



FLÁVIA MARQUES DE BRITO

**SISTEMA PREDITIVO PARA MULTIPRODUTOS DE
POVOAMENTOS DE *Tectona grandis* Linn. F., NO MATO
GROSSO – BRASIL**

**LAVRAS - MG
2026**

FLÁVIA MARQUES DE BRITO

SISTEMA PREDITIVO PARA MULTIPRODUTOS DE POVOAMENTOS DE *Tectona grandis* Linn. F., NO MATO GROSSO – BRASIL

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Manejo Florestal, para obtenção do título de Mestre.

Prof. Dr. Natalino Calegario
Orientador

Prof. Dr. Samuel José Silva Soares da Rocha
Coorientador

Prof. Dr. Samuel de Pádua Chaves e Carvalho
Coorientador

LAVRAS – MG

2026

**Ficha Catalográfica elaborada pelo Sistema de Geração
de Ficha Catalográfica da Biblioteca Universitária da UFLA, com
dados informados pelo(a) próprio(a) autor(a).**

Brito, Flávia Marques de.

Sistema preditivo para multiprodutos de povoamentos de *Tectona grandis* Linn.
f., no Mato grosso – Brasil / Flávia Marques de Brito. - 2026.

57 p. : il.

Orientador: Natalino Calegario

Coorientador: Samuel José Silva Soares da Rocha

Coorientador: Samuel de Pádua Chaves e Carvalho

Dissertação (Mestrado Acadêmico) - Universidade Federal de Lavras, 2026.

Bibliografia.

1. Teca. 2. Prognose volumétrica. 3. Estrutura diamétrica. 4. Plantio comercial.
I. Calegario, Natalino. II. Rocha, Samuel José Silva Soares da . III. Carvalho,
Samuel de Pádua Chaves e. IV. Universidade Federal de Lavras. V. Título.

FLÁVIA MARQUES DE BRITO

SISTEMA PREDITIVO PARA MULTIPRODUTOS DE POVOAMENTOS DE *Tectona grandis* Linn. F., NO MATO GROSSO – BRASIL

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Lavras, como parte das exigências do Programa de Pós-graduação em Engenharia Florestal, área de concentração em Manejo Florestal, para obtenção do título de Mestre.

APROVADA em 06 de fevereiro de 2026

Dr. Natalino Calegario – UFLA

Dr. Samuel José Silva Soares da Rocha – UFLA

Dr. Luiz Otávio Rodrigues Pinto – Eldorado
Brasil Celulose S.A.

Documento assinado digitalmente
 **NATALINO CALEGARIO**
Data: 13/04/2026 17:43:18-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Prof. Dr. Natalino Calegario
Orientador

Prof. Dr. Samuel José Silva Soares da Rocha
Coorientador

Prof. Dr. Samuel de Pádua Chaves e Carvalho
Coorientador

LAVRAS – MG

2026

AGRADECIMENTOS

Primeiramente a Deus, por guiar e abençoar minha trajetória, concedendo sabedoria e discernimento para realizar as melhores escolhas.

Agradeço também à minha família, na pessoa da minha mãe, Eva Marques de Brito, e do meu pai, José Afonso Almeida Brito, que nunca mediram esforços e embarcaram comigo em todas as minhas escolhas durante a graduação.

Às minhas irmãs, Evelyn Marques de Brito e Fátima Hellen Marques de Brito, que me acompanharam, me auxiliando e incentivando.

Ao meu orientador e aos meus coorientadores, pela orientação, apoio, paciência e pelos valiosos ensinamentos compartilhados ao longo deste trabalho, contribuindo de forma essencial para o meu crescimento acadêmico e profissional.

O presente trabalho foi realizado com apoio da Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – código de financiamento 001.

RESUMO

O manejo florestal de precisão de espécies de alto valor, como a *Tectona grandis*, demanda ferramentas robustas para prognose de crescimento e produção. Esta dissertação teve como objetivo principal desenvolver e avaliar um sistema preditivo para a estrutura diamétrica e o volume de multiprodutos em povoamentos clonais e seminais de *Tectona grandis*, no estado do Mato Grosso. O estudo testou a hipótese de que métodos de projeção paramétrica geram estimativas futuras precisas. A distribuição diamétrica foi modelada com a função densidade de probabilidade *Weibull* de dois parâmetros. Dois métodos de projeção foram comparados: Modelos de Estimativa dos Parâmetros (MEP), baseados em relações de regressão com variáveis do povoamento, e Modelos de Recuperação dos Parâmetros (MRP), que utilizam os momentos da distribuição. A base de dados, coletada entre 2006 e 2024, incluiu povoamentos submetidos a diferentes regimes de desbaste. Os resultados confirmaram a elevada aderência da função *Weibull*. A análise comparativa demonstrou a superioridade do método MEP, que apresentou menor viés e menores erros (MAE e MSE), provando-se mais preciso e estável para capturar a dinâmica estrutural pós-intervenção. Conclui-se que o sistema integrado, baseado no MEP e complementado por relações hipsométricas e de afilamento, constitui uma ferramenta confiável para a prognose do crescimento, produção de madeira por sortimento e apoio ao planejamento do manejo de *Tectona grandis* na região de estudo.

Palavras-chave: Teca; prognose volumétrica; estrutura diamétrica; plantio comercial.

ABSTRACT

Precision forest management of high-value species, such as *Tectona grandis*, requires robust tools for growth and yield forecasting. This dissertation aimed to develop and evaluate a predictive system for diameter distribution and multiproduct volume in clonal and seed-based plantations of *Tectona grandis* in the state of Mato Grosso, Brazil. The study tested the hypothesis that parametric projection methods provide accurate future estimates. Diameter distribution was modeled using a two-parameter Weibull probability density function. Two projection methods were compared: Parameter Estimation Models (PEM), based on regression relationships with stand variables, and Parameter Recovery Models (PRM), which rely on distribution moments. The dataset, collected between 2006 and 2024, included stands subjected to different thinning regimes. Results confirmed the high goodness-of-fit of the Weibull function. Comparative analysis demonstrated the superiority of the PEM method, which exhibited lower bias and reduced errors (MAE and MSE), proving more precise and stable in capturing post-intervention structural dynamics. It is concluded that the integrated system, based on PEM and complemented by height-diameter and taper relationships, constitutes a reliable tool for growth forecasting, wood production by assortments, and supporting the management planning of *Tectona grandis* in the study region.

Keywords: Teak; volume forecasting; diameter structure; commercial plantation; thinning regimes.

INDICADORES DE IMPACTO

O desenvolvimento de um sistema preditivo para a estrutura diamétrica e a volumetria de multiprodutos em povoamentos de *Tectona grandis* no estado do Mato Grosso gerou impactos tecnológicos, econômicos, ambientais e sociais, de forma direta e potencial. Do ponto de vista tecnológico, o trabalho consolidou uma abordagem robusta de prognose florestal baseada na função Weibull de dois parâmetros, evidenciando a superioridade dos Modelos de Estimativa dos Parâmetros (MEP) na representação da dinâmica estrutural pós-desbaste, o que amplia a confiabilidade das estimativas futuras. Economicamente, os resultados contribuem para a otimização do planejamento do manejo e da produção por sortimento, reduzindo incertezas na estimativa de volumes comerciais e apoiando a tomada de decisão em empreendimentos florestais. Ambientalmente, a aplicação do sistema favorece práticas de manejo mais eficientes e sustentáveis, promovendo o uso racional dos recursos florestais. Os impactos alcançam técnicos, estudantes, pesquisadores e gestores do setor florestal, com potencial de extensão junto a empresas e instituições de ensino. O trabalho enquadra-se nas áreas de Tecnologia e Produção, Meio Ambiente, Trabalho e Educação e está alinhado aos ODS 8, 9, 12, 13 e 15 da ONU.

IMPACT INDICATORS

The development of a predictive system for diameter structure and multiproduct volumetry in *Tectona grandis* stands in the state of Mato Grosso generated direct and potential technological, economic, environmental, and social impacts. From a technological standpoint, this work consolidated a robust forest forecasting approach based on the two-parameter Weibull function, highlighting the superiority of the Parameter Estimation Models (MEP) in representing post-thinning structural dynamics, thereby increasing the reliability of future estimates. Economically, the results contribute to the optimization of forest management and assortment-based production planning, reducing uncertainty in the estimation of commercial volumes and supporting decision-making in forestry enterprises. From an environmental perspective, the application of the system favors more efficient and sustainable management practices, promoting the rational use of forest resources. The impacts extend to technicians, students, researchers, and managers in the forestry sector, with potential for extension to companies and educational institutions. This work falls within the thematic areas of Technology and Production, Environment, Labor, and Education and is aligned with the United Nations Sustainable Development Goals 8, 9, 12, 13, and 15.

SUMÁRIO

PRIMEIRA PARTE	9
1. INTRODUÇÃO	9
2. REFERENCIAL TEÓRICO	10
2.1. A espécie <i>Tectona grandis</i> Linn. f.	10
2.2. Modelagem da distribuição diamétrica	14
2.3. Recuperação dos parâmetros.....	16
2.4. Sortimento florestal.....	18
REFERÊNCIAS.....	20
SEGUNDA PARTE – ARTIGO 1	29
1. INTRODUÇÃO	30
2. MATERIAL E MÉTODOS	31
2.1. Caracterização da área de estudo	31
2.2. Base de dados.....	32
2.3. Modelo de distribuição diamétrica.....	34
2.3.1. Função Weibull	34
2.3.2. Ajuste da função.....	34
2.4. Métodos de recuperação da distribuição diamétrica	35
2.4.1. Abordagem 1 – Estimativa dos Parâmetros (MEP)	35
2.4.2. Abordagem 2 – Recuperação dos parâmetros (MRP).....	36
2.4.3. Comparação entre os métodos	37
2.5. Estimativa da altura total no futuro.....	38
2.6. Sortimento.....	38
2.6.1. Sortimento de madeira	38
2.6.2. Equação de afilamento	39
2.6.3. Determinação do volume de cada produto.....	39
3. RESULTADOS.....	39
3.1. Estatística descritiva.....	39
3.2. Ajuste da Weibull.....	40
3.3. Recuperação da distribuição diamétrica.....	43
3.3.1. Abordagem 1	43
3.3.2. Abordagem 2	44
3.3.3. Comparação entre MEP e MRP	44
3.4. Ajuste das equações hipsométricas	46
3.5. Ajuste da equação de afilamento.....	48
4. DISCUSSÃO	48
4.1. Função densidade de probabilidade (pdf)	48
4.2. Comparação entre as abordagens (MEP e MRP).....	49
4.3. Volumetria de multiprodutos	50
5. CONCLUSÃO	53
REFERÊNCIAS.....	53
TERCEIRA PARTE – CONSIDERAÇÕES FINAIS	57

PRIMEIRA PARTE

1. INTRODUÇÃO

É imprescindível que a modelagem do crescimento e produção dos povoamentos florestais seja realizada de forma assertiva para subsidiar o planejamento e a gestão das atividades do setor. Dessa forma, a modelagem à nível de distribuição diamétrica surge como ferramenta essencial para compreender a estrutura dos povoamentos através do uso de modelos probabilísticos (MADI et al., 2017). Esse procedimento é realizado com base no ajuste de uma função de densidade de probabilidade (pdf), capaz de descrever o comportamento atual e futuro de um povoamento (CAMPOS; LEITE, 2017).

Na atualidade, é evidenciada a preocupação em aumentar a produtividade dos plantios. Neste contexto, os tratamentos silviculturais, principalmente o desbaste, são consideradas atividades indispensáveis para impulsionar o incremento na produtividade e qualidade das árvores remanescentes em povoamento de *Tectona grandis* (DAMÁSIO et al., 2015). Assim, estudos relatam que, em casos que são aplicados o desbaste, a modelagem da distribuição diamétrica é a mais adequada dentre os outros modelos de crescimento e produção (MADI et al., 2017).

A função Weibull de dois parâmetros continua entre as mais utilizadas e eficientes para modelar distribuições diamétricas em povoamentos florestais, especialmente em áreas manejadas, devido à sua flexibilidade e simplicidade (SCHMIDT et al., 2020; MAURO et al., 2021). No contexto de projeção, dois métodos se destacam: os Modelos de Estimativa dos Parâmetros (MEP) e os Modelos de Recuperação dos Parâmetros (MRP). No MEP, os parâmetros da função são correlacionados e modelados diretamente em função de variáveis do povoamento, permitindo captar mudanças estruturais ao longo do tempo (MIRANDA et al., 2018). Já o MRP utiliza momentos estatísticos para recuperar os parâmetros de forma indireta (BURK; NEWBERRY, 1984; SCHMIDT et al., 2020; MAURO et al., 2021).

Apesar do arcabouço metodológico consolidado, a aplicação comparativa e a validação desses métodos em povoamentos manejados, como a *Tectona grandis* Linn. f., ainda são incipientes. A espécie destaca-se como de grande relevância econômica global, com sua madeira representando cerca de 10% do valor das importações de madeira tropical não conífera, devido a suas qualidades distintivas de cor, durabilidade e propriedades físico-mecânicas (MESQUITA; GONÇALEZ; PAULA, 2017; KOLLERT; SANDEEP; SREELAKSHMY, 2024).

Os plantios comerciais de *Tectona grandis* tem diversificado sua produção para atender a demanda do mercado por madeira serrada, laminados, cavaco, entre outros produtos. Na produção florestal que considera múltiplos produtos, principalmente a produção de

madeira serrada, a finalidade principal gira em torno da redução do desperdício e da maximização da produção das peças que apresenta o maior valor agregado. Nesse contexto, a modelagem do afilamento do fuste surge como estratégia para a extração de informações confiáveis a respeito dos produtos florestais (MACFARLANE; WEISKITTEL, 2016).

Conforme exposto, verifica-se uma lacuna no que se refere a estudos que: i) comparem sistematicamente a acurácia dos métodos MEP e MRP na projeção da distribuição diamétrica de povoamentos desbastados de *Tectona grandis*; e ii) integrem esses métodos de projeção a sistemas de afilamento para estimar de forma confiável a produção futura por multiproduto, a nível de classe diamétrica.

Portanto, o objetivo deste trabalho foi comparar o desempenho dos métodos MEP e MRP e, a partir do melhor deles, propor um sistema preditivo integrado para estimar a distribuição diamétrica futura e a produção de madeira serrada por produto em povoamentos de *Tectona grandis* localizados no estado do Mato Grosso, Brasil.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1. A espécie *Tectona grandis* Linn. f.

A *Tectona grandis* Linn. f., nativa da Índia e dos países do Sudeste Asiático, pertence à família Lamiaceae (Verbenaceae) e é popularmente conhecida como teca (RAHMAN; GOSWAMI; CHOUDHURY, 2022; IRINMWINUWA et al., 2023). A espécie pertence ao grupo de árvores caducifólias e pioneiras, podendo alcançar uma altura de mais de 30 metros em condições favoráveis, caracterizadas por apresentar tronco reto de coloração marrom clara, com casca fissurada e áspera de cerca 1,2 mm de espessura (PANDEY; BROWN, 2000; QUEIROGA et al., 2024). Estudos apontam que as árvores desta espécie apresentam alta resistência a ataques de cupins e às alterações nas condições de solo e clima (KUSBACH et al., 2021; IRINMWINUWA et al., 2023).

Dessa forma, a espécie passou a ser conhecida mundialmente devido a homogeneidade e qualidade da sua madeira, destacando-se pelas suas notáveis características estéticas, físicas e mecânicas, principalmente beleza, resistência, elasticidade e durabilidade (SEGURA et al., 2020; IRINMWINUWA et al., 2023, MARTHA et al., 2024). Historicamente, a madeira de características nobres é utilizada para produção de móveis, barcos, decorações, armações de alta qualidade, construção naval, laminação e compensados (LIMA et al., 2021).

O alto valor agregado e a alta demanda no mercado mundial foram também alguns dos fatores que contribuíram para a crescente popularidade da madeira dessa espécie. Além disso, sua recomendação em diversos casos voltados para a geração de renda de forma relativamente

rápida impulsionou ainda mais sua notoriedade. Isso se deve à significativa redução no período de rotação da espécie, que passou de 80-100 anos para apenas 20-25 anos em determinados países (RADÍO; DELGADO, 2014; HUY; TRI; TRIET, 2018; HUY et al., 2022).

O gênero *Tectona* sp. apresenta elevada variabilidade genética entre indivíduos e populações além de fácil propagação, devido a esses aspectos este dispõe de grande capacidade adaptativa a condições edafoclimáticas e resistência considerável ao ataque de pagas e doenças (REIS; OLIVEIRA; SANTOS, 2023). Em razão disso, a espécie dispõe de um momento caracterizado por ampliação dos plantios, com o mercado aquecido por investidores, devido a influência direta da potencialidade produtiva e da boa forma dos fustes, aliado também ao valor agregado da madeira no mercado (KOLLERT; WALOTEK, 2015; REIS; OLIVEIRA; SANTOS, 2023).

Dentro do mercado global de comercialização de *Tectona grandis*, a proporção de cerne é um importante fator influente no preço, como resultado a madeira é classificada em madeira de florestas naturais e cultivadas (MIDGLEY et al., 2015). Entre as duas classificações, as diferenças começam a ser observadas externamente, onde o fuste das árvores de florestas nativas apresenta aumento considerável no diâmetro e cloração da madeira mais escura quando comparada a florestas plantadas (MIDGLEY et al., 2015). Além disso, apesar das florestas plantadas apresentarem ciclo de rotação mais curto, nestas são observadas uma maior proporção de madeira jovem e baixa proporção de cerne (MARTHA et al. 2021). Essas características de árvores plantadas são menos desejáveis, porém não se observa diferenças significativas com relação as propriedades mecânicas em comparação com madeira de ciclo longo (MOYA; BOND; QUESADA, 2014; RIZANTI et al. 2018).

As florestas nativas da espécie distribuídas na Índia, Laos, Mianmar e Tailândia, combinadas totalizam 30,2 milhões de hectares, onde destes mais da metade delas crescendo em Mianmar (KOLLERT; SANDEEP; SREELAKSHMY, 2024). Apesar do elevado montante, a legislação vigente nestes referidos países não permite a extração de madeira em florestas naturais de *Tectona grandis*. Isto causou um aumento acentuado no preço da venda da espécie e levou à expansão da área plantada na América Latina e na África (MIDGLEY et al., 2015; YASODHA et al., 2018; KOLLERT; SANDEEP; SREELAKSHMY, 2024).

