incremento máximo de volume atual ($ICAV_{m\acute{a}x}$). Alguns estudos usam incremento máximo da área basal na abordagem de modelagem para definir critérios de manejo (LÓPEZ et al. 2013). Contudo, segundo Machado et al. (2015); Ridder et al. (2013), o volume é um parâmetro de crescimento que atinge o incremento máximo mais tarde que a altura, diâmetro e área basal, assim sendo a medida mais indicada para a real da produção das espécies.

Para Pires et al. (2021), os modelos de crescimento e produção retratam uma síntese da dinâmica de crescimento da floresta, permitindo fornecer informações fundamentais para a definição de estratégias de planejamento, como o estabelecimento de um CC e uma intensidade de exploração mais compatível com a taxa de crescimento da floresta e para cada espécie.

Em florestas nativas produtivas é necessária a utilização de DMC específico por espécie. Informações, como as alcançadas na presente pesquisa, indicam que pode ocorrer uma superestimativa de CC quando se generaliza, resultando em perda de tempo e produção, aspectos já levantados por Braz e Mattos (2015). Devido a isso é necessário flexibilizar o DMC por espécie ou por grupos de espécies com características semelhantes.

6 CONCLUSÕES

No geral, todas as espécies mantiveram o maior número de árvores na primeira classe de diâmetro (5 –15 cm) após 7 anos da exploração e 18 anos após os tratamentos silviculturais na área, indicando a ocorrência de dinâmica positiva para as espécies com padrão “J” invertido.

A função de Weibull 3P foi a que apresentou melhor aderência aos dados coletados, assim sendo indicada para modelar as distribuições diamétricas dessas espécies na tipologia de floresta idênticas do presente estudo, seguido das funções Beta e de SB Johnson.

A pesquisa realizada sugere para a área explorada sejam inseridos CC e DMC específicos para as espécies *Zygia racemosa* ($CC_{esp.} = 35$ anos e $DMC_{esp.} = 24$ cm), *Tapirira guianensis* ($CC_{esp.} = 17$ anos e $DMC = 28$ cm), *Minuartia guianensis* ($CC_{esp.} = 32$ anos e $DMC = 61$ cm) e *Apeiba albiflora* ($CC_{esp.} = 21$ anos e $DMC = 54$ cm).

Na área não explorada os CC e DMC específicos para *Zygia racemosa* ($CC_{\text{esp.}} = 72$ anos e $DMC_{\text{esp.}} = 24$ cm), *Tapirira guianensis* ($CC_{\text{esp.}} = 17$ anos e $DMC = 23$ cm), *Minquartia guianensis* ($CC_{\text{esp.}} = 42$ anos e $DMC = 42$ cm) e *Apeiba albiflora* ($CC_{\text{esp.}} = 28$ anos e $DMC = 36$ cm).

REFERÊNCIA BIBLIOGRÁFICA

- ACKERLY, D. D.; RANKIN-DE-MERONA, J. M.; RODRIGUES, W. A. 1990. Tree densities and sex ratios in breeding populations of dioecious Central Amazonian Myristicaceae. **Journal of Tropical Ecology**, v. 6, n. 2, p. 239-248, 1990.
- ALDER, D.; SILVA, J. N. M. An empirical cohort model for management of Terra Firme forests in the Brazilian Amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 130, n. 1-3, p. 141-157, 2000.
- ALENCAR, J. C. Fenologia de espécies arbóreas tropicais na Amazônia Central. **Floresta Amazônica: dinâmica, regeneração e manejo**, p. 25-40, 1998.
- ALVARES, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. D. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711-728, 2013.
- AMARO, A.; REED, D.; TOMÉ, M.; THEMIDO, I. Modeling dominant height growth: Eucalyptus plantations in Portugal. **Forest Science**, v. 44, n. 1, p. 37- 46, 1998.
- ANDRADE, V. H. F.; MACHADO, S. A; FIGUEIREDO, A.; BOTOSSO, P. C; MIRANDA, B. P.; SCHÖNGART, J. Growth models for two commercial tree species in upland forests of the Southern Brazilian Amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 438, p. 215-223, 2019.
- ARÓSTEGUI VARGAS, A.; DIAZ PORTOCARRERO, M. Propagación de espécies forestales nativas promissórias em Jenaro Herrera. Iquitos: Instituto de Investigaciones de La Amazonia Peruana: Centro de Investigaciones de Jenaro Herrera, 1992. 121 p.
- AVERY, T. E.; BURKHART, H. E. **Forest measurements**. McGraw-Hill, New York. v. 5, 2002.
- AVILA, A. L.; RUSCHEL, A. R.; CARVALHO, J. O. P.; MAZZEI, L.; SILVA, J. N. M.; LOPES, J. C; BAUHUS, J. Medium-term dynamics of tree species composition in response to silvicultural intervention intensities in a tropical rain forest. **Biological Conservation**, v. 191, p. 577-586, 2015.
- AVILA, A. L.; SCHWARTZ, G; RUSCHEL, A. R.; LOPES, J. C; SILVA, J. N. M.; CARVALHO, J. O. P; BAUHUS, J. Recruitment, growth and recovery of commercial tree species over 30 years following logging and thinning in a tropical rain forest. **Forest ecology and management**, v. 385, p. 225-235, 2017.
- AVILA, A. L.; VAN DER SANDE, M.T.; DORMANN, C. F.; PEÑA-CLAROS, M.; POORTER, L.; MAZZEI, L.; RUSCHEL, A.; SILVA, J. N. M.; CARVALHO, J. O. P.; BAUHUS, JÜRGEN. Disturbance intensity is a stronger driver of biomass recovery than remaining tree-community attributes in a managed Amazonian Forest. **Journal of Applied Ecology**, v.55, p.1647-1657, 2018.

BARNEBY, R. C.; GRIMES, J. W. A Generic System for the Synandrous Mimosaceae of the Americas: part II. *Pithecellobium*, *Cojoba* and *Zygia*. **Memories of The New York Botanical Garden** v.74, 1997.

BATISTA, A. P. B.; APARÍCIO, W. C. da S.; APARÍCIO, P. da S.; SANTOS, V. S. dos; LIMA, R. B. de; MELLO, J. M. de. Caracterização estrutural em uma floresta de terra firme no estado do Amapá, Brasil. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 35, n. 81, p. 21-33, 2015.

BATISTA, A.; VITOR SCOLFORO, P. G.; SCOLFORO, H. F.; DE MELLO, J. M.; GUEDES, M.; SOARES SCOLFORO, J. R. Modeling Tree Diameter Growth of *Bertholletia excelsa* Bonpl. in the Brazilian Amazon. **Forests**. v. 11, n. 12, p. 1309, 2020.

BRASIL. Decreto nº 5.975, de 30 de novembro de 2006. Regulamenta os arts. 12, parte final, 15, 16, 19, 20 e 21 da Lei nº 4.771, de 15 de setembro de 1965, o art. 4º, inciso iii, da Lei nº 6.938, de 31 de agosto de 1981, o art. 2º da Lei nº 10.650, de 16 de abril de 2003, altera e acrescenta dispositivos aos decretos nºs 3.179, de 21 de setembro de 1999, e 3.420, de 20 abril de 2000, e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 01 dez. 2006. Seção 1, p. 1.

BRASIL. Lei nº 11.284, de 2 de março de 2006. Dispõe sobre a gestão de florestas públicas para a produção sustentável. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 03 mar. 2006. Seção 1, p. 1.

BRASIL. Lei nº 12.651, de 25 de maio de 2012. Dispõe sobre a proteção da vegetação nativa; altera as Leis nos 6.938, de 31 de agosto de 1981, 9.393, de 19 de dezembro de 1996, e 11.428, de 22 de dezembro de 2006; revoga as Leis nos 4.771, de 15 de setembro de 1965, e 7.754, de 14 de abril de 1989, e a Medida Provisória no 2.166-67, de 24 de agosto de 2001; e dá outras providências. **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, 28 maio. 2012. Seção 1, p. 1.

BRASIL. Ministério do Meio Ambiente. Instrução Normativa 5, de 11 de dezembro de 2006. Dispõe sobre procedimentos técnicos para elaboração, apresentação, execução e avaliação técnica de Planos de Manejo Florestal Sustentável-PMFSS nas florestas primitivas e suas formas de sucessão na Amazônia legal, e dá outras providências, **Diário Oficial da União**, Brasília, DF, n. 238, 13 dez. 2006. Seção 1, p. 155.

BRAZ, E. M. **Subsídios para o planejamento do manejo de florestas tropicais da Amazônia**. 236 f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria, 2010.

BRAZ, E. M.; DE MATTOS, P. P. Manejo de produção em florestas naturais da Amazônia: mitos e verdades. **Nativa**, Sinop, v. 3, n. 4, p. 292-295, 2015.

BURKHART, H. E.; TOMÉ, M. Growth functions. *In: Modeling forest trees and stands*. Springer, Dordrecht, 2012. 111-130p.

CAMPOS, J.C.C., LEITE, H.G. **Mensuração florestal**. Viçosa, MG: Universidade Federal de Viçosa, 2002. 407p.

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

CARDIAS, M. **Durabilidad natural de algunas especies de madeiras brasileiras: uma revisao bibliografica**. Manaus: CNPF: INPA, 1985. 63 p. (Série Técnica, n. 7).

CARIM, M. de J. V. 95 f. **Estrutura, composição e diversidade em florestas alagáveis de várzea de maré e de igapó e suas relações com variáveis edáficas e o período de inundação no Amapá, Amazônia Oriental, Brasil**. Tese (Doutorado em Ciências Biológicas) - Instituto Nacional de Pesquisas da Amazônia, Manaus, 2016.

CARVALHO, J. O. P. **Structure and dynamics of a logged over Brazilian Amazonian rain forest**. Tese (Doutorado em Ciências Florestais) – Oxford University, RU. Dept. of Plant Sciences, 1992.

CARVALHO, J. O. P.; SILVA, J. N. M.; LOPES, J. C. A. Growth rate of a terra firme rain forest in Brazilian Amazonia over an eight-year period in response to logging. **Acta Amazonica**, v. 34, n. 2, p. 209-217, 2004.

CARVALHO, J.O.P. 1999. Dinâmica de florestas naturais e sua implicação para o manejo florestal... *In*: SIMPÓSIO SILVICULTURAL NA AMAZÔNIA ORIENTAL: Contribuições do projeto EMBRAPA/DFID, Belém. **Resumos expandidos...** Belém: Embrapa. CPATU: DFID. p. 174-179.

CARVALHO, P. E. R. **Espécies florestais brasileiras: recomendações silviculturais, potencialidades e uso da madeira**. Colombo: Embrapa Florestas, 2006. 191 p.

CASTRO, T.C.; RUSCHEL, A. R.; CARVALHO, J.O.P.; RAMOS, E.M.L.S.; GOMES, J.M. Representatividade e precisão na estimativa da densidade e área basal na Floresta Nacional do Tapajós. **Nativa**, v.7, p.312-316, 2019.

CAUSTON, D. R; VENUS J. C. **The biometry of plant growth**. Edward Arnold., p. 291-296, 1981.

CIESZEWSKI, C. J. Comparing fixed-and variable-base-age site equations having single versus multiple asymptotes. **Forest Science**, v. 48, n. 1, p. 7-23, 2002.

CLARK, D. A.; CLARK, D. B. Assessing the growth of tropical rain forest trees: issues for forest modeling and management. **Ecological applications**, v. 9, n. 3, p. 981-997, 1999.

CORDERO, J.; BOSHIER, D. H. **Árboles de Centroamerica: un manual para extensionistas**. Costa Rica: CATIE, 2003. 1079 p.

COSTA, C. C.; GURGEL, E. S. C.; GOMES, J. I.; LUZ, C. D. S.; DE CARVALHO, L. T.; MARGALHO, L. F.; SOUZA, A. S. **Conhecendo espécies de plantas da Amazônia: Tatapiririca (*Tapirira guianensis* Aubl. – Anacardiaceae)**. Embrapa Amazônia Oriental-Comunicado Técnico (INFOTECA-E), 2014.

COSTA, D. H. M.; SILVA, J. N. M.; CARVALHO, J. O. P. Crescimento de arvores em uma área de terra firme na floresta nacional do tapajós após a colheita de madeira. **Revista de Ciências Agrárias Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v. 50, n. 1, p. 63-76, 2008.

COSTA, D. H. M.; SILVA, S. M. A. da; SILVA, J. N. M. Efetividade e custos do desbaste com aplicação de arboricida em floresta natural na região do Tapajós, Pará e Jari, Amapá. *In*: Silva, J. N. M.; CARVALHO, J. O. P.; YARED, J. A. C. (Ed.). **A silvicultura na Amazônia Oriental: contribuições do projeto Embrapa-DFID**. Belém: Embrapa Amazônia Oriental: DFID, 2001. p. 339- 352.

CUNHA, T. A.; FINGER, C. A. G.; HASENAUER, H. Tree basal area increment models for *Cedrela*, *Amburana*, *Copaifera* and *Swietenia* growing in the Amazon rain forests. **Forest Ecology and Management**, v. 365, p. 174-183, 2016.

D'OLIVEIRA, M. V. N; RIBAS, L. A. Forest regeneration in artificial gaps twelve years after canopy opening in Acre State Western Amazon. **Forest Ecology and Management**, v. 261, n. 11, p. 1722-1731, 2011.

DANIELS, R. F.; BURKHART, H. E.; CLASON, T. R. A comparison of competition measures for predicting growth of loblolly pine trees. **Canadian journal of forest research**, v. 16, n. 6, p. 1230-1237, 1986.

DAVID, H. C.; CARVALHO, J. O.; PIRES, I. P., SANTOS, L. S.; BARBOSA, E. S.; BRAGA, N. S. A 20-year tree liberation experiment in the Amazon: Highlights for diameter growth rates and species-specific management. **Forest Ecology and Management**, v. 453, p. 117584, 2019.

DUNN, O. J. Multiple comparisons among means. **Journal of the American statistical association**, v. 56, n. 293, p. 52-64, 1961.

ESTEVES, G. *Apeiba* in Lista de Espécies da Flora do Brasil. Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2015. Disponível em <http://floradobrasil2015.jbrj.gov.br/FB9005>. Acesso em 29. de abr. de 2022.

FEDALTO, L. C.; MENDES, I. da C. A.; CORADIM, V. T. R. **Madeiras da Amazônia: Descrição do lenho de 40 espécies ocorrentes na Floresta Nacional do Tapajós**. Brasília, DF: IBAMA, 1989. 156 p.

FERREIRA, G. C.; MARTINS-DA-SILVA, R. C. V.; GOMES, J. I. Contribuição ao conhecimento de espécies de leguminosae, conhecidas na Amazônia brasileira como "angelim" e variações. Embrapa Amazônia Oriental-Capítulo em livro científico (ALICE), 2001.

FERREIRA, T. M. C.; DE CARVALHO, J. O. P.; EMMERT, F.; RUSCHEL, A. R.; NASCIMENTO, R. G. M. How long does the Amazon rainforest take to grow commercially sized trees? An estimation methodology for *Manilkara elata* (Allemão ex Miq.) Monach. **Forest Ecology and Management**, v. 473, p. 118333, 2020.

FONSECA, C. R. V.; NEVES, R. S.; FERREIRA, E. J. G.; OLIVEIRA, L. A.; FILHO, A. O. M.; MAGNUSSON, W. E. Catálogo de Madeiras da Amazônia: Características tecnológicas; Área da Hidrelétrica de Balbina. 1991.

FREDERICKSEN, T. S.; MOSTACEDO, B. Regeneration of timber species following selection logging in a Bolivian tropical dry forest. **Forest Ecology and Management**, v. 131, n. 1-3, p. 47-55, 2000.

GAUI, T. D. **Mudança na Composição de Espécies Arbóreas em uma Floresta de Terra Firme Explorada Experimentalmente há 25 anos na Amazônia Central**. 6f. Dissertação (mestrado em Ciências de Florestas Tropicais) – INPA, Manaus – AM, 2013.

GJOVIK, L. R.; GANDOLFI JUNIOR, A.; CARLOS, V. J.; HANROSENBLUM, M. Wood preservation. In: MAEGLIN, R. R. (Ed.). **Forest products from Latin America: an almanac of the state of the knowledge and the state of the art**. Madison: USDA Forest Service, Forest Products Laboratory, 1991. p. 99-108.