Com a redução da exploração de florestas naturais, as florestas plantadas emergem como uma alternativa sustentável para a produção de madeira. No ano de 2022, a área coberta por florestas plantadas de *Tectona grandis* no mundo, dentro e fora de onde crescem naturalmente, era de aproximadamente 4,9 milhões de hectares, distribuída em cerca de 51

países, dos quais a maior parte era encontrada na Ásia (80%), seguida da África (13%) e da América Latina (7%) (KOLLERT; SANDEEP; SREELAKSHMY, 2024). Os três países mais influentes nesse montante total de florestas são a Índia, com 1,7 milhões de hectares (35% do total), a Indonésia, com 1,3 milhões de hectares (26%), e o Mianmar, com 0,4 milhões de hectares (10%) (KOLLERT; SANDEEP; SREELAKSHMY, 2024). Consequentemente, quando comprado com dados de 2010, os maiores aumentos relacionas a florestas plantadas da espécie foram observados na Ásia, África e América do Sul com acréscimo de, respectivamente, 261, 156 e 57 mil hectares (KOLLERT; SANDEEP; SREELAKSHMY, 2024).

No Brasil, a produção comercial *Tectona grandis* iniciou-se no estado do Mato Grosso na década de 1960, porém o cultivo foi logo disseminado para outros estados (QUEIROZ et al., 2021). Atualmente, o país detém cerca de 83 mil hectares de florestas da espécie, localizadas principalmente Mato Grosso, Pará, Rondônia, Acre, Goiás, Minas Gerais, dentre outros, e destaca-se por apresentar uma das maiores áreas plantadas na América Latina (SANTOS et al., 2023; IBÁ, 2025; KOLLERT; SANDEEP; SREELAKSHMY, 2024). A boa aderência nessas regiões deu-se em decorrência das características de temperatura média acima de 22° C, precipitação média anual entre 1.500 a 2.500 mm, estação seca variando de 3 a 5 meses durante o ano, fertilidade mediana e solos profundos (DRESCHER et al., 2014; HUY et al., 2022).

Os primeiros plantios estabelecidos no país eram constituídos via propagação seminal de material coletado em árvores originárias de Tenasserim (Myanmar), cultivadas em Trinidad e Tobago (MURILLO et al. 2013). Até meados dos anos 2000, a maioria das florestas de *Tectona grandis* era constituídas por meio de propagação seminal. Apenas a partir de 2003, com a introdução de clones do programa de melhoramento de Sabah, na Malásia, é que começaram a ser estabelecidas os primeiros plantios clonais (MURILLO et al., 2013; QUEIROZ et al., 2021).

A *Tectona grandis* é a quarta espécie mais cultivada no Brasil, sua produção tem se concentrado, tradicionalmente, no sistema de monocultura (IBÁ, 2025; REIS; OLIVEIRA; SANTOS, 2023). A espécie destaca-se no país por apresentar produtividade acima da média mundial, com incremento médio anual (IMA) variando entre 9-15 m³ ha⁻¹ ano⁻¹, resultado principalmente ao uso de clones de elevado desempenho e ao avanço de técnicas silviculturais de manejo (REIS; OLIVEIRA; SANTOS, 2023). Os mesmos autores enfatizam que, com a introdução de plantios clonais, a projeção da rotação em povoamentos bem manejados no Brasil atualmente é de 20 anos.

Assim, no Brasil, tanto a idade de rotação quanto a produtividade, revelam indicadores elevados para a expansão da produção da espécie quando comparado com outras regiões. Em 2022, o país destacou-se na lista dos principais países produtores de *Tectona grandis* a partir de florestas plantadas, onde os maiores volumes foram relatados na Indonésia, Brasil e Gana. Os três países que correspondem a 65% total de *Tectona grandis* colhida no mundo. (KOLLERT; SANDEEP; SREELAKSHMY, 2024).

Dados de 2022 mostram que o volume total global de exportações de madeira serrada da espécie foi relatado em 77 mil m³, responsável por movimentar 44,5 milhões de dólares em 39 países (KOLLERT; SANDEEP; SREELAKSHMY, 2024). Do montante total, o Brasil surge como um os cinco maiores exportadores, representado por 24% (18.365 mil m³) do volume total, ficando atrás apenas de Cingapura em que as negociações ultrapassam 29 mil m³, (REIS; OLIVEIRA; SANTOS, 2023). Este fator é resultado também da restrição de exploração imposta ao Mianmar, antes considerado o maior exportador, que perdeu sua posição de líder caindo para terceiro maior exportador de madeira serrada (KOLLERT; SANDEEP; SREELAKSHMY, 2024).

Já é de conhecimento que a qualidade da madeira influencia diretamente no preço das toras. Portanto, é necessário que seja aplicado o manejo adequado para a cultura da *Tectona grandis*, principalmente com a adoção de práticas silviculturais como o desbaste (TEWARI; SINGH, 2018; SOUZA et al., 2022). Estudos revelam que o desbaste resulta em mudanças relevantes no crescimento dos povoamentos da espécie e pode ocasionar impactos importantes em serviços ecossistêmicos, como a produção de água (SINACORE et al., 2019; SETA et al., 2021). Outras práticas indispensáveis para adoção nestes povoamentos é o espaçamento inicial adequado, o controle de plantas daninhas e a poda (KOLLERT; KLEINE, 2017; PACHAS et al., 2019; SOUZA et al., 2021).

A implementação de técnicas modernas de silvicultura e manejo, além do desenvolvimento de novos clones, são extremamente relevantes para fomentar o aumento na produção e produtividade dessas florestas e o fornecimento de madeira de alta qualidade (MIDGLEY et al., 2015; TONDJO et al., 2018). Desta forma, para contribuir com a tomada de decisão a respeito dos tratamentos silviculturais, é importante caracterizar o crescimento e a produção da *Tectona grandis*, visando reforçar a consolidação do cultivo no Brasil e, consequentemente, aumentar a produção a patamares competitivos com o mercado internacional (VENDRUSCOLO et al., 2019).

2.2. Modelagem da distribuição diamétrica

A modelagem do crescimento e produção de florestas é indispensável no setor florestal, pois auxilia no planejamento e intensidade do corte, na prescrição de regimes de manejo adequados, na análise da viabilidade econômica dos projetos florestais e na gestão de diversas atividades do setor (ABREU et al., 2002; BURKHART; TOMÉ, 2012; LIU et al. 2014; DUMOLLARD, 2022). Na literatura, esses modelos são comumente classificados em três níveis: árvore individual, distribuição diamétrica e populacional ou povoamento total (CLUTTER, et al., 1982; BURKHART; TOMÉ, 2012; CAMPOS; LEITE, 2017; OU; LEI; SHEN, 2019).

De acordo com Ige e Hussein (2024), historicamente, os modelos de distribuição diamétrica foram construídos com a finalidade de entender como as mudanças estruturais nos povoamentos acontecem ao longo do tempo, sendo projetados para explicar as variações a nível de diâmetro e determinar a porcentagem de árvores do plantio que se enquadram em cada classe. Assim, a estrutura diamétrica consiste em uma característica importante do povoamento, possibilitando a avaliação do crescimento, produção em volume, estabilidade, maturidade e sortimento de madeira (GORGOSO-VARELA; ROJO-ALBORECA, 2014).

Os modelos que se concentram na modelagem por distribuição diamétrica destacam-se não apenas por determinar a estrutura do povoamento, mas também são capazes de estimar o número de árvores presentes em cada classe de diâmetro em idades correntes e futuras (VENDRUSCOLO et al., 2020). Para a estimativa dessas características, faz-se uso de uma função de densidade de probabilidade (pdf), ou sua forma cumulativa (CDF), que pode ser ajustada às distribuições de diâmetro (à altura do peito - DAP) ou ao volume individual de árvores do povoamento (PALAHÍ et al., 2007; CAO et al., 2019; GORGOSO-VARELA; ADEDAPO; OGANA, 2024).

Nesse contexto, em povoamentos submetidos a desbastes, a modelagem da distribuição diamétrica torna-se ainda mais relevante, uma vez que essas intervenções alteram diretamente a densidade do povoamento, a competição entre indivíduos e a disponibilidade de recursos, refletindo-se na redistribuição das árvores entre classes de diâmetro ao longo do tempo (PRETZSCH, 2009). Assim, modelos de crescimento e produção capazes de incorporar essas mudanças estruturais permitem avaliar diferentes regimes de manejo e seus efeitos sobre a dinâmica e a produtividade do povoamento (BURKHART; TOMÉ, 2012).

As funções de densidade de probabilidade, comumente conhecidas como pdf (probability density function), quando associadas a variáveis estocásticas, tais como o diâmetro à altura do peito (DAP), altura total das árvores, área basal e volume individual,

possibilitam a recuperação do comportamento atual e a projeção futura da distribuição do DAP em classes de diâmetros preestabelecidas (ARAÚJO JUNIOR et al., 2013, CAMPOS; LEITE, 2017). Essa função determina a probabilidade atribuída a cada variável modelada, podendo descrever a distribuição da frequência relativa e/ou acumulada das várias classes de diâmetro de um povoamento (CAMPOS; LEITE, 2006).

A lista de funções de densidade usadas para descrever a frequência de fustes de árvores em povoamentos florestais é vasta e diversificada, como a função Beta (ZÖHRER, 1969; GORGOSO-VARELA; OGANA; IGE, 2020), Gamma (NELSON, 1964; PODLASKI, 2008; IGE; ADEDAPO, 2021), Normal (BLISS; REINKER, 1964; SGHAIER et al., 2016), SB de Johnson (JOHNSON, 1949; FONSECA; MARQUES; PARRESOL, 2009; MATEUS; TOMÉ, 2011; LIMA; BATISTA; PRADO, 2015), Weibull (BAILEY; DELL, 1973; POGODA; OCHAŁ; ORZEŁ, 2019, ARIAS-RODIL et al., 2018; GORGOSO-VARELA; OGANA; IGE, 2020), distribuição Dagum (LINDSAY; WOOD; WOOLLONS, 1996), entre outras.

As funções Weibull, Gamma, Beta e SB de Johnson, apesar de mais antigas na literatura relacionada a modelagem da distribuição de florestas, ainda são as mais usadas até o momento (GORGOSO-VARELA; OGANA; IGE, 2020). O ajuste dessas funções ocorre geralmente por métodos derivativos (momentos, percentis, moda e verossimilhança condicional) e/ou otimização numérica por máxima verossimilhança (LI; ZHANG; DAVIS, 2002; ZHANG; PACKARD; LIU, 2003; GORGOSO-VARELA et al., 2008; OGANA; OSHO; GORGOSO-VARELA, 2015; GORGOSO-VARELA; OGANA; IGE, 2020; IGE; ADEDAPO, 2021).

A vantagem do método derivativo está relacionada a sua simplicidade e facilidade de estimativa, sendo estas obtidas em detrimento das características do povoamento. Porém, quantificar a incerteza nas estimativas dos parâmetros surge como obstáculo do método (MATEUS; TOMÉ, 2011; SUN; CAO; CAO, 2019). Por outro lado, a incerteza na estimativa dos parâmetros pode ser facilmente obtida através da matriz hessiana pelo método de otimização (GORGOSO-VARELA; OGANA; IGE, 2020).

Desde a introdução no setor florestal da distribuição de Weibull, por Bailey e Dell (1973), ela tem sido amplamente utilizada devido sua relativa simplicidade na estimativa dos parâmetros, sua flexibilidade e sua forma funcional cumulativa fechada (BONČINA et al., 2022). Esta função é capaz de descrever uma ampla variedade de distribuições, indo desde a distribuição normal até a exponencial e J invertido (BAILEY; DELL, 1973).

O ajuste da função de distribuição de Weibull apresenta desempenho satisfatório, tanto por métodos derivativos de momentos quanto de otimização numérica de estimativa da máxima verossimilhança (GORGOSO-VARELA; ADEDAPO; OGANA, 2024). O método dos momentos estabelece uma relação entre os parâmetros da função e os dois primeiros momentos da distribuição de diâmetro observada, correspondendo ao diâmetro médio e à variância, respectivamente (BARRAZA et al., 2015; POGODA; OCHAŁ; ORZEŁ, 2019; MEHTÄTALO; LAPPI, 2020). Já o método de máxima verossimilhança estima parâmetros maximizando a probabilidade de obter uma amostra da distribuição teórica que coincide com a distribuição observada (SANQUETTA et al., 2014; CICEU; PITAR; BADEA, 2021).

Alguns trabalhos enfatizam e atestam a aderência da distribuição de Weibull à dados de povoamentos de *Tectona grandis*, como Binoti et al. (2011), Madi et al. (2017), Vendruscolo et al. (2020), Egonmwan e Ogana, (2020). Destes trabalhos, Binoti et al. (2011) e Egonmwan e Ogana, (2020) detalham o uso do método da máxima verossimilhança para estimativa dos parâmetros da distribuição de Weibull. Além disso, Araújo Júnior et al. (2010) detalham que o método é o mais adequado para ajustar a distribuição de Weibull, pois os procedimentos computacionais otimizam o processo de estimativa de parâmetros.

2.3. Recuperação dos parâmetros

Uma vez que as distribuições observadas de vários povoamentos, em condições diferentes, como idade, sítio, espaçamento, área basal, entre outros, são geradas por amostragem e os parâmetros estimados, é possível correlacionar e modelar os parâmetros com as características dos povoamentos e realizar estimativas da distribuição diamétrica usando modelos de predição, presente e futura. No primeiro caso, os parâmetros da distribuição são correlacionados com as variáveis do povoamento e modelados por meio de regressão linear e, ou, não linear, e este método é conhecido como método de predição ou estimativa dos parâmetros (MEP) (CLUTTER et al., 1983; KANGAS; MALTAMO, 2000). Já no segundo caso, um método conhecido como método de recuperação de parâmetros (MRP), os parâmetros são obtidos a partir da relação de variáveis do povoamento a percentis ou momentos da distribuição de diâmetros (BAILEY et al., 1982; CAO; BURKHART, 1984; NEWBY, 1980; BURK; NEWBERRY, 1984).

O MEP destaca-se por permitir incorporação direta de variáveis estruturais do povoamento estudado nos modelos de predição dos parâmetros da distribuição, o que reduz erros sistemáticos e melhora a representação das classes diamétricas. Estudos que avaliaram o uso de variáveis como altura dominante, diâmetro máximo e área basal, detalham um aumento

substantial na precisão dos parâmetros estimados, tornando assim o método mais sensível às mudanças estruturais nos povoamentos (MIRANDA et al., 2018). Resultados semelhantes foram observados em aplicações nas quais o MEP apresentou bom desempenho em diferentes espécies e condições de manejo, demonstrando boa aderência à distribuição observada e consistência com a dinâmica real do crescimento (SA; JIN; PUKKALA, 2023).

O MRP configura uma alternativa eficiente quando as estatísticas do povoamento modelado são confiáveis e facilmente obtidas, pois permite recuperar a forma da distribuição a partir de momentos como média, variância ou diâmetro quadrático médio (SHIFLEY; LENTZ, 1985; NANANG, 1998; GORGOSO et al., 2007). Na recuperação dos parâmetros pelo método dos momentos, são estabelecidas relações matemáticas diretas entres os momentos estatísticos da população e os parâmetros da função probabilística. Para a distribuição de Weibull de dois parâmetros, por exemplo, o diâmetro médio (d) e o diâmetro médio quadrático (dq) são igualados às suas expressões teóricas em função do parâmetro de escala (b) e do parâmetro de forma (c), formando um sistema que é resolvido iterativamente para b e c (NANANG, 1998; GORGOSO et al., 2007). Trabalhos confirmam que variação nas combinações dos momentos utilizados afetam diretamente a precisão dos parâmetros recuperados, o que destaca a importância de se conhecer a estrutura do povoamento modelado e de testar diferentes formulações e métodos (SCHMIDT et al., 2020; MAURO et al., 2021).

Em contrapartida, a recuperação também pode ser realizada pelo método dos percentis, onde parâmetros como os da distribuição são recuperados resolvendo-se um sistema de equações onde a função de distribuição acumulada, avaliada em percentis preditos, é igualada aos diâmetros correspondentes modelados a partir de variáveis do povoamento (CAO; BURKHART, 1984). A acurácia do método é altamente sensível à seleção dos percentis de entrada, sendo combinações como (d_0 , d_{90} , d_{95}) ou (d_{30} , d_{60} , d_{90}), em que a numeração subscrita representa os percentis da distribuição diamétrica, frequentemente testadas para otimizar a recuperação em diferentes contextos de manejo (BURK; NEWBERRY, 1984; POUDEL; CAO, 2013; MAURO et al., 2021). Em essência, tanto a via dos momentos quanto a dos percentis mantêm a parcimônia e eficiência computacional características do MRP, mas demandam cuidadosa especificação das estatísticas de entrada para garantir a fidelidade da distribuição recuperada (SCHMIDT et al., 2020).

A aplicabilidade dos métodos de recuperação dos parâmetros é estudada em diferentes espécies tropicais e plantadas. Em povoamentos de *Tectona grandis*, por exemplo, abordagens baseadas no MEP têm se mostrado mais adequadas para projeção da distribuição diamétrica, resultando em menores erros e melhor aderência aos dados observados (MAURO et al.,

2021). Por outro lado, pesquisas que aplicaram o MRP nessa mesma espécie, utilizando combinações de momentos e percentis, destacam que o método apresenta bom desempenho quando a estrutura do povoamento é estável e os momentos são bem estimados, embora sua sensibilidade à escolha das estatísticas de entrada exija cuidado adicional (GORGOSO et al., 2007).

Em gêneros plantados como *Eucalyptus* e *Pinus*, o MEP também tem se destacado por oferecer maior precisão preditiva em cenários de manejo variável e idades distintas (MIRANDA et al., 2018; SA; JIN; PUKKALA, 2023), enquanto o MRP tem sido preferido em estudos de projeções de longo prazo ou em povoamentos com séries históricas consolidadas, onde momentos populacionais são facilmente determinados (GORGOSO et al., 2007). Em síntese, evidências recentes indicam que o MEP tende a ser mais robusto em situações com maior complexidade estrutural, enquanto o MRP se mostra eficiente em condições de estabilidade do povoamento.

2.4. Sortimento florestal

As florestas plantadas são caracterizadas mundialmente como importantes fontes renováveis de matéria-prima para diversos seguimentos, desde o econômico e o ambiental até o social (NICOLETTI et al., 2020). No Brasil, a área coberta por florestas plantadas, no ano de 2024 totalizou cerca de 10,5 milhões de hectares (IBÁ, 2025). Assim, a multiplicidade de usos em que esses plantios revelam, permite ao produtor uma maior flexibilidade em relação a comercialização de produtos que apresentam precificação distintas no mercado (VIANA et al., 2021).

Em razão da multiplicidade de alguns plantios, surge o conceito de sortimento florestal. O termo é utilizado para distinguir a madeira em vários subprodutos de critérios específicos, como diâmetro, comprimento, qualidades e destino final. A estimativa do sortimento de madeira de um determinado povoamento é executada com o auxílio de uma função de afilamento (TERRA; ANDRADE; SILVA, 2020; HE; JIANG; LI, 2022). As funções de afilamento são capazes de expressar a taxa de decréscimo do diâmetro ao longo do fuste, possibilitando a estimativa do diâmetro, altura e volume em qualquer posição do fuste, além de estimar o volume total e comercial (BURKHART; TOMÉ, 2012; CAMPOS; LEITE, 2017; COELHO et al., 2023).

O afilamento do fuste desempenha papel fundamental no inventário florestal, na projeção do crescimento e no planejamento do manejo dos povoamentos, fornecendo inúmeras informações a nível de árvore individual, povoamento e floresta (SCOLFORO et al.,

2018; SALEKIN et al., 2021). Essas funções são essenciais para garantir que a conversão de madeira em multiprodutos, seja feita de forma otimizada e assertiva. Isso reflete no maior aproveitamento da matéria prima e menor geração de resíduo, garantindo, consequentemente, o maior rendimento e aproveitamento da produção (MARTINS et al., 2016; MARTINS et al., 2017; CAMPOS et al., 2017; SHAHZAD et al., 2021; SOUZA et al., 2023).

Na atualidade, existem diversos modelos capazes de descrever a forma do fuste das árvores e eles são comumente categorizados em três grupos: não segmentadas, segmentadas e de forma variável ou forma expoente (SOUZA et al., 2018; BONETE et al., 2020). Os modelos não segmentados descrevem o perfil do fuste da árvore com uma única função; os modelos segmentados dividem o caule em dois ou mais segmentos através de subfunções distintas que são matematicamente unidas por meio de pontos de inflexão; e os modelos de forma variável correspondem a uma função contínua em que as mudanças no formato do fuste nas distintas seções da árvore são compensadas pelo uso de um expoente variável (BONETE et al., 2020).

A modelagem das funções de afilamento em povoamentos de cultivo monocultura corresponde a um tema bastante difundido no setor florestal brasileiro (CERQUEIRA et al., 2021). É comum encontrar na literatura diversos trabalhos desenvolvidos a fim de representar o perfil do caule das espécies com maior importância econômica, como as do gênero *Eucalyptus* (CERQUEIRA et al., 2018; SOUZA et al., 2018; CERQUEIRA et al., 2021) e das espécies *Tectona grandis* (ROCHA et al., 2022) *Pinus taeda* (SANTOS et al., 2021; STEFANELLO et al., 2021) e *Araucaria angustifolia* (COSTA et al., 2016; SOUZA et al., 2020).

Compreender o afilamento e as variações do fuste de *Tectona grandis* é crucial, já que a madeira é amplamente comercializada e, em geral, utilizada para serraria, laminação e cavaco para geração de energia (SANTOS et al., 2023). Diante disso, o modelo selecionado deve apresentar flexibilidade adequada para manifestar o efeito do ambiente e das práticas silviculturais que afetam o incremento anual de madeira ao longo do caule, o volume total e a qualidade e quantidade de madeira presente nos povoamentos. Além disso, é indispensável investigar como a função se ajusta as variações de altura/diâmetro e formas do fuste (ROCHA et al., 2022).

São diversos os trabalhos que estudam funções de afilamento em povoamentos de *Tectona grandis*, destacando os desenvolvidos por Pelissari et al. (2017), Choochuen. Suksavate e Meunpong (2021), Koirala et al. (2021), Tavares Júnior et al. (2021), Oliveira et al. (2022), Rocha et al. (2022) e Madi et al. (2023). Os modelos utilizados são distintos entre

os trabalhos citados, enfatizando a importância de testar se a função apresenta aderência à base de dados.

REFERÊNCIAS

ABREU, E. C. R. et al. Modelagem para prognose precoce do volume por classe diamétrica para *Eucalyptus grandis*. **Scientia Forestalis**, n. 61, p. 86-102, 2002.

ARAÚJO JUNIOR, C. A. et al. Modelagem da distribuição diamétrica de povoamentos de eucalipto utilizando a função Gama. **Cerne**, v. 19, n. 2, p. 307-314, 2013.

ARAÚJO JÚNIOR, C. A. et al. Projeção da distribuição diamétrica de povoamentos de eucalipto em diferentes amplitudes de classe. **Pesquisa Agropecuária Brasileira**, v. 45, n. 11, p. 1275–1281, 2010.

ARIAS-RODIL, M. et al. Modeling diameter distributions in radiata pine plantations in Spain with existing countrywide LiDAR data. **Annals of forest science**, v. 75, p. 1-12, 2018.

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

BAILEY, R. L.; ABERNETHY, N. C.; JONES, E. P. Diameter distribution models for repeatedly thinned slash pine plantations. USDA Forest Service, General Technical Report SO-34, 1982.

BARRAZA, G. Q. et al. Dynamic modeling for diameter distribution on Pinus mixed stands in Durango, Mexico. **Madera y bosques**, v. 21, n. 2, p. 59-71, 2015.

BINOTI, D. H. B. et al. Eficiência das funções Weibull e hiperbólica para descrição de distribuições diamétricas de povoamentos de *Tectona grandis*. **Revista Árvore**, v. 35, p. 299-306, 2011.

BLISS, C. I.; REINKER, K. A. A lognormal approach to diameter distributions in even-aged stands. **Forest Science**, v. 10, n. 3, p. 350-360, 1964.

BONČINA, Z. et al. Evaluation of estimation methods for fitting the three-parameter Weibull distribution to European beech forests. **iForest: Biogeosciences and Forestry**, v. 15, n. 6, p. 484-490, 2022.

BONETE, I. P. et al. Artificial neural networks and mixed-effects modeling to describe the stem profile of *Pinus taeda* L. **FLORESTA**, v. 50, n. 1, p. 1123 - 1132, 2020.

BURK, T. E.; NEWBERRY, J. D. A simple algorithm for moment-based recovery of Weibull distribution parameters. **Forest Science**, v. 30, p. 329-332, 1984.

BURKHART, H. E.; TOMÉ, M. **Modeling Forest trees and stands**. 1. ed. Heidelberg: Springer Science & Business Media, 2012. 461 p.

CAMPOS J. C. C.; LEITE H. **Mensuração Florestal: perguntas e respostas**. 2. Ed. Vicosa, MG: UFV, 2006. 470 p.

CAMPOS, B. P. F. et al. Descrição do perfil do tronco de árvores em plantios de diferentes espécies por meio de redes neurais artificiais. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 37, n. 90, p. 99–107, 2017.

CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 4. ed. Viçosa: UFV, 2017. 605 p.

CAO, Q. V.; BURKHART, H. E. Percentile-based distributions characterize forest stand tables. **Forest Science**, v. 30, n. 3, p. 697-707, 1984.

CAO, L. et al. Estimating tree volume distributions in subtropical forests using airborne LiDAR data. **Remote Sensing**, v. 11 n. 1, p. 97, 2019.

CERQUEIRA, C. L. et al. Tapering functions for eucalyptus in an integration system for crop-livestock-forest. **Advances in Forestry Science**, v. 5, n. 4, p. 479-485, 2018.

CERQUEIRA C. L. et al. Modeling of eucalyptus tree stem taper in mixed production systems. **Scientia Forestali**, v. 49, n. 130, p. e3186, 2021.

CHOOCHUEN, T.; SUKSAVATE, W.; MEUNPONG, P. Development of a taper equation for teak (*Tectona grandis* Lf) growing in Western Thailand. **Environ. Nat. Resour. J**, v. 19, n. 3, p. 176-185, 2021.

CICEU, A.; PITAR, D.; BADEA, O. Modeling the diameter distribution of mixed uneven-aged stands in the south western Carpathians in Romania. **Forests**, v. 12, n. 7, p. 958, 2021.

CLUTTER, J. L. et al. **Timber management: a quantitative approach**. New York: John Wiley & Sons, 1983. 333 p.

COELHO, M. C. B. et al. Modelos De Afilamento E Sortimento De Madeira Em Povoamento Florestal de *Corymbia citriodora*. **Revista Contemporânea**, v. 3, n. 9, p. 14968-14996, 2023.

COSTA, E. A. et al. Taper function and timber assortments for *Araucaria angustifolia*. **Ciência Florestal**, v. 26, n. 2, p. 523-533, 2016.

DAMÁSIO M, et al. Desbaste seletivo em um povoamento de *Tectona grandis* implantado em sistema de integração-lavoura-pecuária-floresta. **Biodiversidade**, v. 14, n. 3, p. 74-83, 2015.

DRESCHER, R. et al. Equações volumétricas para *Tectona grandis* Linn F. em povoamentos jovens no estado de Mato Grosso. **Advances in Forestry Science**, v. 1, n. 2, p. 65-70, 2014.

DUMOLLARD, G. Exploring the Potential of Machine Learning for Modeling Growth Dynamics in an Uneven-Aged Forest at the Level of Diameter Classes: A Comparative Analysis of Two Modeling Approaches. **Forests**, v. 13, n. 9, p. 1432, 2022.

EGONMWAN, I. Y.; OGANA, F. N. Application of diameter distribution model for volume estimation in *Tectona grandis* Lf stands in the Oluwa forest reserve, Nigeria. **Tropical Plant Research**, v. 7, n. 3, p. 573-580, 2020.

FONSECA, T. F.; MARQUES, C. P.; PARRESOL, B. R. Describing Maritime pine diameter distributions with Johnson's sB distribution using a new all-parameter recovery approach. **Forest Science**, v. 55, n. 4, p. 367-373, 2009.

GORGOSO, J. J. et al. Modelling diameter distributions of *Betula alba* L. stands in northwest Spain with the two-parameter Weibull function. **Forest Systems**, v. 16, n. 2, p. 113-123, 2007.

GORGOSO-VARELA, J. J. et al. Modelling diameter distributions of birch (*Betula alba* L.) and Pedunculate oak (*Quercus robur* L.) stands in northwest Spain with the beta distribution. **Forest Systems**, v. 17, n. 3, p. 271-281, 2008.

GORGOSO-VARELA, J. J.; ADEDAPO, S. M.; OGANA, F. N. A Comparison of Probability Density Functions Fitted by Moments and Maximum Likelihood Estimation Methods Used for Diameter Distribution Estimation. **Forests**, v. 15, n. 3, p. 425, 2024.

GORGOSO-VARELA, J. J.; OGANA, F. N.; IGE, P. O. A comparison between derivative and numerical optimization methods used for diameter distribution estimation. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 35, n. 3-4, p. 156-164, 2020.

GORGOSO-VARELA, J. J.; ROJO-ALBORECA A. Short communication: A comparison of estimation methods for fitting Weibull and Johnson's SB functions to pedunculate oak (*Quercus robur*) and birch (*Betula pubescens*) stands in northwest Spain. **Forest Systems**, v. 23, n. 3, p. 500–505, 2014.

HE, P.; JIANG, L.; LI, F. Evaluation of parametric and non-parametric stem taper modeling approaches: A case study for *Betula platyphylla* in Northeast China. **Forest Ecology and Management**, v. 525, p. 120535, 2022.

HUY, B. et al. Stand growth modeling system for planted teak (*Tectona grandis* L. f.) in tropical highlands. **Trees, Forests and People**, v. 9, e100308, 2022.

HUY, B.; TRI, P. C.; TRIET, T. Assessment of enrichment planting of teak (*Tectona grandis*) in degraded dry deciduous dipterocarp forest in the Central Highlands, Vietnam. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, v. 80, n. 1, p. 75-84, 2018.

IBÁ. Relatório Anual 2025. Indústria Brasileira de Árvores, 2025. Disponível em: <https://iba.org/wp-content/uploads/2025/10/relatorioAnual2025.pdf>. Acesso em: 11 out de 2025.

IGE, P. O.; ADEDAPO, S. M. Modelling diameter distributions of *Nauclea diderrichii* (De Wild.) Merr. stands with Gamma and Weibull functions in Southwest Nigeria. **World Scientific News**, v. 160, p. 247-262, 2021.

IGE, P. O.; HUSSEIN, I. O. Modeling diameter distributions of recreational trees in Agodi Gardens, Ibadan, Nigeria. **45th Annual Conference of Forestry Association of Nigeria (FAN)**, v. 1, p. 37-47, 2024.

IRINMWINUWA, E. O. et al. A comprehensive review of phytochemistry and antibacterial action of *Tectona grandis*. **International Journal of Science and Research Archive**, v. 9, n. 2, p. 133-143, 2023.

JOHNSON, N. L. Systems of frequency curves generated by methods of translation. **Biometrika**, v. 36, n. 1/2, p. 149-176, 1949.

KANGAS, A.; MALTAMO, M. Calibrating predicted diameter distribution with additional information. **Forest Science, Bethesda**, v. 46, n. 3, p. 390-396, 2000.

KOIRALA, A. et al. Developing taper equations for planted teak (*Tectona grandis* Lf) trees of central lowland Nepal. **Trees, Forests and People**, v. 5, p. 100103, 2021.

KOLLERT, W.; KLEINE, M. The global teak study. Analysis, evaluation and future potential of teak resources. 2017.

KOLLERT, W.; SANDEEP, S.; SREELAKSHMY, M. P. Global Teak Resources and Market Assessment 2022. IUFRO World Series, v. 44, 92 p. Viena, 2024.

KOLLERT, W.; WALOTEK, P. J. Global teak trade in the aftermath of Myanmar's log export ban. Rome, Italy: FAO, 2015. 36 p. (FAO. Planted forests and trees working paper series, 49). Disponível em: <http://www.fao.org/3/a-i5023e.pdf>. Acesso em: 11 nov. 2024.

KUSBACH, A. et al. Site-specific approach to growth assessment and cultivation of teak (*Tectona grandis*) in Nicaraguan dry tropics. **Forest Ecology and Management**, v. 480, p. 118658, 2021.

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

LI, F.; ZHANG, L.; DAVIS, C. J. Modeling the joint distribution of tree diameters and heights by bivariate generalized beta distribution. **Forest Science**, v. 48, n. 1, p. 47-58, 2002.

LIMA, I. L. et al. Wood characterization of *Tectona grandis* LF cultivated in Brazil: a review of the last 30 years. **Research, Society and Development**, v. 10, n. 14, 2021.

LIMA, R. A. F.; BATISTA, J. L. F.; PRADO, P. I. Modeling tree diameter distributions in natural forests: an evaluation of 10 statistical models. **Forest Science**, v. 61, n. 2, p. 320-327, 2015.

LINDSAY, S. R.; WOOD, G. R.; WOOLLONS, R. C. Modelling the diameter distribution of forest stands using the Burr distribution. **Journal of applied statistics**, v. 23, n. 6, p. 609-620, 1996.

LIU, F. et al. Modeling diameter distributions of mixed-species forest stands. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 29, n. 7, p. 653-663, 2014.

MACFARLANE, D. W.; WEISKITTEL, A. R. A new method for capturing stem taper variation for trees of diverse morphological types. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 46, n. 6, p. 804-815, 2016.

MADI, J. P. S. et al. Univariate models to represent the diametric distribution of thinned stand of *Tectona grandis* Linn. F. **Advances in Forestry Science**, v. 4, n. 2, p. 119-123, 2017.

MADI, J. P. S. et al. Modelagem GAMLSS no afilamento de árvores de *Tectona grandis* Lf. **Advances in Forestry Science**, v. 10, n. 4, p. 2133-2143, 2023.

MARTHA, R. et al. Effect of furfurylation treatment on technological properties of short rotation teak wood. **Journal of Materials Research and Technology**, v. 12, p. 1689-1699, 2021.

MARTHA, R. et al. Surface Characteristics and Artificial Weathering Resistance of Oil-Based Coatings on the Chemically and Thermally Modified Short-Rotation Teak Wood. **Materials**, v. 17, n. 15, p. 3881, 2024.

MARTINS, A. P. M. et al. Efeito da idade na forma do fuste de *Araucaria angustifolia* na região Centro-Sul do Paraná. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 37, n. 90, p. 109-117, 2017.

MARTINS, E. R. et al. Configuração de redes neurais artificiais para estimação do afilamento do fuste de árvores de eucalipto. **Revista Brasileira de Ciências Agrárias**, v. 11, n. 1, p. 33-38, 2016.

MATEUS, A.; TOMÉ, M. Modelling the diameter distribution of eucalyptus plantations with Johnson's SB probability density function: parameters recovery from a compatible system of equations to predict stand variables. **Annals of Forest Science**, v. 68, p. 325-335, 2011.

MAURO, F. et al. Comparison of two parameter recovery methods for the transformation of *Pinus sylvestris* yield tables into a diameter distribution model. **Annals of Forest Science**, v. 78, 2021.

MEHTÄTALO, L.; LAPPI, J. *Biometry for Forestry and Environmental Data with Examples in R*, 2020. 411 p.

MESQUITA, R. R. S.; GONÇALEZ, J. C.; PAULA, M. H. Comportamento da madeira de *Tectona grandis* frente ao intemperismo. **Revista Floresta**, v. 47, n. 1, p. 29-35, 2017.

MIDGLEY, S. et al. Planted teak: global production and markets, with reference to Solomon Islands. Canberra, ACT: **Australian Centre for International Agricultural Research**, 2015. Disponível em: <http://nla.gov.au/nla.obj-270849106>. Acesso em: 29 nov. 2024.

MIRANDA, R. et al Prediction system for diameter distribution and wood production of *Eucalyptus*. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 25, n. 3, 2018.

MOYA, R.; BOND, B.; QUESADA, H. A review of heartwood properties of *Tectona grandis* trees from fast-growth plantations. **Wood Science and Technology**, v. 48, p. 411-433, 2014.