GODAR, J.; TIZADO, E. J.; POKORNY, B. Who is responsible for deforestation in the Amazon? A spatially explicit analysis along the Transamazon Highway in Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 267, p. 58-73, 2012.

GUAPYASSÚ, M. S. 150 f. Caracterização fitossociológica de três fases sucessionais de uma floresta Ombrófila Densa Submontana - Morretes - Paraná. Curitiba - PR. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal - Conservação da Natureza), UFPR – PR, 1994.

HERRERO-JÁUREGUI, C.; GARCÍA-FERNÁNDEZ, C.; SIST, P. L. J.; CASADO, M. A. Conflict of use for multi-purpose tree species in the state of Pará, eastern Amazonia, Brazil. **Biodiversity Conservation**, v. 18, n. 4, p. 1019-1044, 2009.

HIGUCHI, N. Utilização e manejo dos recursos madeireiros das florestas tropicais úmidas. **Acta Amazônica**. p.275-288, 1994.

HOSOKAWA, R. T.; MOURA, J. B.; CUNHA, U. S. **Introdução ao manejo e economia de florestas**. Curitiba: UFPR, 1998. p.162.

IBARRA-MANRÍQUEZ, G.; OYAMA, K. Ecological correlates of reproductive traits of Mexican rain forest trees. **American Journal of Botany**, v. 79, n. 4, p. 383-394, 1992.

ICMBIO, Unidade de Conservação da Amazônia: Flona de Tapajós. Disponível em: <http://www.icmbio.gov.br/portal/unidadesdeconservacao/biomasbrasileiros/amazonia/unidades-de-conservacao-amazonia/1963-flona-do-tapajos>>. Acessado em: 10 de jan. 2020.

IMAÑA-ENCINAS, J.; SILVA, G. F.; PINTO, J. R. R. 2005. **Idade e crescimento das árvores** (Comunicações Técnicas Florestais, v. 7, n. 1). Brasília: Departamento de Engenharia Florestal, Universidade de Brasília.

INSTITUTO BRASILEIRO DE DESENVOLVIMENTO FLORESTAL. Madeiras da Amazônia: características e utilização: Floresta Nacional do Tapajós. Brasília, DF, 1981. v. 1, 113 p.

KIVISTE, A. K. Mathematical functions of forest growth. **Growth**, v. 29, p. 233-238, 1988.

KORF, V. A mathematical definition of stand volume growth law. **Lesnická práce**, v. 18, p. 337-339, 1939.

KRUSKAL, W. H.; WALLIS, W. A. Use of ranks in one-criterion variance analysis. **Journal of the American statistical Association**, v. 47, n. 260, p. 583-621, 1952.

LIBERATO, M. A. R. 91f. **Comportamento fisiológico de plantas jovens de acariquara (*Minquartia guianensis* Aubl.) sob níveis crescentes de irradiância e diferentes condições de disponibilidade hídrica**. Dissertação (Mestre em Ciências Biológicas) – INPA, Manaus – AM, 2005.

LIMA, D. D. A.; REVILLA, J.; AMARAL, I. L. D.; MATOS, F. D. D. A.; COELHO, L. D. S.; RAMOS, J. F.; GUEDES, J. D. O. Aspectos florísticos de 13 hectares da área de Cachoeira Porteira-PA. **Acta Amazonica**, v. 34, n. 3, p. 415-423, 2004.

LIMA, J. D. C.; LEÃO, J. R. A. Dinâmica de crescimento e distribuição diamétrica de fragmentos de florestas nativa e plantada na Amazônia Sul Ocidental. **Floresta e Ambiente**, v. 20, n. 1, p. 70-79, 2013.

LIU, JIANGUO; ASHTON, PETER S. Individual-based simulation models for forest succession and management. **Forest ecology and management**, v. 73, n. 1-3, p. 157-175, 1995.

LÓPEZ, L.; VILLALBA, R.; BRAVO, F. Cumulative diameter growth and biological rotation age for seven tree species in the Cerrado biogeographical province of Bolivia. **Forest Ecology and Management**, v. 292, p. 49-55, 2013.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras – Manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. Nova Odessa: Ed. Plantarum, 2002. 368p.

LUNDQVIST, B. On the height growth in cultivated stands of pine and spruce in Northern Sweden. **Medd Fran Statens Skogforsk**, v. 47, n. 2, p. 1-64, 1957.

MACHADO, S. D. O. A.; DE SOUZA, R.F.; APARECIDO, L.M.T.; RIBEIRO, A.; CZELUSNIAK, B.H. Evolução das variáveis dendrométricas da Bracatinga por classe de sítio. **Cerne**, v. 21, p. 199-207, 2015.

MAESTRI, R.; SANQUETTA, C. R.; ARCE, J. Modelagem do crescimento de povoamentos de *Eucalyptus grandis* através de processos de difusão. **Floresta**, v. 33, n. 2, 2003.

MASSEY, F. J. The Kolmogorov-Smirnov test for goodness of fit. **Journal of the American statistical Association**, v. 46, n. 253, p. 68-78, 1951.

MEDAWAR, P. B. The 'laws' of biological growth. **Nature**, v. 148, n. 3765, p. 772-774, 1941.

MELO, C. F. M.; GOMES, J. I. Estudo químico e micrográfico de madeiras da Amazônia. Embrapa Amazônia Oriental-Comunicado Técnico (INFOTECA-E), 1979.

MIRANDA, D. L. C.; HIGUCHI, N.; TRUMBORE, S. E.; LATORRACA, J. V. F.; CARMO, J. F.; LIMA, A. J. Using radiocarbon-calibrated dendrochronology to improve tree-cutting cycle estimates for timber management in southern Amazon forests. **Trees**, v. 32, n. 2, p. 587-602, 2018.

MITCHELL, J. D. Anacardiaceae. *In*: BERRY, P. E.; HOLST, B. K.; YATSKERVYCH, K. **Flora of the Venezuelan Guayana**. St. Louis: Missouri Botanical Garden, 1995. 410-411p.

NEBEL, G. *Minquartia guianensis* Aubl.: use, ecology, and management in forestry and agroforestry. **Forest Ecology and Management**, v. 150, n. 1-2, p. 115-124, 2001.

NOGUEIRA, E. M.; NELSON, B. W.; FEARNSIDE, P. M. Wood density in dense forest in central Amazonia, Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 208, n. 1-3, p. 261-286, 2005.

NÚÑEZ-ANTÓN, V.; ZIMMERMAN, D. L. Modeling nonstationary longitudinal data. **Biometrics**, v. 56, n. 3, p. 699-705, 2000.

OLIVEIRA, L. C.; DO COUTO, H. T. Z.; SILVA, J. N. M.; CARVALHO, J. O. P. exploração florestal e eficiência dos tratamentos silviculturais realizados em uma área de 136 ha na floresta nacional do tapajós, Belterra-Pará. **Revista de Ciências Agrárias Amazonian Journal of Agricultural and Environmental Sciences**, v.46, n.1, p.195-214, 2006.

ORELLANA, E.; FIGUEIREDO FILHO, A. Uso do método da predição de parâmetros para projetar a distribuição diamétrica em florestas nativas com a função Weibull. **Ciência Florestal**, v. 27, n. 3, 2017.

PAULA, J. E.; ALVES, J. L. H. **897 Madeiras Nativas do Brasil: anatomia, dendrologia, dendrometria, produção, uso**. Porto Alegre: Cinco Continentes, 2007. 438p.

PEÑA-CLAROS, M.; FREDERICKSEN, T. S.; ALARCÓN, A.; BLATE, G. M.; CHOQUE, U., LEAÑO, C., PUTZ, F. E. Beyond reduced-impact logging: silvicultural treatments to increase growth rates of tropical trees. **Forest Ecology and Management**, v. 256, n. 7, p. 1458-1467, 2008.

PENNINGTON, T.D. & J. SARAKHÁN. **Árboles tropicales de México. Manual para la identificación de las principales especies**. 2.ed. UNAM – Fondos de Culturas Económicas. México, D.F, 1998. 521p.