- MURILLO, O. et al. *Mejoramiento genético de la teca en América Latina*. 2013.
- NANANG, D. M. Suitability of the normal, log-normal and Weibull distributions for fitting diameter distributions of neem plantations in Northern Ghana. **Forest Ecology and Management**, v. 103, n. 1, p. 1-7, 1998.
- NELSON, T. C. Diameter distribution and growth of loblolly pine. **Forest Science**, v. 10, n. 1, p. 105-114, 1964.
- NEWBY, M. The properties of moment estimators for the Weibull distribution based on the sample coefficient of variation. **Technometrics**, v. 22, p. 187-194, 1980.
- NICOLETTI, M. F. et al. Bivariate and generalized models for taper stem representation and assortments production of loblolly pine (*Pinus taeda* L.). **Journal of Environmental Management**, v. 270, p. 110865, 2020.
- OGANA, F. N.; OSHO, J. S. A.; GORGOSO-VARELA, J. J. Comparison of beta, gamma and Weibull distributions for characterising tree diameter in Oluwa Forest Reserve, Ondo State, Nigeria. **J. Nat. Sci. Res**, v. 5, p. 28–36, 2015.
- OLIVEIRA, P. P. G. et al. Simulação da produção por sortimento de madeira em povoamentos de *Tectona grandis* L. na região norte do estado do Mato Grosso. **Ciência Florestal**, v. 32, n. 4, p. 2263-2287, 2022.
- OU, Q.; LEI, X.; SHEN, C. Individual tree diameter growth models of larch–spruce–fir mixed forests based on machine learning algorithms. **Forests**, v. 10, n. 2, p. 187, 2019.
- PACHAS, A. N. A. et al. Teak (*Tectona grandis*) silviculture and research: applications for smallholders in Lao PDR. **Australian Forestry**, v. 82, n. 1, p. 94–105, 2019.
- PALAHÍ M. et al. Comparison of beta, Johnson’s SB, Weibull and truncated Weibull functions for modelling the diameter distribution of forest stands in Catalonia (northeast of Spain). **Eur J For Res**, v. 126, p. 563–571, 2007.
- PANDEY, D.; BROWN, C. *Teak: a global overview*. **Unasylva**, v. 51, n. 201, p. 3–13, 2000.
- PELISSARI, A. L. et al. Geostatistical modeling of timber volume spatial variability for *Tectona grandis* LF precision forestry. **Cerne**, v. 23, p. 115-122, 2017.
- PODLASKI, R. Characterization of diameter distribution data in near-natural forests using the Birnbaum–Saunders distribution. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 38, n. 3, p. 518-527, 2008.
- POGODA, P.; OCHAŁ, W.; ORZEŁ, S. Modeling diameter distribution of black alder (*Alnus glutinosa* (L.) Gaertn.) stands in Poland. **Forests**, v. 10, n. 5, p. 412, 2019.
- POUDEL, K. P.; CAO, Q. V. Evaluation of methods to predict Weibull parameters for characterizing diameter distributions. **Forest Science**, v. 59, n. 2, p. 243–252, 2013.

PRETZSCH, H. *Forest dynamics, growth and yield: from measurement to model*. Berlin: Springer, 2009.

QUEIROGA, V. P. et al. Teca (*Tectona grandis* L. f.): Tecnologias de plantio e utilização. 1. ed. Campina Grande, PB: AREPB, 2024. v. 100. 164 p.

QUEIROZ, M. M. et al. Genetic diversity of improved genotypes of *Tectona grandis* in the state of Mato Grosso, Brazil. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, v. 83, n. 2, p. 120-127, 2021.

RADÍO, M. I. L.; DELGADO, D. M. Management of young teak plantations in Panamá-effect of pruning and thinning. **Swedish University of Agricultural Sciences. Master Thesis**, n. 229, p. 1-102, 2014.

RAHMAN, L.; GOSWAMI, J.; CHOUDHURY, D. Assessment of physical and thermal behaviour of chitosan-based biocomposites reinforced with leaf and stem extract of *Tectona grandis*. **Polymers and Polymer composites**, v. 30, p. 09673911221076305, 2022.

REIS, C. A. F.; OLIVEIRA, E. B.; SANTOS, A. M. Teca (*Tectona grandis* L. f.) no Brasil. Brasília, DF: Embrapa, 734 p., 2023.

RIZANTI, D. E. et al. Comparison of teak wood properties according to forest management: short versus long rotation. **Annals of Forest Science**, v. 75, p. 39, 2018.

ROCHA, K. J. et al. Form and Volume of the Stem of *Tectona grandis* Lf in the Central-WESTERN Region of Brazil. **Forests**, v. 13, n. 11, p. 1818, 2022.

SA, Q.; JIN, X.; PUKKALA, T.; et al. Developing Weibull-based diameter distributions for the major coniferous species in Heilongjiang Province, China. **Journal of Forestry Research**, v. 34, p. 1803–1815, 2023.

SALEKIN, S. et al. Global tree taper modelling: a review of applications, methods, functions, and their parameters. **Forests**, v. 12, n. 7, p. 913, 2021.

SANQUETTA, C. R. et al. A model based on environmental factors for diameter distribution in black wattle in Brazil. **PLoS One**, v. 9, n. 6, p. e100093, 2014.

SANTOS, G. M. et al. Effect of spacing on volume, form factor and taper for *Pinus taeda* trees in Paraná, Brazil. **Advances in Forestry Science**, v. 8, n. 3, p. 1557-1666, 2021.

SANTOS, M. L. et al. The Effect of Age on the Evolution of the Stem Profile and Heartwood Proportion of Teak Clonal Trees in the Brazilian Amazon. **Forests**, v. 14, n. 10, p. 1962, 2023.

SCHMIDT, L. N. et al. On the use of the Weibull distribution in modeling and describing diameter distributions of clonal eucalypt stands. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 50, n. 10, p. 1050–1063, 2020.

SCOLFORO, H. F. et al. Comparison of taper functions applied to eucalypts of varying genetics in Brazil: Application and evaluation of the penalized mixed spline approach. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 48, n. 5, p. 568-580, 2018.

SEGURA, C. E. C. et al. Caracterización anatómica radial y axial de la madera de teca (*Tectona grandis* L. f.) plantada en Chanchamayo–Perú. **Brazilian Journal of Wood Science**, v. 11, n. 2, 2020.

SETA, G. W. et al. Impact of thinning and pruning on tree growth, stress wave velocity, and pilodyn penetration response of clonal teak (*Tectona grandis*) plantation. **Forest Science and Technology**, v. 17, n. 2, p. 57-66, 2021.

SGHAIER, T. et al. Modelling diameter distribution of *Tetraclinis articulata* in Tunisia using normal and Weibull distributions with parameters depending on stand variables. **iForest-Biogeosciences and Forestry**, v. 9, n. 5, p. 702, 2016.

SHAHZAD, M. K. et al. Stem taper functions for *Betula platyphylla* in the Daxing'an Mountains, northeast China. **Journal of Forestry Research**, v. 32, n. 2, p. 529-541, 2021.

SHIFLEY, S. R.; LENTZ, E. L. Quick estimation of the three-parameter Weibull to describe tree size distributions. **Forest Ecology and Management**, v. 13, p. 195-203, 1985.

SINACORE, K. et al. Drought effects on *Tectona grandis* water regulation are mediated by thinning, but the effects of thinning are temporary. **Frontiers in Forests and Global Change**, v. 2, p. 82, 2019.

SOUZA, G. S. A. et al. Evaluation of non-linear taper equations for predicting the diameter of eucalyptus trees. **Revista Árvore**, v. 42, p. e420102, 2018.

SOUZA, I. A. et al. Development of models to aid decision making in the management of *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze. **Floresta**, v. 50, p. 1854–1863, 2020.

SOUZA, J. B. et al. O cenário nacional da silvicultura da *Tectona grandis* e suas perspectivas econômicas / The national forestry scenario *Tectona grandis* its economic prospects. **Brazilian Journal of Development**, v. 7, n. 6, p. 60486–60506, 2021.

SOUZA, H. J. DE et al. Thinning-response modifier term in growth models: An application on clonal *Tectona grandis* Linn F. stands at the amazonian region. **Forest Ecology and Management**, v. 511, p. 120109, 2022.

SOUZA, J. R. M. et al. Stem tapering of Eucalyptus spp. using different configurations of artificial neural networks. **Floresta**, v. 53, n. 2, 2023.

STEFANELLO, F. R. et al. Preußner functions for volume estimation of *Pinus taeda* L. in Southern Brazil. **New Zealand Journal of Forestry Science**, v. 51, n. 4, p. 1-25, 2021.

SUN, S.; CAO, Q. V.; CAO, T. Characterizing diameter distributions for uneven-aged pine-oak mixed forests in the Qinling Mountains of China. **Forests**, v. 10, n. 7, p. 596, 2019.

TAVARES JÚNIOR, I. S. et al. Machine learning and regression models to predict multiple tree stem volumes for teak. **Southern Forests**, v. 83, n. 4, p. 294-302, 2021.

TERRA, D. L. C. V.; ANDRADE, V. C. L.; SILVA, H. D. Histórico sobre modelos de afilamento em plantios brasileiros com o gênero *Pinus*. **Advances in Forestry Science**, v. 7, n. 4, p. 1241-1246, 2020.

TEWARI, V. P.; SINGH, B. A first-approximation simple dynamic growth model for forest teak plantations in Gujarat state of India. **Southern Forests: a Journal of Forest Science**, v. 80, n. 1, p. 59-65, 2018.

TONDJO, K. et al. Stochastic modelling of tree architecture and biomass allocation: application to teak (*Tectona grandis* L. f.), a tree species with polycyclic growth and leaf neoformation. **Annals of Botany**, v. 121, n. 7, p. 1397-1410, 2018.

VENDRUSCOLO, D. G. S. et al. Alterações temporais na distribuição diamétrica de teca em diferentes espaçamentos. **Nativa**, v. 8, n. 2, p. 210-215, 2020.

VENDRUSCOLO, D. G. S. et al. Dominant height growth in *Tectona grandis* plantations in Mato Grosso, Brazil. **Floresta e Ambiente**, v. 26, p. e20170703, 2019.

VIANA, L. A et al. Optimization and Economic Analysis of Multiproducts Obtained From Wood of Eucalyptus Stands Under Different Productive Capacity Classes and Rotation Ages. **Floresta**, v. 51, n. 2, 2021.

YASODHA, R. et al. Draft genome of a high value tropical timber tree, Teak (*Tectona grandis* L. f): insights into SSR diversity, phylogeny and conservation. **DNA Research**, v. 25, n. 4, p. 409-419, 2018.

ZHANG, L.; PACKARD, K. C.; LIU, C. A comparison of estimation methods for fitting Weibull and Johnson's SB distributions to mixed spruce fir stands in northeastern North America. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 33, n. 7, p. 1340-1347, 2003.

ZÖHRER, F. The application of the beta function for best fit of stem diameter distributions in inventories of tropical forest. Mitt. Bundesforsch.- anst. Forst-u. **Holz-wirtsch.**, v. 74, p. 279-293, 1969.

SEGUNDA PARTE – ARTIGO 1

SISTEMA PREDITIVO PARA MULTIPRODUTOS DE POVOAMENTOS DE *Tectona grandis* Linn. F., NO MATO GROSSO – BRASIL

RESUMO

Este estudo objetivou comparar métodos para projetar a distribuição diamétrica e a produção de madeira em povoamentos de *Tectona grandis* no Mato Grosso, Brasil, visando propor um sistema preditivo. A metodologia utilizou a função probabilística Weibull de dois parâmetros para modelar a estrutura dos diâmetros. Dois métodos foram comparados: a Estimativa dos Parâmetros (MEP), que projeta os parâmetros via regressão com variáveis do povoamento, e a Recuperação dos Parâmetros (MRP), que os obtém a partir dos momentos estatísticos da distribuição. A avaliação foi baseada em dados de medições sucessivas (2006-2024) de parcelas submetidas a desbastes. Os resultados demonstraram a adequação da função Weibull. Na comparação, o método MEP mostrou-se claramente superior, apresentando menor viés (0,47) e menores erros (MAE de 27,62; MSE de 4329,2) na projeção da estrutura futura. O método MRP apresentou desempenho inferior, com erros significativamente maiores, demonstrando maior sensibilidade às alterações estruturais provocadas pelos desbastes. Conclui-se que o sistema preditivo baseado no método MEP foi o mais preciso para estimar a futura distribuição diamétrica e gerar estimativas confiáveis de volume de multiprodutos em povoamentos manejados de *Tectona grandis*.

Palavras-chave: Teca; prognose volumétrica; estrutura diamétrica; plantio comercial.

ABSTRACT

This study aimed to compare methods for projecting diameter distribution and wood production in *Tectona grandis* plantations in Mato Grosso, Brazil, with the goal of proposing a predictive system. The methodology employed the two-parameter Weibull probability function to model diameter structure. Two methods were compared: Parameter Estimation Models (PEM), which project parameters via regression using stand variables, and Parameter Recovery Models (PRM), which derive parameters from the statistical moments of the distribution. The evaluation was based on repeated measurements (2006–2024) of plots subjected to thinning. Results demonstrated the adequacy of the Weibull function. In comparison, the PEM method was clearly superior, showing lower bias (0.47) and reduced errors (MAE = 27.62; MSE = 4329.2) in projecting future structure. The PRM method showed inferior performance, with substantially higher errors, indicating greater sensitivity to structural changes caused by thinning. It is concluded that the predictive system based on the PEM method is the most accurate for estimating future diameter distribution and generating reliable multiproduct volume estimates in managed *Tectona grandis* plantations.

Keywords: Teak; volume forecasting; diameter distribution; commercial plantation; stand management.

1. INTRODUÇÃO

A *Tectona grandis* Linn. f. (teca), pertencente à família Lamiaceae, destaca-se como uma das espécies florestais tropicais de alto valor econômico, representando cerca de 10% do total global de importações de madeira em tora provenientes de florestas tropicais não coníferas (IRINMWINUWA et al., 2023; KOLLERT; SANDEEP; SREELAKSHMY, 2024). No Brasil, seu cultivo vem ganhando destaque, alcançando aproximadamente 83 mil hectares plantados, conforme dados de 2024 (IBÁ, 2025), impulsionado por condições edafoclimáticas favoráveis ao crescimento e à produtividade (SANTOS et al., 2017).

A modelagem do crescimento e produção é fundamental para o planejamento florestal, e, nesse contexto, a modelagem da distribuição diamétrica tem se consolidado como ferramenta essencial para caracterizar a estrutura dos povoamentos por meio de funções de densidade de probabilidade (MADI et al., 2017; CAMPOS; LEITE, 2017). Esse tipo de modelagem permite descrever de forma consistente o estado atual e projetar o comportamento futuro do povoamento.

Diante da crescente demanda por produtividade, tratos silviculturais, como o desbaste, assumem papel estratégico no manejo de *Tectona grandis*, contribuindo para o incremento e a qualidade das árvores remanescentes (DAMÁSIO et al., 2015). Nesses cenários, a modelagem da distribuição diamétrica destaca-se como abordagem mais adequada em relação a outros modelos de crescimento e produção para representar a dinâmica estrutural dos povoamentos (MADI et al., 2017).

A função Weibull de dois parâmetros tem sido considerada uma das mais simples e eficientes para modelar a distribuição diamétrica em povoamentos de *Tectona grandis* em diferentes condições de manejo. Leite et al. (2006) verificaram sua adequada performance em povoamentos submetidos a desbaste no estado de Mato Grosso, enquanto Madi et al. (2017) destacou a robustez da Weibull 2P frente a modelos mais complexos ao comparar distribuições probabilísticas em povoamentos desbastados.

Neste modelo, dois métodos foram desenvolvidos para projetar os parâmetros por meio da relação com variáveis dos povoamentos: Modelos de estimativa dos parâmetros (MEP) e Modelos de recuperação dos parâmetros (MRP) (HYINK; MOSER, 1983; DIÉGUEZ-ARANDA et al., 2006, GORGOSO et al., 2007). O MEP é estabelecido através da correlação dos parâmetros de uma função de distribuição e variáveis do povoamento, por meio de regressão (TORRES-ROJO; MAGAÑA; ACOSTA, 2000; NOGUEIRA, 2003). Já no MRP as variáveis dos povoamentos são relacionadas a momentos da distribuição diamétrica,

que são posteriormente usados para recuperar os parâmetros da pdf (NEWBY, 1980; BURK; NEWBERRY, 1984; LINDSAY; WOOD; WOOLLONS, 1996).

Independentemente da categoria, esses dois métodos têm sido comparados na predição da distribuição diamétrica em povoamentos de *Pinus* (DIÉGUEZ-ARANDA et al., 2006), Eucalipto (MIRANDA et al., 2018) e *Betula alba* L. (GORGOSO et al., 2007). Entretanto, esse tipo de aplicação comparativa ainda é pouco explorado na recuperação da distribuição diamétrica em povoamentos de *Tectona grandis*. Assim, o presente estudo foi desenvolvido com a hipótese de que as metodologias de recuperação propostas poderiam gerar estimativas futuras precisas para determinar o número de árvores e volume por hectare e por múltiplos produtos em povoamentos *Tectona grandis*.

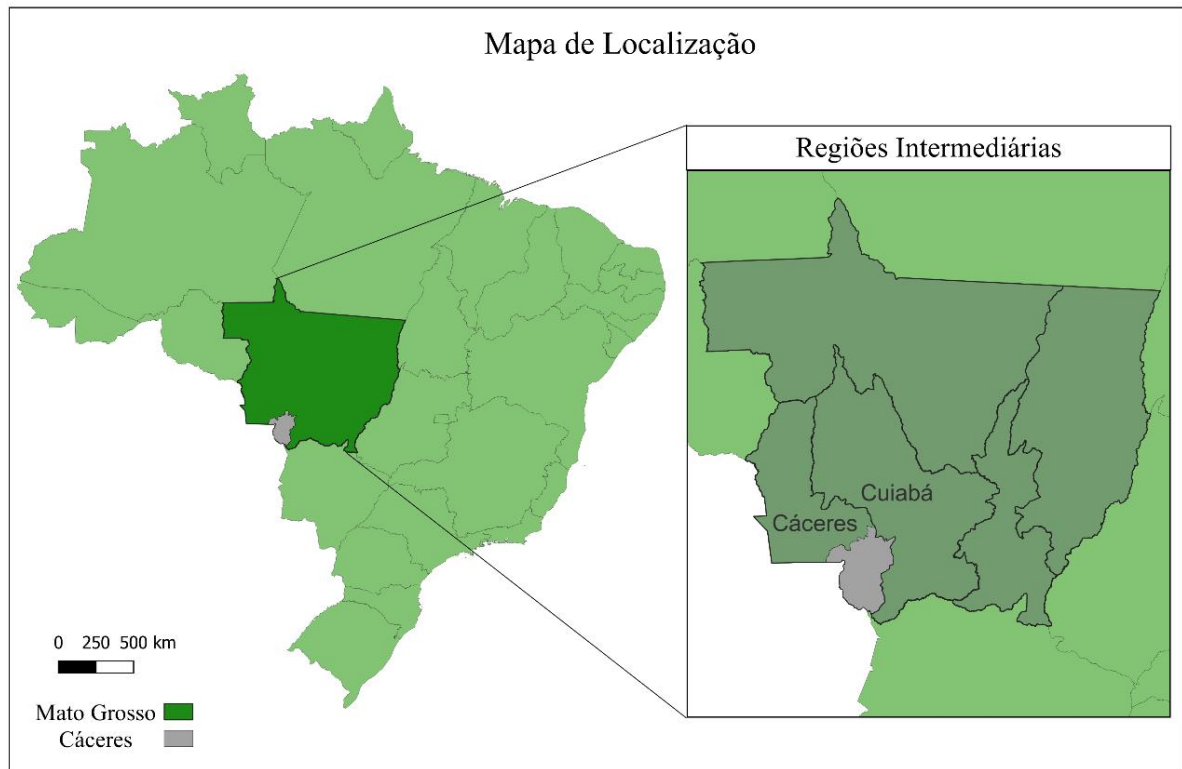
Diante desse contexto, o objetivo deste trabalho foi avaliar a aderência da função Weibull de dois parâmetros (2P) aos dados observados, comparando os métodos de Estimativa dos Parâmetros (MEP) e de Recuperação dos Parâmetros (MRP), bem como propor um sistema preditivo para estimar a distribuição diamétrica e a produção futura de madeira por multiprodutos em povoamentos de *Tectona grandis* localizados no estado de Mato Grosso, Brasil.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1. Caracterização da área de estudo

A base constituída por dados de povoamentos clonais e de origem seminal de *Tectona grandis*, utilizada para o desenvolvimento do estudo, foi oriunda das regiões intermediárias de Cáceres (municípios de Cáceres, Glória D'Oeste, Porto Esperidião e Indiavaí) e Cuiabá (municípios de Barra do Bugres, Tangará da Serra e Porto Estrela), estado do Mato Grosso, Brasil. Os povoamentos pertencem ao grupo Teak Resources Company – TRC, localizado em Cáceres, sob coordenadas geográficas 16° 04' 16" S, 57° 40' 44" O (Figura 1).

Figura 1 - Representação da área de estudo.



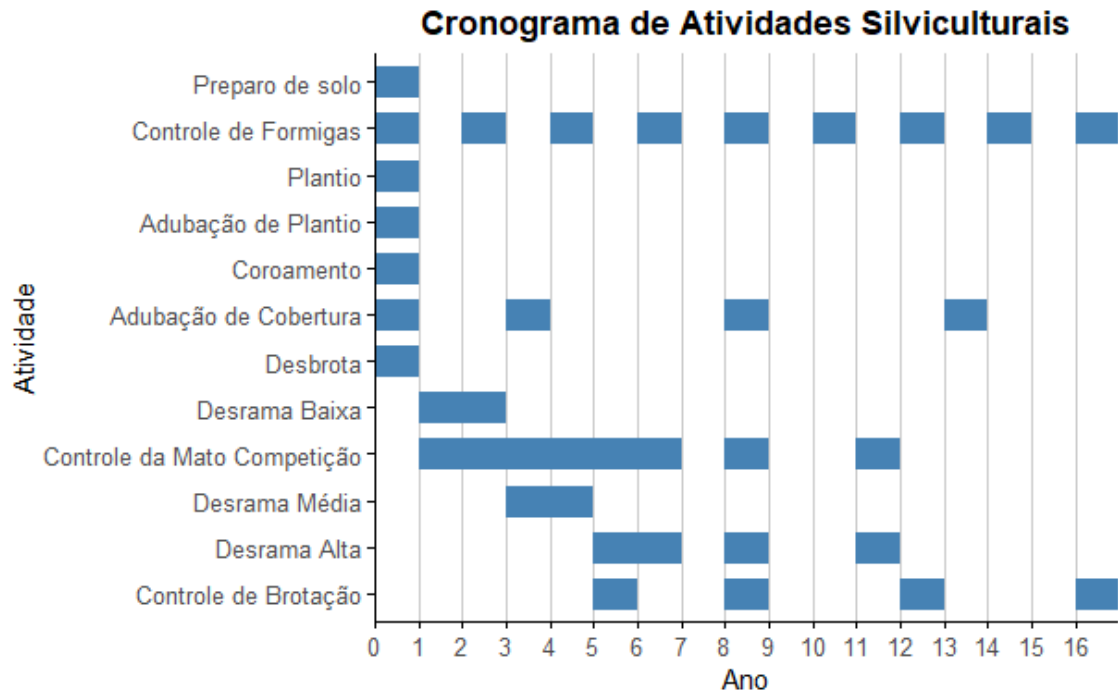
Fonte: Autor (2025).

No estado do Mato Grosso, o clima é caracterizado por duas estações bem definidas: chuvosa, que se estende de outubro a abril, e seca, de maio a setembro. A precipitação anual total varia de, aproximadamente, 1.200 a 2.000 mm (SOUZA et al., 2013). Segundo a classificação de Köppen (1948), o clima do estado é do tipo tropical úmido ou sub-úmido (Am) ao norte e tropical (Aw), com inverno seco, na região central do estado e no Pantanal Mato-Grossense (ALVARES et al., 2013). Ao longo do ano, as temperaturas médias mensais mantêm-se elevadas, com valores que variam, em média, de cerca de 22 °C a 27 °C, refletindo a baixa amplitude térmica anual da região.

2.2. Base de dados

Nos plantios, os tratos silviculturais foram realizados até os 16 anos. A partir dessa idade até o final da rotação, aos 20 anos, os povoamentos permaneceram apenas sob condução, sem novas intervenções (Figura 2).

Figura 2 - Cronograma silvicultural de *Tectona grandis* para uma rotação de 20 anos. As barras horizontais representam a idade (em anos) de realização de cada tratamento cultural.



Fonte: Autor (2025).

Além das atividades mencionadas na Figura 2 acima, também foi realizado o desbaste. Este foi executado de diferentes finalidades e em diferentes idades dos plantios. Os tipos de desbaste adotados foram: seletivo, seletivo fitossanitário e sistemática (3º ou 5º linhas).

A base de dados utilizada no estudo, consolidada em 2024, foi construída a partir de informações coletadas e fornecidas pela empresa em povoamentos clonais e seminal de *Tectona grandis*, distribuídos em diferentes projetos e 21 talhões. Os espaçamentos iniciais variavam de 4,0 x 2,5 m e 4,0 x 3,0 m e a área as parcelas vão de 359 m² a 2520 m², levando em consideração que a área útil da parcela é aumentada no inventário que procede a realização do desbaste.

Os dados mensurados nas unidades amostrais foram coletados anualmente entre os anos de 2006 e 2024. O método de amostragem quantitativa, realizado durante 19 anos, desencadeou em sucessivas medições de diâmetro à altura do peito (DAP) de todas as árvores das parcelas, altura total (Ht) de 20% e altura das árvores dominantes, sendo está à altura média das árvores com maiores DAP (100 árvores mais grossas por hectare (ASSMANN (1970))). Ao longo dos 19 anos de medição, foram registrados também dados de cubagem destrutiva e não destrutiva, totalizando 2965 árvores amostradas.

Utilizou-se o modelo logístico para ajustar a altura dominante em função da idade. Posteriormente, aplicou-se o Método da Curva Guia para determinar o índice de sítio, permitindo a classificação da produtividade das áreas. Já a altura total das árvores que não foram medidas em campo foi estimada por meio de equação hipsométrica que relaciona DAP e altura dominante para determinar a altura total.

2.3. Modelo de distribuição diamétrica

A distribuição de Weibull com sua função probabilística usada para modelar a estrutura dos povoamentos de *Tectona grandis* estudados está descrita a seguir. A distribuição foi adotada por apresentar significado biológico e sensibilidade indicada para modelar a estrutura horizontal de plantios da espécie (MADI et al. 2017, EGONMWAN; OGANA, 2020).

2.3.1. Função Weibull

A distribuição de Weibull de dois parâmetros representa uma frequência cumulativa em que β (parâmetro de escala) determina a dispersão da distribuição e α (parâmetro de forma) determina a forma da distribuição (SANDOVAL et al., 2021). O modelo Weibull de dois parâmetros está descrito na Equação 1 abaixo.

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

$$(x \geq 0; 0 < x < +\infty; \alpha, \beta > 0)$$

onde x é DAP, $f(x)$ é Função densidade de probabilidade, α é o parâmetro de forma e β o parâmetro de escala.

2.3.2. Ajuste da função

A função foi ajustada através do método da máxima verossimilhança, gerando uma equação para cada conjunto: projeto, parcela em cada ocasião de medição. Para isso, foi utilizado o pacote `bbmle` do software RStudio (versão 2024.09.1+394) (POSIT SOFTWARE, PBC, 2025) que é capaz de realizar o ajuste de modelos de probabilidade pelo método adotado no trabalho. Assim, a função de log-verossimilhança negativa foi minimizada por meio do algoritmo de otimização numérica Nelder-Mead, com o objetivo de encontrar os parâmetros que melhor se ajustam aos dados, ou seja, as estimativas de máxima verossimilhança (MLEs).

A aderência da função aos dados foi avaliada através do teste de Kolmogorov-Smirnov, em um nível de 5% de significância. O teste realizou a comparação entre a frequência acumulada estimada e a frequência acumulada observada, conforme apresentado na Equação 2.

$$D_{cal} = \text{SUP}_x |F_{o(x)} - F_{e(x)}| \quad (2)$$

em que D_{cal} é o valor calculado da estatística do teste de Kolmogorov-Smirnov, $F_{o(x)}$ e $F_{e(x)}$ representam, respectivamente, as frequências acumuladas observada e esperada, e SUP_x indica o maior valor da diferença absoluta entre essas distribuições ao longo do domínio de x .

2.4. Métodos de recuperação da distribuição diamétrica

2.4.1. Abordagem 1 – Estimativa dos Parâmetros (MEP)

Nesse tipo de abordagem, a redistribuição teórica dos diâmetros por classe foi realizada através de equações que correlacionam os parâmetros da pdf com as características do povoamento, através de meios tradicionais. Para estabelecer essa correlação, aplicou-se a regressão linear, onde os parâmetros da distribuição de Weibull em idades futuras são tratados como variáveis dependentes. Já as variáveis independentes incluem os parâmetros da mesma distribuição na idade atual e as características do povoamento nas idades atual e futura.

Diante do descrito, as equações utilizadas para projetar os parâmetros da pdf e a característica do povoamento foram selecionadas dos trabalhos de Binoti et al. (2010), Nogueira (2003) e Costa et al. (2019). As equações estão representadas pelas Equações 3, 4, 5, 6 e 7.

$$\beta_2 = p_1\beta_1 + p_2 \left(\frac{I_1}{I_2} \right) + p_3 \left(dmax_1 * \frac{I_1}{I_2} \right) + \varepsilon_i \quad (3)$$

$$\alpha_2 = p_1\alpha_1 + p_2 \left(\frac{I_1}{I_2} * \frac{dmax_1}{dq_1} \right) + \varepsilon_i \quad (4)$$

$$N_2 = p_0 + p_1N_1 + p_2 \left[G_1 * \left(\frac{I_1}{I_2} \right) \right] + p_3 \left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) (dmax_1 - dq_1) + \varepsilon_i \quad (5)$$

$$dmin_2 = p_1 \left(dmin_1 * \frac{I_1}{I_2} \right) + p_2 \left[\left(1 - \frac{I_1}{I_2} \right) * dq_1 \right] + \varepsilon_i \quad (6)$$

$$dmax_2 = p_1 \left(dmax_1 * \frac{I_1}{I_2} \right) + p_2 \left(\frac{dq_1}{dmax_1} \right) + \varepsilon_i \quad (7)$$

sendo I_1 e I_2 a idade atual (1) e futura (2) em meses, G_1 a área basal atual ($\text{m}^2 \text{ ha}^{-1}$), dq_1 o diâmetro quadrático atual (cm), $dmax_1$ e $dmax_2$ o diâmetro máximo (cm) na idade atual (1) e futura (2), $dmin_1$ e $dmin_2$ o diâmetro mínimo (cm) na idade atual idade atual (1) e futura (2), N_1 e N_2 o número de árvores por hectare nas idades atual (1) e futura (2), β_1 e β_2 os parâmetros de escala na idade atual (1) e futura (2), α_1 e α_2 o parâmetros de forma na idade atual (1) e futura (2), p_i os parâmetros dos modelos e ε_i o erro aleatório.

O ajuste das funções foi realizado no software RStudio (versão 2024.09.1+394), avaliando-se o erro padrão da estimativa (Syx) e o coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}). Os dados foram divididos em 80% para calibração e 20% para validação dos modelos. A partir da idade inicial, os parâmetros foram projetados sequencialmente para as idades seguintes, permitindo comparar os valores estimados com os observados.

2.4.2. Abordagem 2 – Recuperação dos parâmetros (MRP)

Na abordagem 2, a recuperação dos parâmetros foi obtida através da relação entre as variáveis área basal e número de árvores do povoamento, juntamente com a variância do DAP. Para isso, utilizou-se o método dos momentos, que garante de forma direta que a soma da área basal desagregada, obtida pela função Weibull, seja igual a área basal do povoamento fornecida por uma função de crescimento explícita dessa variável, resultando em compatibilidade numérica (TORRES-ROJO; MAGAÑA; ACOSTA, 2000; KANGAS, MALTAMO, 2000).

Para projeção dos parâmetros da pdf através da compatibilidade pelo modelo de povoamento total, foi ajustado de forma simultânea o modelo de Clutter (1963) (Equação 8) para determinar a área basal (G) em idades futuras (Equação 9):

$$\ln(V_2) = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{1}{S}\right) + \beta_2 \left(\frac{1}{I_2}\right) + \beta_3 \ln(G_1) \left(\frac{I_1}{I_2}\right) + \beta_4 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) + \beta_5 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) S + \varepsilon_i \quad (8)$$

$$\ln(G_2) = \ln(G_1) \left(\frac{I_1}{I_2}\right) + \alpha_0 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) + \alpha_1 \left(1 - \frac{I_1}{I_2}\right) S + \varepsilon_i \quad (9)$$

onde V_2 é o volume projetado, S o índice de sítio, G_1 e I_1 são a área basal e idade atual medidas em campo, I_2 é a idade futura para projeção, β_i os parâmetros do modelo e α_0 e α_1 são parâmetros da projeção de área basal, calculados diretamente dos β_i por: $\alpha_0 = \beta_4/\beta_3$ e $\alpha_1 = \beta_5/\beta_3$.

O modelo de sobrevivência (N_2) adotado foi o mesmo utilizado no ajuste do MEP. Por sua vez, o modelo de variância do DAP empregado foi obtido por regressão linear com base na sobrevivência (N), diâmetro máximo ($dmax$) e diâmetro quadrático (dq) encontra-se descrito a seguir (Equação 10):

$$\sigma^2 = \beta_1 \left(\frac{1}{N_1} * I_1\right) + \beta_2 dmax_1 + \beta_3 dq_1 + \varepsilon_i \quad (10)$$

Onde σ^2 é a variância do DAP, N_1 é o número de árvores por hectare na idade atual (1), $dmax_1$ o diâmetro máximo (cm) na idade atual (1), dq_1 o diâmetro quadrático atual (cm), β_i os parâmetros dos modelos e ε_i o erro aleatório.

Com os valores de G , N e σ^2 no futuro, se obtém também os valores de diâmetro quadrático (dq^2) e diâmetro médio ($\bar{d}$) futuro daquele povoamento (parcela por ocasião de medição), conforme Equações 11 e 12.

$$dq_2 = \sqrt{\frac{G_2}{N_2 * \pi}} * 200 \quad (11)$$

$$\bar{d} = \sqrt{dq_2^2 - \sigma^2} \quad (12)$$

O método dos momentos, adotado por Shifley e Lentz (1985), Nanang (1998) e Gorgoso et al. (2007), estabeleceram uma relação direta entre os dois parâmetros da distribuição de Weibull e o primeiro e o segundo momento da distribuição diamétrica (diâmetro médio e variância, respectivamente):

$$\sigma^2 = \frac{\bar{d}^2}{\Gamma^2\left[1+\frac{1}{\alpha}\right]} \left(\Gamma\left[1+\frac{2}{\alpha}\right] - \Gamma^2\left[1+\frac{1}{\alpha}\right] \right) \quad (13)$$

$$\beta = \frac{\bar{d}}{\Gamma\left[1+\frac{1}{\alpha}\right]} \quad (14)$$

em que $\Gamma(\cdot)$ representa a função Gama, definida como $\Gamma(t)=(t-1)!$ para valores inteiros e para valores não inteiros, pela integral $\Gamma(t) = \int_0^\infty x^{t-1} \exp(-x) dx$, sendo utilizada no cálculo dos momentos da distribuição Weibull.

Uma vez que a média e a variância dos diâmetros são conhecidos, e levando em consideração que a Equação (13) depende apenas de α , o valor do parâmetro de forma pode ser obtido através de procedimentos iterativos. Em contrapartida, o parâmetro de escala (β) pode ser calculado diretamente através da Equação 14.

2.4.3. Comparação entre os métodos

A consistência das duas abordagens foi avaliada pelo viés, erro médio absoluto (MAE) e erro médio quadrático (MSE), com as Equações 15, 16 e 17.

$$viés = \frac{\sum_{i=1}^N Y_i - \hat{Y}_i}{N} \quad (15)$$

$$MAE = \frac{\sum_{i=1}^N |Y_i - \hat{Y}_i|}{N} \quad (16)$$

$$MSE = \frac{\sum_{i=1}^N (Y_i - \hat{Y}_i)^2}{N} \quad (17)$$

onde Y_i representa o valor teórico (observado) do parâmetro, $\hat{Y}_i$ o valor estimado e N o número de observações.

As métricas foram calculadas individualmente para número de árvores por hectare, parâmetro de escala e parâmetro de forma e foram comparados os valores projetados pelos

métodos de Estimativa de Parâmetros (MEP) e Recuperação de Parâmetros (MRP) com os valores teóricos de referência.

2.5. Estimativa da altura total no futuro

Com o objetivo de determinar o modelo mais adequado para estimar a altura média por classe diamétrica, foram testadas diferentes relações hipsométricas. A Tabela 1 descreve as equações avaliadas.

Tabela 1 – Modelos de relação hipsométrica.	
Modelo	Eq.
$Ht_i = \beta_0 + \beta_1 * \ln(DAP_i) + \varepsilon_i$	(18)
$\ln(Ht_i) = \beta_0 + \beta_1 * \frac{1}{DAP_i} + \varepsilon_i$	(19)
$Ht_i = \beta_0 + \beta_1 * DAP_i + \beta_2 * DAP_i^2 + \varepsilon_i$	(20)
$\ln(Ht_i) = \beta_0 + \beta_1 * \ln(DAP_i) + \varepsilon_i$	(21)
$Ht_i = \beta_0 + \beta_1 * DAP_i + \varepsilon_i$	(22)
$Ht_i = \beta_0 + \beta_1 * DAP_i^2 + \varepsilon_i$	(23)
$Ht_i = \beta_0 + \beta_1 * \frac{1}{DAP_i^2} + \varepsilon_i$	(24)

Fonte: Autor (2025).