PETERS, C. M. **Aprovechamiento sostenible de recursos no maderables en bosque húmedo tropical**: un manual ecológico. Washington: Programa de Apoyo a la Biodiversidad, 1996. 45 p.

PHILLIPS, P. D.; DE AZEVEDO, C. P.; DEGEN, B.; THOMPSON, I. S.; SILVA, J. N. M.; VAN GARDINGEN, P. R. An individual-based spatially explicit simulation model for strategic forest management planning in the eastern Amazon. **Ecological modelling**, v. 173, n. 4, p. 335-354, 2004.

PIENAAR, L. V.; TURNBULL, K. J. The Chapman-Richards generalization of von Bertalanffy's growth model for basal area growth and yield in even-aged stands. **Forest Science**, v. 19, n. 1, p. 2-22, 1973.

PINTO, J. R. R. 85f. **Levantamento florístico, estrutura da comunidade arbóreo – arbustiva e suas correlações com variáveis ambientais em uma floresta de vale no Parque Nacional da Chapada dos Guimarães, Mato Grosso**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal de Lavras, Lavras, 1997.

PIRES, S. A. O., DE MENDONÇA, A. R., DA SILVA, G. F., D'OLIVEIRA, M. V. N., DE OLIVEIRA, L. C., SILVA, J. P. M., DA SILVA, E. F. Growth modeling of *Carapa guianensis* and *Tetragastris altissima* for improved management in native forests in the Amazon. **Ecological Modelling**, v. 456, p. 109683, 2021.

R Core Team (2020). R: A language and environment for statistical computing. R Foundation for Statistical Computing, Vienna, Austria.

REIS, L. P.; DE SOUZA, A. L.; MAZZEI, L.; DOS REIS, P. C. M.; LEITE, H. G.; SOARES, C. P. B.; RUSCHEL, A. R. Prognosis on the diameter of individual trees on the eastern region of the amazon using artificial neural networks. **Forest Ecology and Management**, v. 382, p. 161-167, 2016.

REIS, L. P.; REIS, P. C. M.; RUSCHEL, A. R.; SILVA, J. N.M.; CARVALHO, J. O. P.; SOUZA, A. L.; SOARES, M. H. M.; MIYAHARA, R. K. N. Forest dynamics in the eastern Amazon with special reference to sapotaceae species. **Floresta**, v. 45, n. 3, p. 567-576, 2015.

REIS, L. P.; RUSCHEL, A. R.; COELHO, A. A.; DA LUZ, A. S.; MARTINS-DA-SILVA, R. C. V. Avaliação do potencial madeireiro na Floresta Nacional do Tapajós após 28 anos da exploração florestal. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 30, n. 64, p. 265, 2010.

REYES, G.; BROWN, S.; CHAPMAN, J.; LUGO, A. E. **Wood densities of tropical tree species**. New Orleans: USDA Forest Service, Southern Forest Experiment Station, 1992. 15 p.

RIBEIRO, J. E. L. da S.; HOPKINS, M. J. G.; VICENTINI, A.; SOTHERS, C. A.; COSTA, M. A. da S.; BRITO, J. M. de; SOUZA, M. A. D. de; MARTINS, L. H. P.; LOHMANN, L. G.; ASSUNÇÃO, P. A. C. L.; PEREIRA, E. da C.; SILVA, C. F. da; MESQUITA, M. R.; PROCOPIO, L. C. **Flora da reserva Ducke: guia de identificação das plantas vasculares de uma floresta de terra-firme na Amazônia Central**. Manaus: INPA, 1999. 800 p.

RICHARDS, F. J. A flexible growth function for empirical use. **Journal of experimental Botany**, v. 10, n. 2, p. 290-301, 1959.

SABOGAL, C.; ALMEIDA, E.; MARMILLOD, D.; CARVALHO, J. O. P. **Silvicultura na Amazônia Brasileira: avaliação de experiências e recomendações para implementação e melhoria dos sistemas**. Belém: CIFOR, 2006.

SANCHEZ, M.; DUIVENVOORDEN, J. F.; DUQUE, A.; MIRAÑA, P.; CAVELIER, J. A stem-based ethnobotanical quantification of potential rain forest use by Mirañas in NW Amazonia. **Ethnobotany Research and Applications**, v. 3, p. 215-230, 2005.

SANTANA, A. C. D.; SANTOS, M. A. S. D.; SANTANA, Á. L. D.; YARED, J. A. G. O valor econômico da extração manejada de madeira no Baixo Amazonas, Estado do Pará. **Revista Árvore**, v. 36, p. 527-536, 2012.

SANTOS, E. **Nossas madeiras**. Belo Horizonte: Itatiaia, 1987. 313 p.

SCHIESTL-AALTO, P.; KULMALA, L.; MAKINEM, H.; NIKINMAA, E.; MAKELA, A. C. A dynamic model 568 for predicting intra-annual sink demand and interannual growth variation in Scots pine. **New Phytologist**, v. 206, n. 2, p. 647-659, 2015.

SCHÖNGART, J. (GOL): A new concept towards sustainable forest management in Central Amazonian várzea floodplains. **Forest Ecology and Management**, v. 256, n. 1-2, p. 46-58, 2008.

SCHÖNGART, J.; BRÄUNING, A.; BARBOSA, A. C. M. C.; LISI, C. S.; OLIVEIRA, J. M. D. Dendroecological studies in the neotropics: history, status and future challenges. **Dendroecology**, p. 35-73, 2017.

SCHÖNGART, J.; GRIBEL, R.; FERREIRA DA FONSECA-JUNIOR, S.; HAUGAASEN, T. Age and growth patterns of Brazil nut trees (*Bertholletia excelsa* Bonpl.) in Amazonia, Brazil. **Biotropica**, v. 47, n. 5, p. 550-558, 2015.

SCHÖNGART, J.; WITTMANN, F. Biomass and net primary production of central Amazonian floodplain forests. **Amazonian Floodplain Forests**, p. 347-388, 2010.

SCHULZE, M.; GROGAN, J.; LANDIS, R. M.; VIDAL, E. How rare is too rare to harvest? management challenges posed by timber species occurring at low densities in the Brazilian Amazon. **Forest ecology and management**, v. 256, n. 7, p. 1443-1457, 2008.

SCHWARTZ, G.; BAIS, A. L. S.; PEÑA-CLAROS, M.; HOOGSTRA-KLEIN, M. A.; MOHREN, G. M. J.; ARTS, B. J. M. Profitability of silvicultural treatments in logging gaps in the Brazilian Amazon. **Journal of Tropical Forest Science**, p. 68-78, 2016.

SCOLFORO, H. F.; SCOLFORO, J. R. S.; THIERSCH, C. R.; THIERSCH, M. F.; MCTAGUE, J. P.; BURKHART, H., FILHO, A. C. F.; MELO, J. M.; ROISE, J. A. new model of tropical tree diameter growth rate and its application to identify fast-growing native tree species. **Forest Ecology and Management**, v. 400, p. 578-586, 2017.

SILVA JÚNIOR, M.C., FELFILI, J.M., NOGUEIRA, P.E. & REZENDE, A.V. **Análise florística da mata de galeria no Distrito Federal**. In Cerrado: Matas de Galeria (J.F. Ribeiro, ed.). Embrapa-CPAC, Planaltina, 1998. p.53-93.

SILVA-LUZ, C. L. **Anacardiaceae R. Br. na flora fanerogâmica do Estado de São Paulo**. 94 f. Dissertação (Mestrado em Botânica) – USP, São Paulo, 2011.

SILVA-LUZ, C. L.; PIRANI, J. R. Anacardiaceae In: LISTA de Espécies da Flora do Brasil. Rio de Janeiro: Jardim Botânico do Rio de Janeiro, 2022. Disponível em: <http://floradobrasil.jbrj.gov.br/reflora/PrincipalUC/PrincipalUC.do>. Acesso em: 05 jun. 2022.

SILVA, J. N. M. 1996. Manejo florestal. Brasília, DF: EMBRAPA-SPI; Belém, PA: EMBRAPA-CPATU, 1996.

SILVA, J. N. M.; ARAÚJO, S. M. **Equação de volume para árvores de menor diâmetro na Floresta Nacional do Tapajós**, Belém, EMBRAPACPATU. Boletim de Pesquisa Florestal n.8/9, 1984a. 16-25p.