Onde Ht_i é a altura total da i -ésima árvore (m), DAP_i é o diâmetro à altura do peito da i -ésima árvore (cm), β_0 , β_1 e β_2 são os parâmetros dos modelos, e ε_i é o erro aleatório associado à i -ésima observação.

As equações foram ajustadas utilizando a função `lm()` do pacote `minpack.lm`, no software RStudio (versão 2024.09.1+394). A função selecionada foi aquela que apresentou o menor `Syx`.

2.6. Sortimento

2.6.1. Sortimento de madeira

De posse dos dados de DAP e altura média de cada classe diamétrica e da função de afilamento, foram estimados os sortimentos de madeira, a fim de determinar o volume e a quantidade de toras de cada produto selecionado. Assim, a projeção foi realizada levando em consideração os referidos produtos:

- Produto 1 – tora de diâmetro mínimo 32 cm com 7 metros;
- Produto 2 – tora de diâmetro mínimo 25 cm com 5 metros;

- Produto 3 – tora de diâmetro mínimo 16 cm com 2,3 metros;

2.6.2. Equação de afilamento

O perfil do fuste foi modelado por meio de um polinômio de 5º grau, método consolidado na literatura para a descrição de multiprodutos florestais (Equação 25).

$$\frac{d}{DAP} = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{h}{Ht}\right) + \beta_2 \left(\frac{h}{Ht}\right)^2 + \beta_3 \left(\frac{h}{Ht}\right)^3 + \beta_4 \left(\frac{h}{Ht}\right)^4 + \beta_5 \left(\frac{h}{Ht}\right)^5 + \varepsilon_i \quad (25)$$

onde d_i é o diâmetro (cm) e h_i a altura ao longo do fuste (m).

O ajuste foi realizado no software RStudio (versão 2024.09.1+394) e a equação foi avaliada pelo o erro padrão da estimativa (Syx) e o coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}).

2.6.3. Determinação do volume de cada produto

A equação ajustada para a base de dados de cubagem foi aplicada a cada classe de diâmetro para determinação do volume dos multiprodutos. Para isso, foram utilizados os dados de DAP e altura média de cada classe.

A estimativa do volume foi definida através da integração da equação de afilamento ajustada para a base de dados usando a função `integrate()` presente na base do software RStudio (versão 2024.09.1+394). Nesse caso, o volume por produto retirado de cada árvore foi obtido levando em consideração que h_1 representa a altura inicial de onde foi retirada a primeira peça de cada produto e h_2 a altura máxima daquele produto. A integral foi representada da seguinte forma:

$$v = K \int_{h_1}^{h_2} \hat{d}_i^2 \delta h \quad (26)$$

onde K é a constante que representa $\pi/40000$, d_i é o diâmetro (cm) estimado pela função de afilamento, correspondente a qualquer altura h_i (m) ao longo do fuste, h_1 é altura inicial e h_2 é altura final da seção.

3. RESULTADOS

3.1. Estatística descritiva

A Tabela 2 resume a estatística descritiva geral do DAP, apresentando medidas de tendência central, dispersão e formato da distribuição.

Tabela 2 - Estatísticas descritivas para DAP dos povoamentos de *Tectona grandis*.

Estatística	DAP
Média (cm)	24,70
Erro padrão (cm)	0,02

Mediana (cm)	25,20
Moda (cm)	13,00
Desvio padrão (cm)	10,14
Variância da amostra (cm ²)	102,89
Amplitude (cm)	59,70
Mínimo (cm)	1,50
Máximo (cm)	61,20
Soma	6910701,00
Assimetria	-0,16
Curtose	2,29

Fonte: Autor (2025).

O conjunto de 279.774 árvores apresenta DAP variando de 1,50 cm a 61,20, resultando em uma amplitude total de 59,70 cm. A distribuição dos diâmetros mostra ainda média de 24,70 cm, mediana de 25,20 cm e moda de 13 cm, com desvio padrão de 10,14 cm, indicando que a maioria das árvores do plantio de concentram em torno dos valores médios, embora alguns indivíduos apresentem diâmetros muito pequenos ou grandes. A distribuição apresentou leve assimetria à esquerda (-0,16) e curtose de 2,26, sugerindo uma distribuição ligeiramente mais achatada que a normal.

A distribuição diamétrica geral do povoamento está descrita abaixo (Tabela 3), confirmando a leve assimetria a esquerda com o maior número de indivíduos nas classes 11 – 41 cm, correspondendo a aproximadamente 85% do total.

Tabela 3 - Distribuição diamétrica do povoamento, indicando limites de classe, centro de classe, frequência observada e frequência relativa dos indivíduos por classe de diâmetro (cm)

Classe	Limite inferior (cm)	Limite superior (cm)	Centro de classe (cm)	Frequência observada	Frequência relativa (%)
1	1	11	6	30.690	10,97
2	11	21	16	68.046	24,32
3	21	31	26	96.156	34,37
4	31	41	36	74.061	26,47
5	41	51	46	10.703	3,83
6	51	61	56	117	0,04
7	61	71	66	1	0,00
Total				279.774	100,00

Fonte: Autor (2025).

3.2. Ajuste da Weibull

A Tabela 4 resume as estatísticas de D_{cal} , permitindo avaliar a aderência do modelo Weibull 2P aos dados de DAP.

Tabela 4 - Estatísticas do índice D_{cal} .

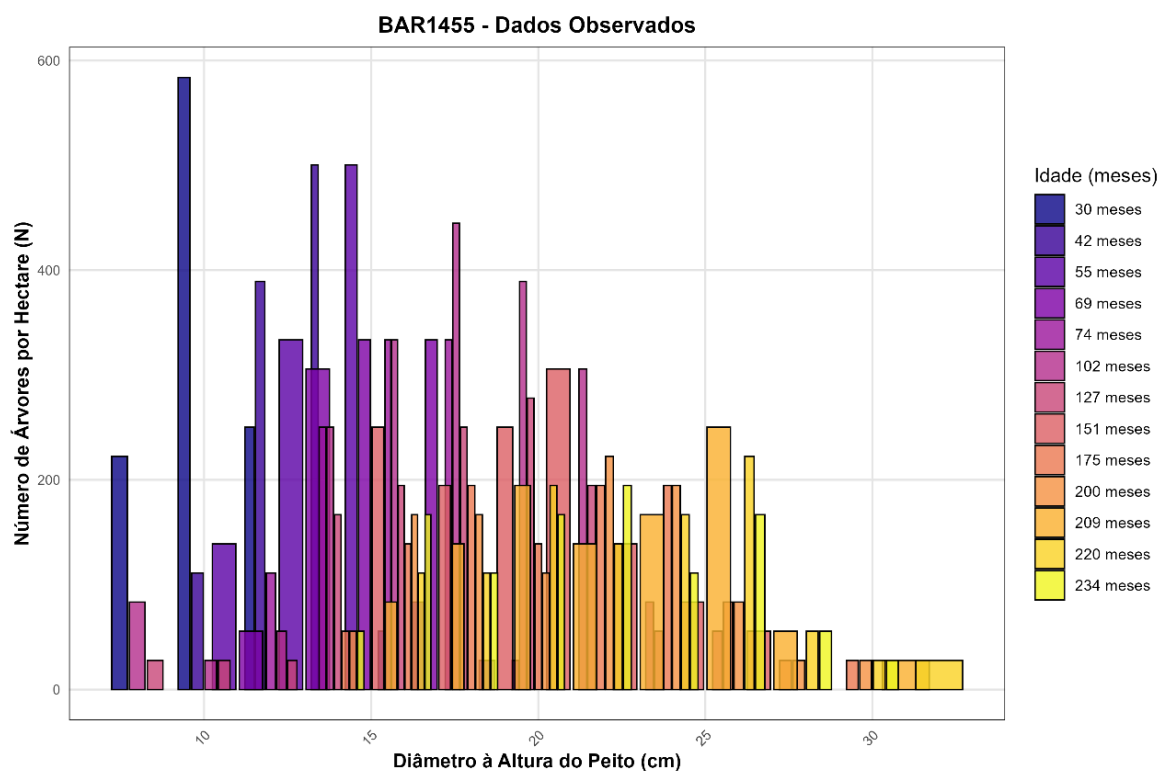
D_{cal}				Grupos	Grupos
Mínimo	Médio	Máximo	Desvio padrão	rejeitados	aceitos
0,037	0,119	0,851	0,042	50	7227

Fonte: Autor (2025).

O ajuste foi realizado para cada projeto, parcela e idade de medição. Dos grupos avaliados, 7.227 apresentaram ajuste satisfatório ao nível de confiança de 95% pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, enquanto apenas 50 grupos rejeitaram a hipótese de seguir a distribuição. Isso representa 99,3% dos grupos com ajuste aceitável, indicando boa aderência da função probabilística Weibull de 2 parâmetros à distribuição diamétrica dos povoamentos de *Tectona grandis* estudados.

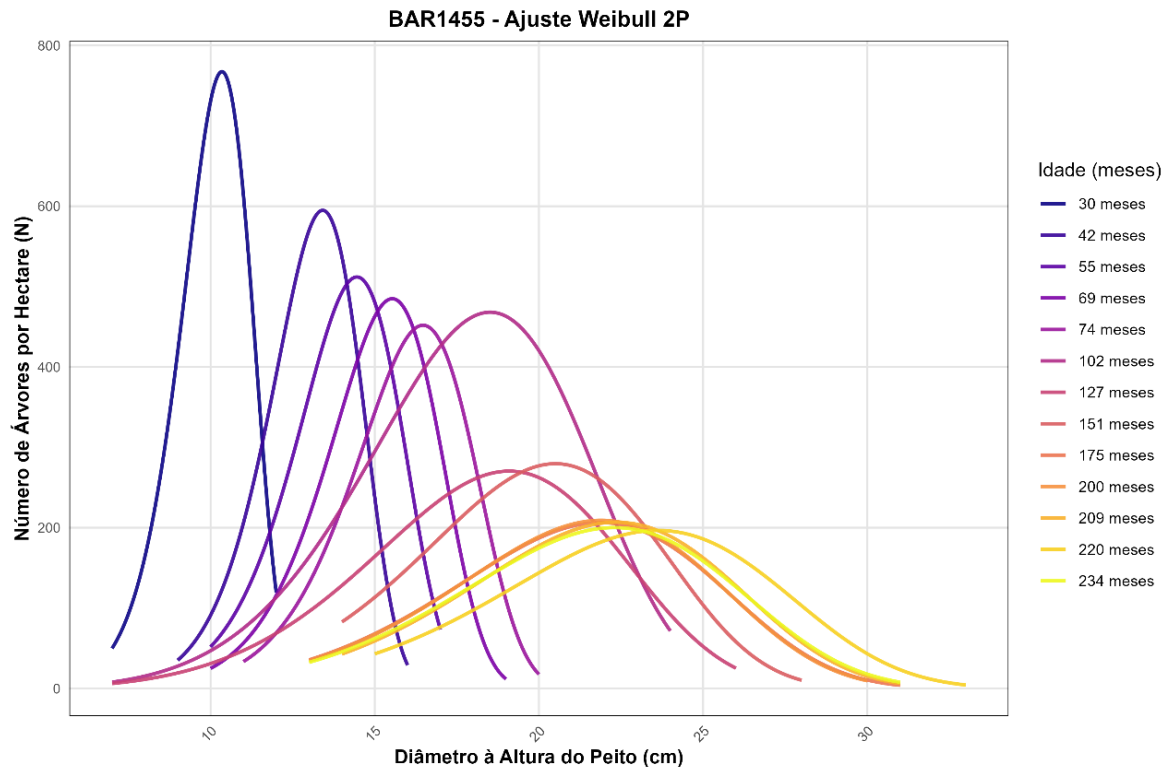
Os gráficos abaixo apresentam, a distribuição diamétrica observada (Figura 3) e a estimada pela Weibull de dois parâmetros (Figura 4), considerando o mesmo projeto e parcela ao longo de várias idades.

Figura 3 - Distribuição diamétrica observada para o projeto Bar, parcela 1.455 em diferentes idades de medição.



Fonte: Autor (2025).

Figura 4 - Distribuição diamétrica estimada pela função densidade de probabilidade Weibull de 2 parâmetros (Weibull 2P) para a mesma parcela e idades correspondentes à Figura 3.

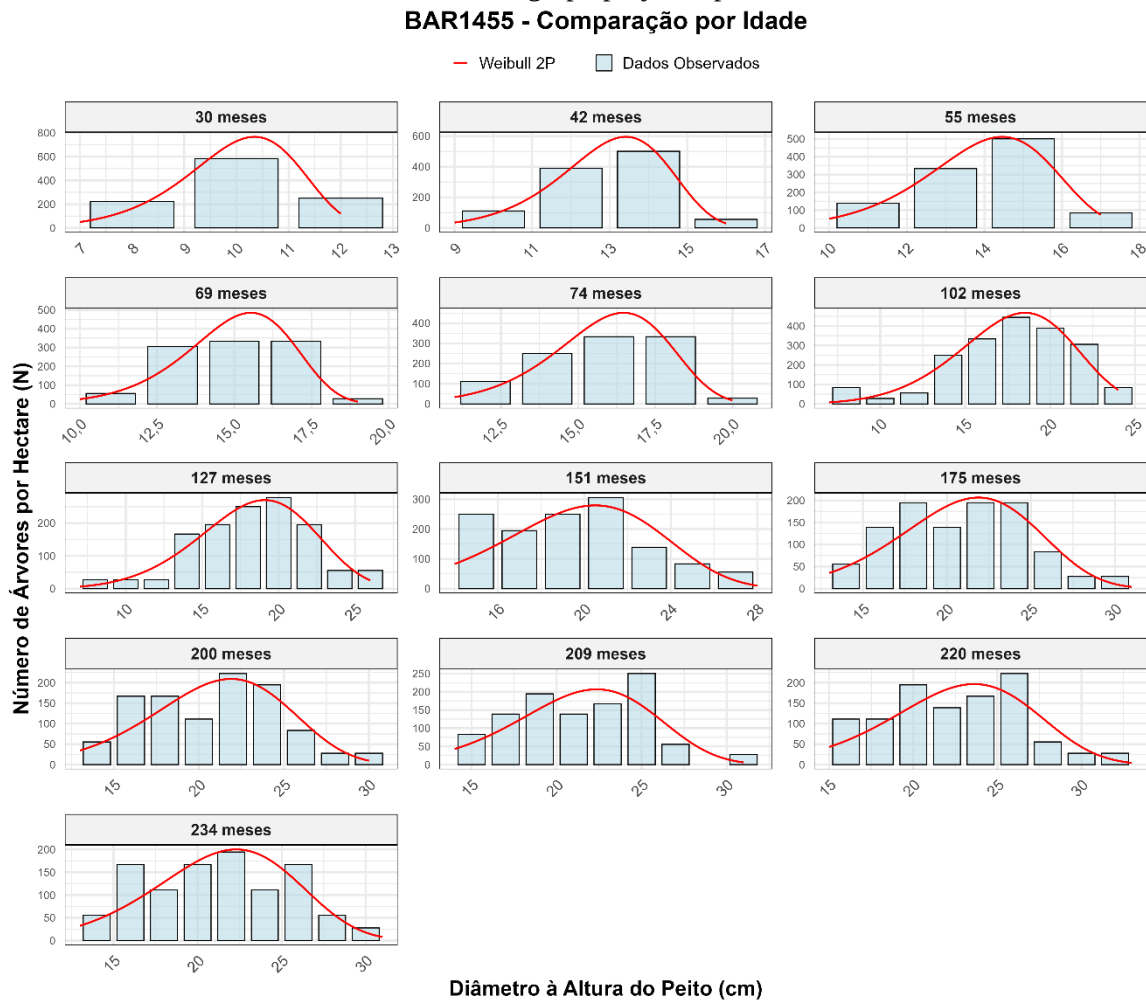


Fonte: Autor (2025).

A comparação entre os dados estimados e observados indica que o modelo Weibull de dois parâmetros descreve satisfatoriamente a evolução da distribuição diamétrica ao longo do tempo, capturando também os efeitos dos desbastes. Observou-se que, à medida que a idade avança, as curvas tornam-se mais largas e achatadas, refletindo o aumento da variabilidade diamétrica e a redução relativa da densidade dos povoamentos, provavelmente causado pelos desbastes.

A Figura 5 destaca a comparação entre os dados observados e ajuste para cada idade do mesmo grupo de projeto parcela apresentado nas análises generalizadas anteriores.

Figura 5 - Comparação entre distribuições diamétricas observadas e ajustadas pela Weibull em diferentes idades do grupo projeto e parcela BAR1455.



Fonte: Autor (2025).

Os resultados demonstram uma evolução temporal consistente na estrutura diamétrica, com deslocamento progressivo das distribuições para classes diamétrica maiores ao longo do tempo. Apesar das falhas nas classes observas a partir da idade 151 meses, é possível observar que o modelo utilizado captou satisfatoriamente as dinâmicas dos povoamentos, mesmo após as intervenções que causaram distúrbio nas classes.

3.3. Recuperação da distribuição diamétrica

3.3.1. Abordagem 1

A Tabela 5 apresenta os parâmetros e as estatísticas usadas para avaliar os ajustes das equações que compõem a abordagem 1, considerando a base de dados completa.

Tabela 5 - Parâmetros estimados e estatísticas de ajuste das equações utilizadas na abordagem 1.

Modelos	p₀	p₁	p₂	p₃	R²aj	Syx
β_2	-	1,4207	4,2580	-0,4581	0,99	2,0565
α_2	-	0,8854	1,6217	-	0,96	2,9526
N ₂	155,6746	0,7983	-6,7698	-52,1150	0,82	111,7958 árv. ha ⁻¹
dmin ₂	-	1,0303	1,2681	-	0,98	2,8142 cm
dmax ₂	-	0,3721	24,7655	-	0,94	7,7309 cm

Fonte: Autor (2025).

As equações utilizadas para estimar β_2 e dmin₂ foram os que apresentaram o melhor desempenho, revelado pelos altos coeficientes de determinação (0,99 e 0,98, respectivamente) e pelos menores erros padrão residual. Esses resultados indicam que há uma forte correlação entre as variáveis explicativas e esses parâmetros da distribuição, favorecendo a estabilidade dos ajustes. Por outro lado, os modelos aplicados para estimar N₂ e dmax₂ apresentaram desempenho inferior. Essa redução na qualidade do ajuste pode estar associada ao fato de que essas variáveis são mais sensíveis aos efeitos dos desbastes, que alteram diretamente a densidade e a estrutura diamétrica da população, tornando sua previsão mais complexa.

3.3.2. Abordagem 2

Na Tabela 6 são apresentados os parâmetros estimados e as estatísticas de ajuste dos modelos utilizados na abordagem 2.

Tabela 6 - Parâmetros estimados e estatísticas de ajuste dos modelos utilizados na abordagem 2.

Modelo	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	R²aj	Syx
V ₂	3,8754	-25,0109	-31,9284	0,8826	2,3499	0,0097	0,90	25,0963 m ³
G ₂	2,6625	0,0110	-	-	-	-	0,85	2,5377 m ²
σ^2	-	23,7722	1,5222	-181,9198	-	-	0,86	2,6147 cm ²

Fonte: Autor (2025).

É possível afirmar que os modelos utilizados para a modelagem de recuperação dos parâmetros exibiram bom ajuste à base de dados, indicando boa explicação da variabilidade causada principalmente pelos desbastes aos quais os plantios foram submetidos. Os valores das estatísticas analisadas mostram coerência com o comportamento esperado para essas variáveis, indicando que os modelos conseguem refletir de forma adequada as mudanças estruturais do povoamento ao longo do tempo.

3.3.3. Comparação entre MEP e MRP

Após a modelagem necessária para estimar os parâmetros de escala (β) e de forma (α) no futuro, realizou-se a comparação entre as abordagens, conforme apresentado na Tabela 7 abaixo.

Tabela 7 - Comparação entre os métodos de ajuste das distribuições diamétricas, apresentando viés, erro absoluto médio (MAE) e erro quadrático médio (MSE) para a estimativa dos parâmetros via regressão (MEP) e via recuperação por momentos (MRP)

Método de ajuste	Método de modelagem	Viés	MAE	MSE
Regressão linear	Estimativa dos Parâmetros (MEP)	0,4665	27,6249	4329,2
Momentos	Recuperação dos Parâmetros (MRP)	104,6521	131,4043	64743,8

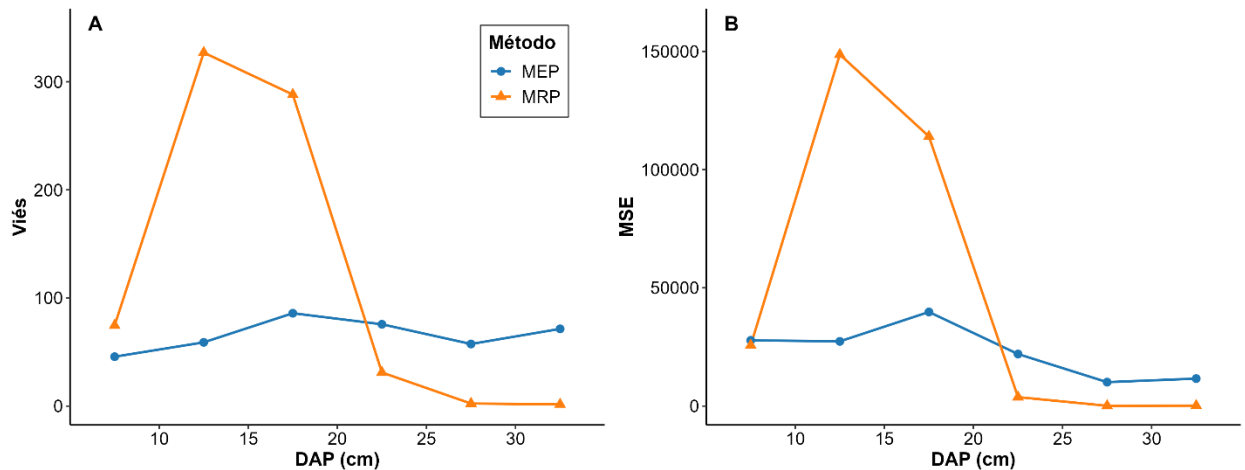
Fonte: Autor (2025).

As estatísticas usadas indicam uma diferença marcante entre os dois métodos avaliados. O método que utiliza a regressão linear para estimar os parâmetros apresentou viés, MAE e MSE menores, indicando maior precisão e menor dispersão dos erros. Essa superioridade pode estar associada ao fato de que a regressão capta diretamente a relação funcional entre idade, variáveis estruturais e os parâmetros atuais da Weibull, incorporando coerência entre as fases de desenvolvimento dos povoamentos e representando a dinâmica de crescimento diamétrico de forma mais próxima do real. Além disso, em povoamentos submetidos a desbaste, essa abordagem tende a apresentar melhor desempenho por ser capaz de refletir as mudanças na densidade e na competição entre árvores, fatores que influenciam diretamente a redistribuição diamétrica e o crescimento das árvores remanescentes, contribuindo para estimativas mais consistentes dos parâmetros da distribuição.

Em contrapartida, o método dos momentos depende exclusivamente dos momentos observados em cada idade, sendo eles a variância e o diâmetro médio, a partir dos quais são recuperados os parâmetros da Weibull. Esses momentos são fortemente influenciados pelo comportamento das classes diamétricas de menor amplitude, que concentram maior número de árvores e apresentam maior sensibilidade às intervenções silviculturais. Em povoamentos submetidos a desbaste, essas classes respondem rapidamente a processos como mortalidade, recrutamento e redução da competição, de modo que pequenas alterações em sua estrutura podem gerar impactos expressivos nos momentos estimados. Dessa forma, quaisquer imprecisões nos valores de diâmetro médio e variância tendem a ser amplificadas, especialmente em função das irregularidades provocadas pelos desbastes, que afetam a distribuição diamétrica de maneira heterogênea. Assim, o método dos momentos produziu maiores erros acumulados devido a variações abruptas entre idades quando comparado ao MEP, justificando o desempenho inferior observado no estudo.

A comparação do desempenho dos modelos MEP e MRP na predição da distribuição diamétrica é apresentada na Figura 6.

Figura 6 - Desempenho comparativo dos métodos de estimativa dos parâmetros (MEP) e recuperação dos parâmetros (MRP) na estimativa da distribuição diamétrica: viés (A) e erro quadrático médio - MSE (B) por diâmetro à altura do peito (DAP, em cm).



Fonte: Autor (2025).

A análise comparativa do desempenho dos modelos MEP e MRP na predição da distribuição diamétrica revelou padrões distintos de viés e precisão ao longo do gradiente diamétrico. Ambos os modelos apresentaram viés positivo para todos os diâmetros, indicando superestimativa sistemática do número de árvores predito. O viés do modelo MRP mostrou-se consistentemente superior ao do MEP em todo o intervalo, com diferença mais acentuada entre 15-25 cm. Em relação ao erro quadrático médio (MSE), observou-se que os valores aumentaram progressivamente com o DAP até aproximadamente 22 cm, decrescendo ligeiramente nos maiores diâmetros. O modelo MRP apresentou MSE substancialmente superior ao MEP em todo o gradiente, atingindo valores máximos próximos a 150.000, enquanto o MEP manteve-se abaixo de 50.000 em todo o intervalo. Esses resultados comprovam que, embora ambos os modelos superestimem a distribuição diamétrica, o modelo MEP apresenta desempenho superior, com menor viés e maior precisão ao longo de todo o gradiente diamétrico avaliado.

3.4. Ajuste das equações hipsométricas

O ajuste do conjunto de modelos foi realizado para cada grupo de projeto, parcela e idade, desconsiderando árvores com DAP menor que 5 cm, com o objetivo de garantir maior homogeneidade dos dados e maior confiabilidade dos ajustes. A Tabela 8 apresenta os

modelos avaliados, suas respectivas equações e o número de vezes em que cada modelo foi selecionado.

Tabela 8 – Número de vezes que cada modelo foi selecionado.

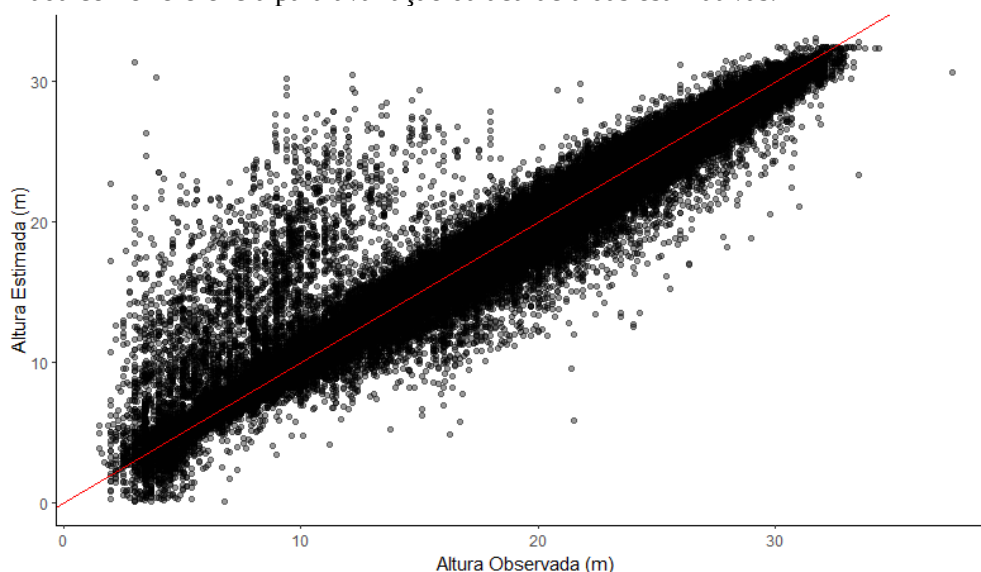
Eq.	Modelo	Número de vezes selecionado
(24)	$Ht_i = \beta_0 + \beta_1 \times \frac{1}{DAP_i^2} + \varepsilon_i$	830
(20)	$Ht_i = \beta_0 + \beta_1 \times DAP_i + \beta_2 \times DAP_i^2 + \varepsilon_i$	803
(23)	$Ht_i = \beta_0 + \beta_1 \times DAP_i^2 + \varepsilon_i$	782
(21)	$\ln(Ht_i) = \beta_0 + \beta_1 \times \ln(DAP_i) + \varepsilon_i$	333
(22)	$Ht_i = \beta_0 + \beta_1 \times DAP_i + \varepsilon_i$	268
(19)	$\ln(Ht_i) = \beta_0 + \beta_1 \times \frac{1}{DAP_i} + \varepsilon_i$	195

Fonte: Autor (2025).

As equações 24, 20 e 23 foram as mais selecionadas, possivelmente porque conseguem representar com maior sensibilidade a curvatura do crescimento em altura. Esse comportamento é especialmente relevante em povoamentos submetidos a desbastes sistemáticos ou seletivos (dependendo da regra adotada), que podem gerar maior variação de DAP e altura. Por isso, esses modelos tendem a se adaptar melhor às diferentes condições encontradas nos conjuntos de ajuste, resultando em desempenho superior em relação aos demais.

A relação entre os valores observados e estimados de altura foi analisada por meio de gráfico de dispersão, considerando o modelo selecionado para cada parcela e idade de medição (Figura 7).

Figura 7 - Dispersão entre os valores de altura observada e estimada, obtidos a partir do modelo selecionado para cada parcela e idade de medição. A linha contínua representa a linha de igualdade (1:1), utilizada como referência para avaliação da acurácia das estimativas.



Fonte: Autor (2025).

Observa-se que os valores estimados apresentam boa aderência à linha 1:1, indicando desempenho satisfatório do conjunto de modelos utilizados. Entretanto, nota-se maior dispersão dos dados nas menores classes de altura, evidenciando aumento da variabilidade e possível heterocedasticidade nessa faixa. Para maiores valores de altura, as estimativas tornam-se mais consistentes e próximas dos valores observados, sugerindo maior precisão do modelo para indivíduos de maior porte.

3.5. Ajuste da equação de afilamento

A tabela 9 apresenta os coeficientes do modelo polinomial ajustado.

Tabela 9 - Coeficientes e estatísticas do modelo polinomial ajustado.

Modelo	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	β_5	R^2_{aj}	Syx
d	1,3597	-5,7055	23,6672	-51,0089	49,5663	-17,88	0,94	1,9898 cm

Fonte: Autor (2025).

O modelo apresenta um coeficiente de determinação ajustado elevado (94%), indicando que explica grande parte da variabilidade observada nos diâmetros do caule. Além disso, o baixo erro padrão residual demonstra que as previsões do modelo são precisas em relação aos valores medidos, evidenciando a confiabilidade do ajuste.

4. DISCUSSÃO

4.1. Função densidade de probabilidade (pdf)

Os estudos focados na distribuição diamétrica apresentam diversas aplicações, especialmente por possibilitar a avaliação da dinâmica de crescimento dos povoamentos florestais (OLIVEIRA NETO et al., 2010). Entre as diferentes funções probabilísticas utilizadas na modelagem da distribuição de diâmetros, a Weibull de dois parâmetros, adotada neste estudo, destaca-se amplamente na literatura pela sua versatilidade e bom desempenho.

Diversos autores reforçam essa aplicabilidade. Schroder et al. (2016) compararam a Weibull de dois parâmetros a outras funções de densidade probabilística em povoamentos de *Eucalyptus dunnii* e observaram excelente ajuste. Em estudos com *Tectona grandis*, Sanquetta et al. (2011) utilizaram a Weibull de dois parâmetros para projetar a estrutura diamétrica, demonstrando sua utilidade para fins de prognose florestal. Além disso, Schmidt et al. (2020) discutiram a eficácia da Weibull de dois parâmetros na previsão de distribuições

de diâmetro, destacando sua simplicidade e eficiência, enquanto Leite e Binoti (2009) mostraram seu bom desempenho também em situações envolvendo desbaste.

Os resultados dos ajustes obtidos no presente trabalho demonstram a elevada aderência da função Weibull de dois parâmetros para representar de forma adequada o padrão estrutural dos povoamentos. A baixa variabilidade do Dcal e o valor médio reduzido indicam pequenas discrepâncias entre as distribuições observada e ajustada, reforçadas pela predominância de ajustes aceitos pelo teste de Kolmogorov–Smirnov.

Esse comportamento está alinhado a estudos que destacam a eficiência da Weibull de dois parâmetros em povoamentos comerciais de *Tectona grandis*. Leite et al. (2006) demonstraram que a função captura, de forma biologicamente consistente, a dinâmica diamétrica em diferentes idades, enquanto Nogueira et al. (2006) observaram que sua estabilidade se mantém mesmo após intervenções silviculturais, como desbastes. Egonmwan e Ogana (2020) também evidenciaram que a Weibull supera outras alternativas de modelagem na descrição da estrutura de *Tectona grandis* na Nigéria, reforçando sua robustez em diferentes condições de manejo. Dessa forma, os resultados obtidos corroboram os achados científicos de que a Weibull de dois parâmetros é uma abordagem confiável para caracterizar a variabilidade diamétrica em plantações de *Tectona grandis*.

As mudanças observadas nas curvas ajustadas ao longo das idades mostram a evolução temporal da estrutura diamétrica, seguindo o comportamento biológico típico descrito para esse tipo de modelagem (NOGUEIRA et al., 2006; BINOTI et al., 2010; MEDEIROS et al., 2017; VENDRUSCOLO et al., 2020). À medida que o povoamento envelhece, observa-se uma redistribuição gradual da densidade ao longo das classes de DAP, resultando em uma curva mais ampla e suavizada, caracterizando o achatamento e tornando as distribuições mais platicúrticas.

Esse processo natural de achatamento é intensificado pelos desbastes, que reduzem a densidade, aumentando a disponibilidade de recursos e acelerando o crescimento das árvores remanescentes, ampliando a dispersão e modificando a forma das curvas. Esse efeito do manejo vai de acordo com o relatado por Leite et al. (2006), mostrando que intervenções de desbaste em povoamentos de *Tectona grandis* provocam alterações na forma da distribuição diamétrica. Além disso, as modificações observadas nas curvas são consistentes com o que afirmam Schneider e Schneider (2008), em que a idade e o manejo são fatores determinantes na assimetria e na curtose das distribuições de frequência.

4.2. Comparação entre as abordagens (MEP e MRP)

Os resultados obtidos na comparação entre as estimativas dos parâmetros (MEP) e a recuperação dos parâmetros (MRP) revelam um contraste marcante entre o desempenho das duas abordagens. A regressão linear, utilizada na modelagem da MEP, apresentou menor viés, MAE e MSE, demonstrando maior precisão e estabilidade. A superioridade de métodos baseados em regressão na estimativa dos parâmetros de forma e escala da distribuição Weibull já foi descrita por Schütz e Rosset (2020), cujos resultados apontam que variáveis estruturais simples de povoamento, como diâmetro médio quadrático, diâmetros mínimos e máximos, permitem prever com boa acurácia os parâmetros da distribuição diamétrica.

Em contrapartida, o desempenho inferior do MRP pode estar associado às limitações inerentes ao uso exclusivo dos momentos amostrais. Como os momentos refletem diretamente o comportamento da média e da variância diamétrica, qualquer flutuação causada por desbastes ou irregularidades estruturais tende a ser amplificada durante a recuperação dos parâmetros. Essa sensibilidade é documentada de forma geral na literatura sobre modelagem de distribuição diamétrica em florestas com estrutura complexa ou heterogênea (Podlaski, 2010; Cao, 2004).

Os resultados gráficos revelam que os maiores erros de ambos os métodos se concentram nas classes intermediárias, justamente onde a densidade de árvores é tipicamente maior em florestas tropicais (HUBBELL, 2001). Essa amplificação do erro demonstra uma limitação estrutural dos modelos paramétricos baseados na Weibull, que, ao priorizar o ajuste global, frequentemente falham em capturar a moda real da distribuição diamétrica, uma crítica já levantada por Cao (2004) para povoamentos heterogêneos. A superioridade consistente da MEP, visível em todo o gradiente, corrobora a tese de que métodos baseados em regressão são menos vulneráveis às flutuações amostrais que distorcem os momentos recuperados, reforçando sua preferência para povoamentos sob influência de manejo (SCHÜTZ; ROSSET, 2020).

Assim, os maiores valores de viés, MAE e MSE observados no MRP refletem não apenas limitações matemáticas do método, mas também a dificuldade em representar adequadamente oscilações estruturais típicas de povoamentos manejados ou heterogêneos. De forma geral, os resultados reforçam que a estimativa dos parâmetros via regressão (MEP) apresenta maior capacidade de absorver variações estruturais sem perda de estabilidade, enquanto a recuperação via momentos (MRP) permanece mais vulnerável às perturbações introduzidas pelo manejo e pela variabilidade intrínseca das distribuições diamétricas.