SILVA, J. N. M.; CARVALHO, J. O. P., LOPES, J. C. A.; CARVALHO, M. S. P. **Equação de volume para a Floresta Nacional do Tapajós**. Belém, EMBRAPACPATU. Boletim de Pesquisa Florestal 8/9, 1984b. 50-63p.

SILVA, J.N.M. **Possibilidades para a produção sustentada de madeira em floresta densa de terra-firme da Amazônia brasileira**. Curitiba: EMBRAPA-CNPFF, 1993. 42p. (EMBRAPA-CNPFF. Documentos, 23).

SILVA, R. P.; DOS SANTOS, J.; TRIBUZY, E. S.; CHAMBERS, J. Q.; NAKAMURA, S.; HIGUCHI, N. Diameter increment and growth patterns for individual tree growing in Central Amazon, Brazil. **Forest Ecology and Management**, v. 166, n. 1-3, p. 295-301, 2002.

SLEUMER, H. O. **Olacaceae**. New York: New York Botanical Garden, 1984. 159 p.

TERRA, M. D. C. N. S.; LIMA, M. G. B.; DOS SANTOS, J. D. P.; CORDEIRO, N. G.; PEREIRA, K. M. G.; DANTAS, D.; BOTELHO, S. A. Non-linear growth models for tree species used for forest restoration in Brazilian Amazon Arc of Deforestation. **Brazilian Journal of Forestry Research**. v. 42, p. 1-13, 2022.

TERRAZAS, T.; WENDT, T. Systematic wood anatomy of the genus *Tapirira* Aublet (Anacardiaceae) – a numerical approach. **Brittonia**, v. 47, n. 2, p.109-129, 1995.

TOMÉ, J. Age-independent difference equations for modelling tree and stand growth. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 36, n. 7, p. 1621-1630, 2006.

TONINI, H.; JUNIOR, O.; SCHWENGBER, D. Crescimento de espécies nativas da Amazônia submetidas ao plantio no estado de Roraima. **Ciência Florestal**, v. 18, n. 2, p. 151-158, 2008.

UMAÑA, C. L. A.; ALENCAR, J. C. Distribuições diamétricas da floresta tropical úmida em área no município de Itacoatiara – AM. **Acta Amazonica**, v.28, n.2, p.167-190, 1998.

VANCLAY, J. K. Modelling Forest growth and yield: applications to mixed tropical forests. **School of Environmental Science and Management Papers**, p. 537, 1994.

VELOSO, H. P.; RANGEL, A. L. R.; LIMA, J. C. A. **Classificação da vegetação brasileira, adaptada a um sistema universal**. IBGE, Rio de Janeiro, 1991.

VIEIRA, S.; TRUMBORE, S.; CAMARGO, P. B.; SELHORST, D.; CHAMBERS, J. Q.; HIGUCHI, N.; MARTINELLI, L. A. Slow growth rates of Amazonian trees: consequences for carbon cycling. **Proceedings of the National Academy of Sciences**, v. 102, n. 51, p. 18502-18507, 2005.

VON BERTALANFFY, L. A quantitative theory of organic growth (inquiries on growth laws. II). **Human biology**, v. 10, n. 2, p. 181-213, 1938.

WALLACH, D.; MAKOWSKI, D.; JONES, J. W.; BRUN, F. **Working with dynamic crop models: evaluation, analysis, parameterization, and applications**. Elsevier, 2006.

WEISKITTEL, A. R.; HANN, D. W.; KERSHAW JR, J. A.; VANCLAY, J. K. **Forest growth and yield modeling**. John Wiley & Sons, 2011.

WENK G.; ANTANAITIS V.; SMELKO S. **Forest growth and yield science**. Deutscher Landwirtschaftsverlag, Berlin, 1990.

WERNECK, M.S.; FRANCESCHINELLI, E.V.; TAMEIRÃO-NETO, E. Mudanças na florística e estrutura de uma floresta decídua durante um período de quatro anos (1994-1998), na região do Triângulo Mineiro, MG. **Revista Brasileira de Botânica**, v.23, n.4, p.401-413, 2000.

WOLFINGER, R. Covariance structure selection in general mixed models. **Communications in statistics-Simulation and computation**, v. 22, n. 4, p. 1079-1106, 1993.

WOODCOCK, D. W. Wood specific gravity of trees and forest types in the southern Peruvian Amazon. **Acta Amazonica**, v. 30, n. 4, p. 589-599, 2000.

YARED, J. A. G.; CARVALHO, J. O. P.; SILVA, J. N. M.; KANASHIRO, M.; MARQUES, L. C. T. **Contribuições do Projeto Silvicultura Tropical**: Cooperação Internacional Brasil/Reino Unido. Belém: Embrapa Amazônia Oriental, 2000. 28 p.

YARED, J. A. G.; SOUZA, A. L. Análise dos impactos ambientais do manejo de florestas tropicais. **Viçosa, MG: SIF**, 1993.

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

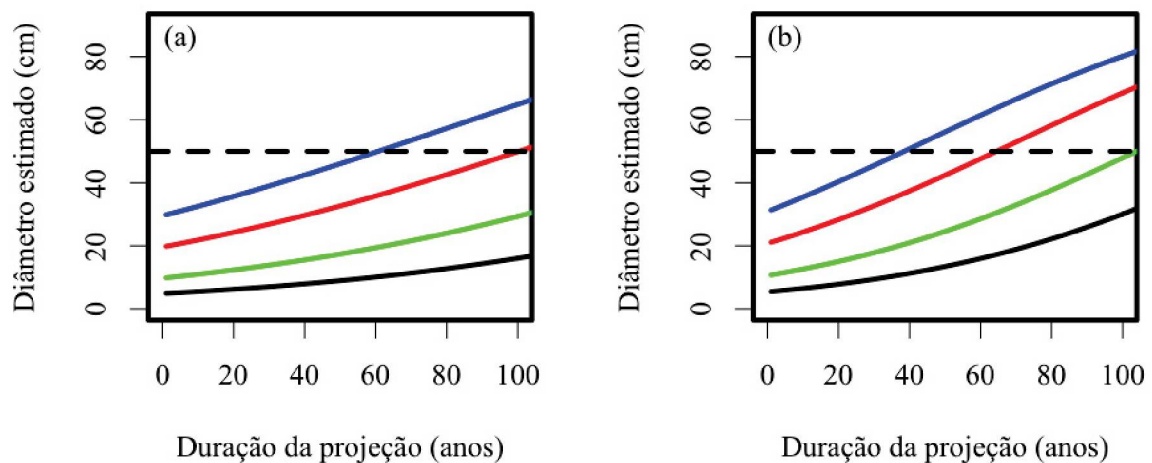
ANEXO 1 – MODELAGEM DE CRESCIMENTO DE TODAS AS ESPÉCIES

TABELA 9 – COEFICIENTES E ESTATÍSTICAS DE QUALIDADE DE AJUSTE DOS MODELOS DE CRESCIMENTO AJUSTADOS PARA TODAS AS ESPÉCIES E TRATAMENTO DO EXPERIMENTO NO KM 114 DA FLORESTA NACIONAL DO TAPAJÓS, PA.

Espécie	Modelo de crescimento	Trat.	Coeficientes do modelo				Estatística	
			A	K	m	c	RQME	R ²
Todas as espécies	Richards	t0	117,20	0,01	2,01		20,54	0,95
	Lundqvist-Korf	t0	182,40	0,01	-0,03		25,91	0,94
	Hossfeld IV	t0	204,90	1,03		190,20	20,57	0,95
	Richards	t1	106,20	0,02	1,99		12,65	0,98
	Lundqvist-Korf	t1	181,50	0,04	-0,02		17,69	0,97
	Hossfeld IV	t1	544,00	1,09		204,60	12,70	0,98

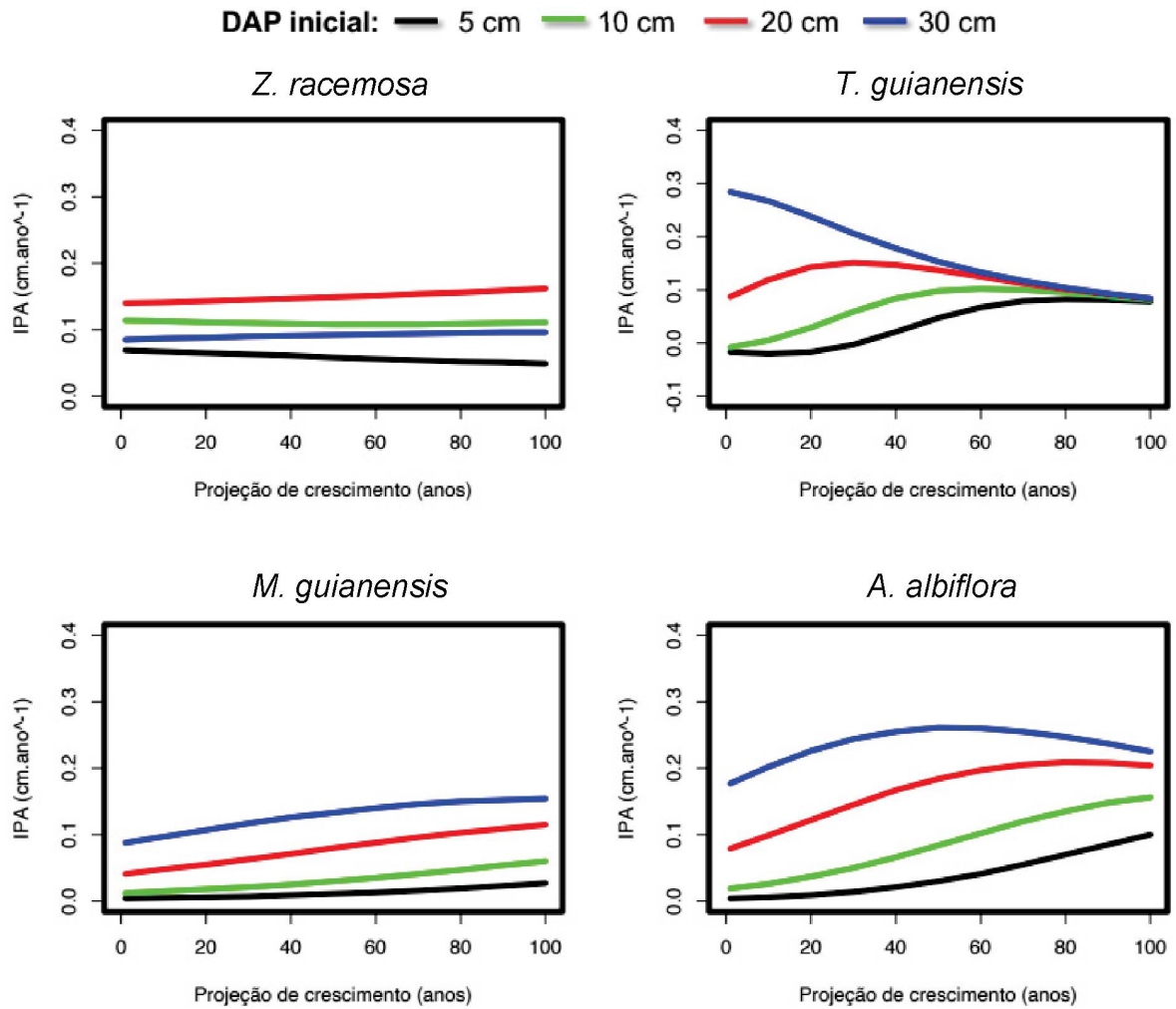
Fonte: A autora, 2022.

FIGURA 12 – CURVAS DE CRESCIMENTO DE DIÂMETRO DE TODAS AS ESPÉCIES NO EXPERIMENTO DO KM 114 NA FLONA DE TAPAJÓS, PA. (A) CONTROLE. (B) ÁREA MANEJADA. LINHA TRACEJADA PRETA: DIÂMETRO MÍNIMO DE CORTE DE 50 CM.



Fonte: A autora (2022).

FIGURA 13 – INCREMENTO PERIÓDICO ANUAL EXTRA (IPA EXTRA, CM.ANO⁻¹) EM DIÂMETRO FORNECIDO PELO TRATAMENTO DA ÁREA MANEJADA EM RELAÇÃO AO TRATAMENTO CONTROLE DO EXPERIMENTO NO KM 114 DA FLORESTA NACIONAL DO TAPAJÓS, PA., COM BASE NAS ESTIMATIVAS DO MC DE RICHARD.



Fonte: A autora (2022).

ANEXO 2 – EXEMPLO DE ROTEIRO EM LINGUAGEM ‘R’ PARA AJUSTES DOS MODELOS DE DISTRIBUIÇÃO DIAMÉTRICA DE *T. guianensis* EM 2012, NA ÁREA EXPERIMENTAL DA FLONA DE TAPAJÓS, PA.

```
setwd("~/dados_ufpr/fdp")
dados <- read.csv2('tapira_manejada2012.CSV', h = T)
dados <- dados[order(dados$d, decreasing = F),]
summary(dados)

##           n           d
## Min.      : 1.0     Min.      : 5.00
## 1st Qu.:19.5     1st Qu.: 7.80
## Median :38.0     Median : 9.80
## Mean    :38.0     Mean    :13.58
## 3rd Qu.:56.5     3rd Qu.:17.15
## Max.    :75.0     Max.    :41.70

hist(dados$d, breaks = seq(from = 5, to = 70, by = 10), ylim = c(0, 60),
xlim = c(0, 70))
```