4.3. Volumetria de multiprodutos

A Tabela 10 sintetiza os resultados provenientes da integração entre os modelos de distribuição diamétrica, hipsometria e afilamento, permitindo avaliar de forma consistente a estrutura diamétrica e o estoque volumétrico por classe na idade de rotação (240 meses). Essa projeção foi gerada para um grupo de projeto e parcela a partir da Abordagem 1 – Estimativa dos Parâmetros (MEP), que apresentou os melhores resultados entre os métodos testados.

Tabela 10 – Projeção da estrutura diamétrica e do estoque volumétrico por classe de DAP, obtida a partir da abordagem 1 para um grupo, para um povoamento com 240 meses.

Classe DAP (cm)	Prob.	Freq.	Freq. acumulada	Ht	Nº de toras			Volume total (m³/ha)		
					P1	P2	P3	P1	P2	P3
24-25	0,0455	21,07	21,07	26,02	-	-	5	-	-	83,1357
25-26	0,0559	25,88	46,95	26,29	-	-	5	-	-	111,1512
26-27	0,0669	30,98	77,94	26,53	-	-	5	-	-	144,3711
27-28	0,0779	36,07	114,01	26,75	-	-	5	-	-	181,7040
28-29	0,0878	40,68	154,68	26,95	-	-	6	-	-	242,2489
29-30	0,0955	44,24	198,93	27,12	-	-	6	-	-	283,3652
30-31	0,0997	46,18	245,10	27,27	-	1	4	-	170,4255	150,8224
31-32	0,0992	45,95	291,06	27,40	-	1	4	-	181,2167	160,7142
32-33	0,0934	43,29	334,34	27,50	-	1	4	-	181,9659	161,6535
33-34	0,0826	38,27	372,61	27,58	-	1	4	-	171,1039	152,2009
34-35	0,0679	31,44	404,05	27,63	-	1	5	-	149,2045	150,1538
35-36	0,0512	23,73	427,78	27,66	-	2	3	-	186,5080	54,8831
36-37	0,0351	16,25	444,03	27,67	-	2	3	-	135,0400	39,7528
37-38	0,0215	9,95	453,98	27,66	-	2	3	-	87,2463	25,6659
38-39	0,0116	5,36	459,33	27,62	-	2	3	-	49,4801	14,5305
39-40	0,0054	2,49	461,82	27,56	-	2	3	-	24,1825	7,0815
40-41	0,0021	0,98	462,80	27,47	1	1	2	7,9632	3,1220	1,7270
41-42	0,0007	0,32	463,12	27,36	1	1	2	2,7105	1,0611	0,5839
42-43	0,0002	0,08	463,20	27,23	1	1	2	0,7418	0,2899	0,1585
43-45	0,0000	0,02	463,22	27,07	1	1	2	0,1587	0,0619	0,0336
Total	-	463,22	-	-	4	19	76	11,57	1340,91	1965,94

Fonte: Autor (2025).

A estrutura diamétrica apresentada na Tabela 10 evidencia que os ajustes realizados foram capazes de reproduzir adequadamente o comportamento esperado para povoamentos equiâneos, refletindo padrões clássicos de concentração de frequências nas classes centrais e redução natural nas extremidades, representando um indicativo de boa aderência estatística e coerência biológica do modelo aplicado (BAILEY; DELL, 1973). A predominância de classes intermediárias e a estabilização da altura média são consistentes com padrões observados em povoamentos maduros de *Tectona grandis* e outras essências tropicais manejadas.

Além disso, a suavidade das transições entre as classes, aliada à ausência de oscilações abruptas ou distorções nas frequências acumuladas, reforça a qualidade das projeções geradas

pelas equações que integram o MEP. Estudos como os de Cao (2004) e Palahí, Pukkala e Trasobares (2006) destacam que a estabilidade das frequências projetadas é um dos principais indicadores da eficiência das equações utilizadas para prever os parâmetros da Weibull em idades futuras. Assim, a coerência observada sugere que o modelo não apenas ajustou a distribuição atual, mas também extrapolou adequadamente para a idade projetada, mantendo proporcionalidade estrutural, característica essencial em prognoses de crescimento e produção (CAMPOS; LEITE, 2017).

A consistência estrutural também demonstra que os parâmetros estimados pelo MEP responderam adequadamente às relações funcionais estabelecidas entre idade, atributos do povoamento e parâmetros da distribuição. Tal observação é relevante, considerando que a Weibull, apesar de amplamente flexível, é sensível a pequenas variações nos parâmetros de forma (α) e escala (β), que determinam a assimetria e a concentração da frequência diamétrica (CAO, 2004; PALAHÍ; PUKKALA; TRASOBARES, 2006). O comportamento observado na projeção confirma que essa sensibilidade foi bem controlada no ajuste.

A produção volumétrica acompanhou a distribuição diamétrica, resultando em maior volume no Produto 3, pois a maioria das árvores está nas classes intermediárias e atende apenas ao diâmetro mínimo de 16 cm. Já os Produtos 1 e 2 tiveram menor participação devido ao reduzido número de árvores com diâmetros superiores. Esse padrão é comum em povoamentos de *Tectona grandis* de idades semelhantes e condiz com o comportamento esperado segundo análises de sortimentos em plantações tropicais, alinhando-se a evidências apresentadas por Miranda et al. (2018), que associam forte concentração do volume total às classes médias de diâmetro em povoamentos manejados.

A projeção também revela os efeitos de intervenções silviculturais. Os ajustes envolveram diferentes níveis de complexidade estrutural, especialmente devido aos desbastes sistemáticos e seletivos aplicados ao longo do ciclo, que influenciam diretamente a amplitude e a simetria da distribuição diamétrica. Estudos como os de Podlaski (2017) e Teimouri, Doser e Finley (2019) demonstram que o desbaste aumenta a heterogeneidade estrutural e pode afetar o desempenho das funções de distribuição no processo de projeção.

Por fim, a coerência da projeção depende diretamente da estrutura observada na idade atual, reforçando a importância de caracterizar adequadamente os dados iniciais. Como apontado por Bailey e Dell (1973), modelos paramétricos preservam a lógica estrutural do povoamento ao longo do horizonte de previsão, mas eventuais lacunas ou distorções iniciais podem amplificar incertezas ao longo das idades projetadas. Além disso, análises estruturais recentes, como Podlaski (2017), ressaltam que a variabilidade estrutural pós-desbaste tende a

aumentar a incerteza na projeção do estoque volumétrico futuro, o que reforça a necessidade de cautela na utilização do método.

5. CONCLUSÃO

A função Weibull de dois parâmetros mostrou-se eficiente para descrever a distribuição diamétrica de povoamentos de *Tectona grandis*, mesmo sob desbastes. A abordagem via regressão (MEP) apresentou maior precisão e estabilidade na estimativa dos parâmetros em comparação à recuperação via momentos (MRP). Os ajustes hipsométricos e de afilamento permitiram estimar com confiabilidade o estoque volumétrico por classe de diâmetro, refletindo padrões biológicos consistentes ao longo do tempo.

Dessa forma, a integração entre a função Weibull de dois parâmetros, equações hipsométricos e de afilamento configura um sistema preditivo capaz de descrever a distribuição diamétrica e projetar a produção futura de madeira por multiprodutos, atendendo ao objetivo proposto. Esse sistema se mostra uma ferramenta confiável para prognose de crescimento e produção em plantações tropicais de *Tectona grandis* no Mato Grosso, Brasil, subsidiando o planejamento florestal e a tomada de decisão em diferentes cenários de manejo.

REFERÊNCIAS

- ALVARES, C. A. et al. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711 – 728, 2013.
- ASSMANN, E. **The principles of forest yield study**: studies in the organic production, structure, increment and yield of forest stands. Oxford: Pergamon, 1970.
- BAILEY, R. L.; DELL, T. R. Quantifying diameter distributions with the Weibull function. **Forest Science**, v. 19, n. 2, p. 97–104, 1973.
- BINOTI, D. H. B. et al. Eficiência das funções Weibull e Hiperbólica para descrição de distribuições diamétricas de povoamentos de *Tectona grandis*. *Revista Árvore*, v. 34, n. 2, p. 305-313, 2010.
- BINOTI, D. H. B. et al. Uso da função Weibull de três parâmetros em plantios submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, v. 34, p. 147–156, 2010.
- BURK, T. E., NEWBERRY, J. D. A simple algorithm for moment-based recovery of Weibull distribution parameters. **Forest Science**, v. 30, n. 1, p. 329-332, 1984.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 4. ed. Viçosa: UFV, 2017. 605 p.

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

CLUTTER, J. L. Compatible growth and yield models for loblolly pine. **Forest Science**, v. 9, n. 3, p. 354-371, 1963.

COSTA, L. S. et al. Projeção de distribuição diamétrica de povoamento comercial de eucalipto utilizando área basal. **Scientia Forestalis**, v. 47, n. 122, 2019.

DAMÁSIO M, et al. Desbaste seletivo em um povoamento de *Tectona grandis* implantado em sistema de integração-lavoura-pecuária-floresta. **Biodiversidade**, v. 14, n. 3, p. 74-83, 2015.

DIÉGUEZ-ARANDA, U. et al. Dynamic growth model for Scots pine (*Pinus sylvestris* L.) plantations in Galicia (north-western Spain). **Ecological Modelling**, v. 191, n. 2, p. 225-242, 2006.

EGONMWAN, I. Y.; OGANNA, F. N. Application of diameter distribution model for volume estimation in *Tectona grandis* L.f. stands in the Oluwa forest reserve, Nigeria. **Tropical Plant Research**, v. 7, n. 3, p. 573–580, 2020.

GORGOSO, J. J. et al. Modelling diameter distributions of *Betula alba* L. stands in northwest Spain with the two-parameter Weibull function. **Forest Systems**, v. 16, n. 2, p. 113-123, 2007.

HUBBELL, S. P. The Unified Neutral Theory of Biodiversity and Biogeography. **Princeton University Press**, 2001.

HYINK D. M.; MOSER J. W. A generalized framework for projecting forest yield and stand structure using diameter distributions. **Forest Science**, v. 29, n. 1, p. 85-95, 1983.

IBÁ. Relatório Anual 2025. Indústria Brasileira de Árvores, 2025. Disponível em: <https://iba.org/wp-content/uploads/2025/10/relatorioAnual2025.pdf>. Acesso em: 11 out de 2025.

IRINMWINUWA, E. O. et al. A comprehensive review of phytochemistry and antibacterial action of *Tectona grandis*. **International Journal of Science and Research Archive**, v. 9, n. 2, p. 133-143, 2023.

KANGAS, A.; MALTAMO, M. Calibrating predicted diameter distribution with additional information. **Forest Science**, v. 46, n. 1, p. 390–396, 2000.

KOLLERT, W.; SANDEEP, S.; SREELAKSHMY, M. P. Global Teak Resources and Market Assessment 2022. IUFRO World Series, v. 44, 92 p. Viena, 2024.

KÖPPEN, W. *Climatologia: con un estudio de los climas de la tierra*. México: Fondo de Cultura Económica, 1948. 478 p.

LEITE, H. G. et al. Um modelo de distribuição diamétrica para povoamentos de *Tectona grandis* submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, v. 30, n. 1, p. 11-20, 2006.

- LEITE, H. G.; BINOTI, D. H. B. Avaliação do ajuste das funções Weibull e Hiperbólica a dados de povoamentos de eucalipto submetidos a desbaste. **Scientia Forestalis**, n. 82, p. 39–48, 2009.
- LINDSAY, S. R.; WOOD, G. R.; WOOLLONS, R. C. Modelling the diameter distribution of forest stands using the Burr distribution. **Journal of Applied Statistics**, v. 23, n. 1, p. 609–619, 1996.
- MADI, J. P. S. et al. Univariate models to represent the diametric distribution of thinned stand of *Tectona grandis* Linn. F. **Advances in Forestry Science**, v. 4, n. 2, p. 119–123, 2017.
- MEDEIROS, R. A. et al. Idade técnica do primeiro desbaste de povoamentos de teca em diferentes espaçamentos. **Scientia Forestalis**, v. 45, n. 116, p. 705–716, 2017.
- MIRANDA, R. et al. Prediction system for diameter distribution and wood production of *Eucalyptus*. **Floresta e Ambiente**, v. 25, n. 3, e20160548, 2018.
- NANANG, D. M. Suitability of the Normal, Log-normal and Weibull distributions for fitting diameter distributions of neem plantations in Northern Ghana. **Forest Ecology and Management**, v. 103, p. 1–7, 1998.
- NEWBY, M. The properties of moment estimators for the Weibull distribution based on the sample coefficient of variation. **Technometrics**, v. 22, n. 1, p. 187–194, 1980.
- NOGUEIRA, G. S. *Modelagem do crescimento e da produção de povoamentos de Eucalyptus sp. e de Tectona grandis submetidos a desbaste*. 2003. 132 p. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) — Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2003.
- NOGUEIRA, G. S. et al. Avaliação de um modelo de distribuição diamétrica ajustado para povoamentos de *Tectona grandis* submetidos a desbaste. **Revista Árvore**, v. 30, n. 3, p. 295–303, 2006.
- OLIVEIRA NETO, S. N. et al. Crescimento e distribuição diamétrica de *Eucalyptus camaldulensis* em diferentes espaçamentos e níveis de adubação na região de Cerrado de Minas Gerais. **Floresta**, v. 40, n. 4, p. 755–762, 2010.
- PALAHÍ, M.; PUKKALA, T.; TRASOBARES, A. Modelling the diameter distribution of *Pinus* spp. using a truncated Weibull function. **Forestry**, v. 79, n. 5, p. 553–562, 2006.
- PODLASKI, R. Forest modelling: the gamma shape mixture model and simulation of tree diameter distributions. **Annals of Forest Science**, v. 74, 29, 2017.
- PODLASKI, R.. Two-component mixture models for diameter distributions in mixed-species, two-age cohort stands. **Forest Science**, v. 56, n. 4, p. 379–390, 2010.
- POSIT SOFTWARE, PBC. RStudio: Integrated Development for R. Versão 2024.09.1+394. Boston: Posit Software, 2024. Disponível em: <https://posit.co/>. Acesso em: 6 dez. 2025.

SANDOVAL, S. et al. Predicting parameters of Weibull probability density function for diametric distributions in *A. melanoxydon*, *E. camaldulensis* and *E. nitens* bioenergy plantation. **Dendrobiology**, v. 86, 2021.

SANQUETTA, C. R. et al. Modelagem para prognose precoce do número de árvores e área basal por classe diamétrica para **Tectona grandis**. **Naturalia**, v. 34, p. 62–85, 2011.

SANTOS, M. C. et al. Inventário Florestal Utilizando Técnicas de Silvicultura de Precisão em Povoamentos de *Eucalyptus grandis* Hill ex Maiden. **Floresta e Ambiente**, v. 24, 2017.

SCHMIDT, L. N. et al. On the use of the Weibull distribution in modeling and predicting diameter distributions of forest stands. **Canadian Journal of Forest Research**, v. 50, n. 4, p. 368–381, 2020.

SCHNEIDER, P. R.; SCHNEIDER, P. S. P. **Introdução ao manejo florestal**. 2. ed. Santa Maria: FACOS-UFSM, 2008. 566 p.

SCHRODER, T. et al. Funções de densidade probabilística para predição da distribuição diamétrica em plantios de *Eucalyptus dunni*. **Revista do Instituto Florestal**, v. 28, n. 2, p. 111–117, 2016.

SCHÜTZ, J. P.; ROSSET, C. Performances of different methods of estimating the diameter distribution based on simple stand structure variables in monospecific regular temperate European forests. **Annals of Forest Science**, v. 77, art. 47, 2020.

SHIFLEY, S. R.; LENTZ, E. L. Quick estimation of the three-parameter Weibull to describe tree size distributions. **Forest Ecology and Management**, v. 13, p. 195-203, 1985.

SOUZA, A. P. et al. Classificação climática e balanço hídrico climatológico no estado de Mato Grosso. **Nativa**, v. 1, n. 1, p. 34-43, 2013.

TEIMOURI, M.; DOSER, J. W.; FINLEY, A. O. ForestFit: An R package for modeling tree diameter distributions. preprint, 2019.

TORRES-ROJO, J. M.; MAGAÑA, O. S.; ACOSTA, M. Metodología para mejorar la predicción de parámetros de distribuciones diamétricas. **Agrociencia**, v. 34, n. 1, p. 627-637, 2000.

VENDRUSCOLO, Streck et al. Alterações temporais na distribuição diamétrica de teca em diferentes espaçamentos. **Nativa**, v. 8, n. 2, p. 210-215, 2020.

TERCEIRA PARTE – CONSIDERAÇÕES FINAIS

O presente estudo demonstrou que a função Weibull de dois parâmetros é adequada para modelar a distribuição diamétrica de povoamentos de *Tectona grandis*, apresentando boa aderência aos dados observados e permitindo projeções confiáveis de volume de multiprodutos. Entre os métodos avaliados, a Estimativa de Parâmetros (MEP) mostrou desempenho superior à Recuperação de Parâmetros (MRP), evidenciado por menor viés, MAE e MSE, indicando maior precisão e estabilidade nas projeções.

Entretanto, apesar dos bons resultados, algumas limitações devem ser destacadas. O MEP depende de séries temporais robustas e de variáveis estruturais completas, o que pode restringir sua aplicabilidade em plantios com histórico inconsistências nos dados. Por outro lado, o MRP mostrou-se sensível a alterações estruturais provocadas por desbastes e a flutuações na variância e média diamétrica, limitando sua confiabilidade em contextos de manejo intensivo ou irregular.

Além disso, embora o ajuste da Weibull 2P tenha sido satisfatório, observa-se que ambos os métodos apresentam maior imprecisão em classes diamétricas intermediárias, sugerindo que abordagens paramétricas podem não capturar totalmente a heterogeneidade estrutural dos povoamentos tropicais manejados. Esse ponto revela a necessidade de pesquisas futuras capazes de aprimorar a previsão da distribuição diamétrica em povoamentos desbastados.

Em síntese, o estudo reforça a utilidade da MEP para projeção de estrutura diamétrica e volumetria em *Tectona grandis*, mas recomenda cautela na generalização dos resultados para outros contextos de manejo, destacando a importância de dados contínuos e de acompanhamento do efeito dos desbastes na dinâmica estrutural do povoamento.