Inserindo as classes:

```
classes <- data.frame(d = hist(dados$d, breaks = seq(from = 5, to = 80,
by = 10))$mid, f_abs = hist(dados$d, breaks = seq(from = 5, to = 80, by =
10))$count,
                      f_rel = hist(dados$d, breaks = seq(from = 5, to =
80, by = 10))$count/nrow(dados), dens = hist(dados$d, breaks = seq(from =
5, to = 80, by = 10))$density)

print(classes)

##      d f_abs      f_rel      dens
## 1 10     53 0.70666667 0.07066667
## 2 20     12 0.16000000 0.01600000
## 3 30      8 0.10666667 0.01066667
## 4 40      2 0.02666667 0.00266667
## 5 50      0 0.00000000 0.00000000
## 6 60      0 0.00000000 0.00000000
## 7 70      0 0.00000000 0.00000000

normal <- nls(dens ~ 1/(s*sqrt(2*pi))*exp(-0.5*((d-u)/s)^2),
              start = list(s = sd(dados$d), u = mean(dados$d)), data =
classes)

summary(normal)

##
## Formula: dens ~ 1/(s * sqrt(2 * pi)) * exp(-0.5 * ((d - u)/s)^2)
##
## Parameters:
##   Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## s    5.6523    0.4187  13.501 3.99e-05 ***
## u   10.3003    1.1502   8.955 0.00029 ***
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
```

```
##
## Residual standard error: 0.004848 on 5 degrees of freedom
##
## Number of iterations to convergence: 6
## Achieved convergence tolerance: 2.165e-06

new.data <- data.frame(d = seq(from = 5, to = 70, length = 100))

hist(dados$d, breaks = seq(from = 5, to = 80, by = 10), prob = T, ylim =
c(0, 0.08), xlim = c(0, 70), xlab = "diametro (cm)", ylab = "Densidade",
col = "darkgrey", main = 'Normal')
lines(new.data$d, predict(normal, newdata = new.data), col = 'red', lwd =
2)
```

```
f_acum_obs <- cumsum(hist(dados$d, breaks = seq(from = 5, to = 80, by =
10))$count)
```

```
f_acum_normal <- cumsum(fitted(normal)*10*nrow(dados))
D_normal <- max(abs(f_acum_normal - f_acum_obs))/nrow(dados)
D_tab <- 1.36/sqrt(nrow(dados))
if (D_normal <= D_tab) {
  print("Há aderência (Não significância)")
} else {
  print("Não há aderência (É significativo)")
}
```

```
## [1] "Há aderência (Não significância)"
```

```
lognormal <- nls(dens ~ 1/(d*(sqrt(2*pi*s^2)))*exp(-0.5*((log(d)-u)/s)^2),
start = list(s = 2.5, u = 0.16), data = classes)
```

```
summary(lognormal)
```

```
##
## Formula: dens ~ 1/(d * (sqrt(2 * pi * s^2))) * exp(-0.5 * ((log(d) -
u)/s)^2)
##
## Parameters:
##   Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## s -0.56972    0.02752  -20.7 4.87e-06 ***
## u  2.34833    0.08388   28.0 1.09e-06 ***
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 0.003172 on 5 degrees of freedom
##
## Number of iterations to convergence: 9
## Achieved convergence tolerance: 1.877e-06
```



```
hist(dados$d, breaks = seq(from = 5, to = 80, by = 10), prob = T, ylim =
c(0, 0.09), xlim = c(0, 70), xlab = "diámetro (cm)", ylab = "Densidade",
col = "darkgrey", main = 'Log-normal')
lines(new.data$d, predict(lognormal, newdata = new.data), col = 'red', lwd
= 2)
```

```
gama <- nls(dens ~ ((d^(a-1))*exp(-(d/b)))/((b^a)*gamma(a)),
start = list(a = 2, b = 4), data = classes)
```

```
summary(gama)
```

```
##
## Formula: dens ~ ((d^(a - 1)) * exp(-(d/b)))/((b^a) * gamma(a))
##
## Parameters:
## Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## a 3.3543 0.4538 7.392 0.000713 ***
## b 3.3447 0.3785 8.836 0.000308 ***
## ---
## Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 0.003994 on 5 degrees of freedom
##
## Number of iterations to convergence: 7
## Achieved convergence tolerance: 4.122e-06
```

```
hist(dados$d, breaks = seq(from = 5, to = 80, by = 10), prob = T, ylim =
c(0, 0.09), xlim = c(0, 80), xlab = "diámetro (cm)", ylab = "Densidade",
col = "darkgrey", main = 'Gama')
lines(new.data$d, predict(gama, newdata = new.data), col = 'red', lwd = 2)
```

```
beta <- nls(dens ~ (gamma(a+b)/(gamma(a)*gamma(b)))*(1/((70-5)^(a+b-1)))*
(d-5)^(a-1)*(70-d)^(b-1),
start = list(a = 1, b = 3.5), data = classes)
```

```
summary(beta)
```

```
##
## Formula: dens ~ (gamma(a + b)/(gamma(a) * gamma(b))) * (1/((70 - 5)^(a
+
## b - 1))) * (d - 5)^(a - 1) * (70 - d)^(b - 1)
##
## Parameters:
## Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## a 0.9574 0.1208 7.926 0.000515 ***
## b 7.9422 0.8615 9.219 0.000252 ***
## ---
## Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 0.003439 on 5 degrees of freedom
##
```

```
## Number of iterations to convergence: 8
## Achieved convergence tolerance: 4.412e-06

hist(dados$d, breaks = seq(from = 5, to = 80, by = 10), prob = T, ylim =
c(0, 0.09), xlim = c(0, 70), xlab = "Di?metro (cm)", ylab = "Densidade",
col = "darkgrey", main = 'Beta')
lines(new.data$d, predict(beta, newdata = new.data), col = 'red', lwd = 2)
```

```
library(minpack.lm)
```

```
weibull <- nlsLM(dens ~ (c/b)*(((d-a)/b)^(c-1))*exp(-((d-a)/b)^c),
start = list(a = 6, b = 6.5, c = 1), data = classes)
```

```
summary(weibull)
```

```
##
## Formula: dens ~ (c/b) * (((d - a)/b)^(c - 1)) * exp(-((d - a)/b)^c)
##
## Parameters:
## Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## a 6.9576 0.7739 8.990 0.000847 ***
## b 7.1851 1.3707 5.242 0.006332 **
## c 0.6707 0.1425 4.705 0.009272 **
## ---
## Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 0.002214 on 4 degrees of freedom
##
## Number of iterations to convergence: 10
## Achieved convergence tolerance: 1.49e-08
```

```
hist(dados$d, breaks = seq(from = 5, to = 80, by = 10), prob = T, ylim =
c(0, 0.095), xlim = c(0, 70), xlab = "Di?metro (cm)", ylab = "Densidade",
col = "darkgrey", main = 'Weibull 3P')
lines(new.data$d, predict(weibull, newdata = new.data), col = 'red', lwd =
2)
```

```
sb <- nlsLM(dens ~ (a*1/(sqrt(2*pi)*(d-e)*(1+e-d)))*
exp(-0.5*(y+a*(log((d-e)/(1-e-d))))^2),
start = list(e = 0 ,y =0.01, a =0.9, l = 80), data = classes)
```

```
summary(sb)
```

```
##
## Formula: dens ~ (a * 1/(sqrt(2 * pi) * (d - e) * (1 + e - d))) * exp(-
0.5 *
## (y + a * (log((d - e)/(1 - e - d))))^2)
##
## Parameters:
## Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
```

```
## e 6.5887 1.4820 4.446 0.0212 *
## y 1.4625 0.9593 1.525 0.2248
## a 0.5947 0.2409 2.468 0.0902 .
## l 76.5887 45.3027 1.691 0.1895
## ---
## Signif. codes: 0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 0.00235 on 3 degrees of freedom
##
## Number of iterations to convergence: 23
## Achieved convergence tolerance: 1.49e-08

hist(dados$d, breaks = seq(from = 5, to = 80, by = 10), prob = T, ylim =
c(0, 0.09), xlim = c(0, 70), xlab = "Di?metro (cm)", ylab = "Densidade",
col = "darkgrey", main = 'Sb de Johnson')
lines(new.data$d, predict(sb, newdata = new.data), col = 'red', lwd = 2)
```

```
AIC <- data.frame(Normal = AIC(normal), Lognormal = AIC(lognormal), Gama =
AIC(gama),
                 Beta = AIC(beta), Weibull = AIC(weibull), Sb_Johnson =
AIC(sb))
```

```
print(AIC)
```

```
##      Normal Lognormal      Gama      Beta  Weibull Sb_Johnson
## 1 -51.09871 -57.03924 -53.81078 -55.90614 -61.63243 -60.81395
```

```
BIC <- data.frame(Normal = BIC(normal), Lognormal = BIC(lognormal), Gama =
BIC(gama),
```

```
                 Beta = BIC(beta), Weibull = BIC(weibull), Sb_Johnson =
BIC(sb))
```

```
print(BIC)
```

```
##      Normal Lognormal      Gama      Beta  Weibull Sb_Johnson
## 1 -51.26098 -57.20151 -53.97305 -56.06841 -61.84879 -61.0844
```

```
par(cex = 1.5, lwd = 1)
```

```
lwd = 3
```

```
hist(dados$d, breaks = seq(from = 5, to = 60, by = 10), ylim = c(0, 58),
xlim = c(0, 70), xlab = "Centro de Classe (cm)", ylab = "Nº de ?rvores",
col = "darkgrey", main = ' ')
```

```
hist(dados$d, breaks = seq(from = 5, to = 60, by = 10), prob = T, ylim =
c(0, 0.08), xlim = c(0, 70), yaxt="n", xlab = "Centro de Classe (cm)",
ylab = "Nº de ?rvores", col = "darkgrey", main = ' ')
axis(2, at=seq(from=0, to=0.08, by = 0.02))
```

```
new.data <- data.frame(d = seq(from = 10, to = 60, length = 100))
```

```
lines(new.data$d, predict(normal, newdata = new.data), col = 'orange', lwd
= 5)
```

```
lines(new.data$d, predict(lognormal, newdata = new.data), col = 'black',
```

```
lwd = 5)
lines(new.data$d, predict(gama, newdata = new.data), col = 'magenta', lwd
= 5)
lines(new.data$d, predict(beta, newdata = new.data), col = 'green', lwd =
5)
lines(new.data$d, predict(weibull, newdata = new.data), col = 'blue', lwd
= 5)
lines(new.data$d, predict(sb, newdata = new.data), col = 'red', lwd = 5)

legend("topright", c("Normal", "Lognormal", "Gama", "Beta", "Weibull",
"Sb"),
      lty = c(1,1),
      col = c("orange", "black", "magenta", "green", "blue", "red"), lwd =
3)
```


**ANEXO 3 – EXEMPLO DE ROTEIRO EM LINGUAGEM ‘R’ PARA AJUSTES DOS
MODELOS DE CRESCIMENTO COM IDADE IMPLÍCITA DA ESPÉCIE *Z.
racemosa* NA ÁREA EXPERIMENTAL MANEJADA DA FLONA DE TAPAJÓS, PA.**

O roteiro é apresentado a seguir:

Inserindo as variáveis (“yt”, “y_a” e “a”) que serão utilizadas no ajuste do crescimento de *Zygia racemosa* da área manejada.

```
setwd("~/dados_ufpr")
dados1 <- read.csv2('zygia_manejada.CSV', h = T)
summary(dados1)
```

##	yt	y_a	a
## Min.	: 5.000	Min. : 5.40	Min. : 2.00
## 1st Qu.:	6.225	1st Qu.: 8.60	1st Qu.: 6.00
## Median :	8.100	Median :11.15	Median : 8.00
## Mean :	10.632	Mean :13.58	Mean :13.77
## 3rd Qu.:	10.400	3rd Qu.:15.47	3rd Qu.:22.00
## Max.	:35.800	Max. :37.50	Max. :31.00

Ajuste do modelo de Richards utilizando o comando “nls”.

```
library(minpack.lm)
richard1 = nls(y_a ~ A * (1 - (exp(-k*a)) * (1 - (yt/A)^(1 - m))))^(1/1 - m), data =
dados1, algorithm = 'port',
      start = list(A = 30, k = 0.04, m = 1.5),
      upper = list(A = 50, k = 0.08, m = 2),
      lower = list(A = 20, k = 0.013, m = -.6),
      control=nls.control(maxiter = 1000, minFactor=.5^40))
summary(richard1)
```

```
##
## Formula: y_a ~ A * (1 - (exp(-k * a)) * (1 - (yt/A)^(1 - m))))^(1/1 - m)
##
## Parameters:
##   Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## A 35.880452  1.770648  20.26  <2e-16 ***
## k  0.025494  0.001943  13.12  <2e-16 ***
## m  1.977501  0.008800  224.71  <2e-16 ***
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 2.059 on 251 degrees of freedom
##
## Algorithm "port", convergence message: relative convergence (4)
```

Ajuste do modelo de Lundqvist-Korf utilizando o comando “nls”.

```
lunq2 = nls(y_a ~ A * exp(-k/((-k/log(yt/A))^(1/m)+a)^m), data =
dados1, algorithm = 'port',
      start = list(A = 60, k = 1, m = 0.2),
      upper = list(A = 70, k = 3, m = 3),
      lower = list(A = 50, k = 0.013, m = -.6),
```

```

control=nls.control(maxiter = 1000, minFactor=.5^40))
summary(lunq2 )

##
## Formula: y_a ~ A * exp(-k/((-k/log(yt/A))^(1/m) + a)^m)
##
## Parameters:
##   Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## A  50.0000    112.6190   0.444  0.65744
## k   3.0000     0.9211   3.257  0.00128 **
## m   0.2210     0.3831   0.577  0.56460
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 2.465 on 251 degrees of freedom
##
## Algorithm "port", convergence message: both X-convergence and relative
convergence (5)

```

Ajuste do modelo de Hossfeld IV utilizando o comando “nlsLM”.

```

Hossfeld3 = nlsLM(y_a ~ A * (((c*yt/A-yt)+a)^k/(c+(((c*yt/A-yt)^1/k)
+a)^k)), data = dados1,
              start = list(A = 1, k = 1, c = 100),
              algorithm = 'port')
summary(Hossfeld3)

##
## Formula: y_a ~ A * (((c * yt/A - yt) + a)^k/(c + (((c * yt/A - yt)^1/k)
+
##   a)^k))
##
## Parameters:
##   Estimate Std. Error t value Pr(>|t|)
## A 1.914e+02  4.611e+01   4.150 4.55e-05 ***
## k 1.066e+00  6.236e-03 170.890 < 2e-16 ***
## c 1.192e+03  2.587e+02   4.607 6.51e-06 ***
## ---
## Signif. codes:  0 '***' 0.001 '**' 0.01 '*' 0.05 '.' 0.1 ' ' 1
##
## Residual standard error: 2.007 on 251 degrees of freedom
##
## Algorithm "port", convergence message: Relative error in the sum of
squares is at most `ftol'.

```

Como todas as estatísticas de ajuste o modelo de Richard foi superior, optou-se por utilizar apenas este (Richard). Aqui está o roteiro da estatística de ajuste “R² e RQME” utilizado para Richard.

```

r2 <- (cor(predict(richard1), dados1$y_a))^2 # pseudo-r2
syx <- summary(richard1)$sigma/mean(dados1$y_a)*100
r2

## [1] 0.9185306

```



```
syx
```

```
## [1] 15.15654
```

RQME também pode ser obtido pelo pacote (Metrics) através do comando "rmse".

```
library(Metrics)
```

```
rmse(dados1$y_a, predict(richard1))/mean(dados1$y_a)*100
```

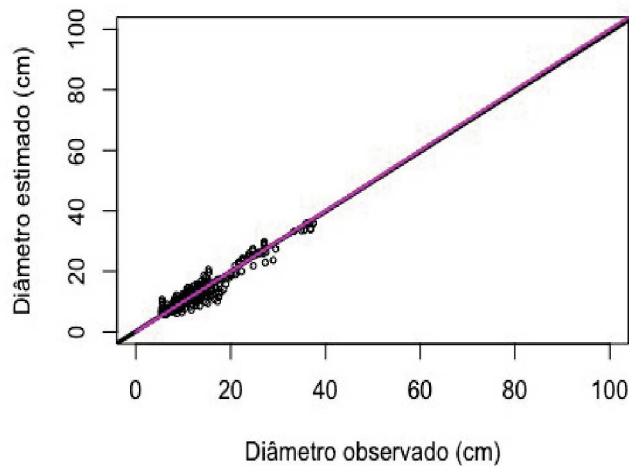
```
## [1] 15.06676
```

Relação entre os valores observados e estimados através do comando "lm".

```
reglin <- lm(dados1$y_a ~ predict(richard1))
```

Gráfico da relação dos valores observados e estimados.

```
plot(dados1$y_a, predict(richard1), cex = 0.55,
      ylab = "Diâmetro estimado (cm)", xlab = "Diâmetro observado (cm)",
      xlim = c(0,100), ylim = c(0,100))
abline(reglin, lwd = 3)
lines(c(0:150), c(0:150), col = "magenta", lwd = 2)
```



Construindo as curvas de crescimento de *Zygia racemosa*.

```
A1 <- coef(richard1)[1]
```

```
print(A1)
```

```
##          A
```

```
## 35.88045
```

```
a100 <- data.frame(a = seq(from = 1, to = 110, by = 1))
```

```
DAP5 <- coef(richard1)[1] * (1-(exp(-coef(richard1)[2]*a100$a))*
  (1-(5/coef(richard1)[1])^(1-coef(richard1)
  [3])))^(1/1-coef(richard1)[3])
```

```

DAP10 <- coef(richard1)[1] * (1-(exp(-coef(richard1)[2]*
                                a100$a))*(1-(10/coef(richard1)
[1])^(1-coef(richard1)[3])))^(1/1-coef(richard1)[3])
DAP20 <- coef(richard1)[1] * (1-(exp(-coef(richard1)[2]*
                                a100$a))*(1-(20/coef(richard1)
[1])^(1-coef(richard1)[3])))^(1/1-coef(richard1)[3])
DAP30 <- coef(richard1)[1] * (1-(exp(-coef(richard1)[2]*
                                a100$a))*(1-(30/coef(richard1)
[1])^(1-coef(richard1)[3])))^(1/1-coef(richard1)[3])

```

Gráfico da curva de crescimento.

```

par(lwd = "4")
plot(a100$a, DAP5, type = 'l',xlim = c(0,100), ylim = c(0,90), col =
"black", cex = 0.5,
     xlab= "Duração da projeção (anos)", ylab = "Diâmetro estimado (cm)")
lines(a100$a, DAP10, col = "green", lwd = "4")
lines(a100$a, DAP20, col = "red", lwd = "4")
lines(a100$a, DAP30, col="blue", lwd = "4")
abline(h=50, col = "black", lty = 2 , lwd = "4")

```

