

UNIVERSIDADE FEDERAL DE VIÇOSA

Quantificação do volume de madeira empilhada utilizando apenas contagem de toras

Pedro Henrique Fontes dos Santos
Magister Scientiae

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

PEDRO HENRIQUE FONTES DOS SANTOS

Quantificação do volume de madeira empilhada utilizando apenas contagem de toras

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

Orientador: Helio Garcia Leite

**VIÇOSA - MINAS GERAIS
2025**

**Ficha catalográfica elaborada pela Biblioteca Central da Universidade
Federal de Viçosa - Campus Viçosa**

T

S237q
2025 Santos, Pedro Henrique Fontes dos, 1997-
Quantificação do volume de madeira empilhada utilizando apenas contagem de toras / Pedro Henrique Fontes dos Santos. – Viçosa, MG, 2025.

1 dissertação eletrônica (114 f.): il. (algumas color.).

Inclui apêndices.

Orientador: Hélio Garcia Leite.

Dissertação (mestrado) - Universidade Federal de Viçosa, Departamento de Engenharia Florestal, 2025.

Referências bibliográficas: f. 46-50.

DOI: <https://doi.org/10.47328/ufvbbt.2025.582>

Modo de acesso: World Wide Web.

1. Madeira serrada - Medição - Métodos estatísticos.
2. Análise volumétrica - Métodos estatísticos. I. Leite, Hélio Garcia, 1960-. II. Universidade Federal de Viçosa. Departamento de Engenharia Florestal. Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal. III. Título.

GFDC adapt. CDD 634.95243

PEDRO HENRIQUE FONTES DOS SANTOS

Quantificação do volume de madeira empilhada utilizando apenas contagem de toras

Dissertação apresentada à Universidade Federal de Viçosa, como parte das exigências do Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal, para obtenção do título de *Magister Scientiae*.

APROVADA: 4 de agosto de 2025.

Assentimento:

Pedro Henrique Fontes dos Santos
Autor

Helio Garcia Leite
Orientador

Essa dissertação foi assinada digitalmente pelo autor em 09/09/2025 às 20:25:09 e pelo orientador em 10/09/2025 às 16:38:50. As assinaturas têm validade legal, conforme o disposto na Medida Provisória 2.200-2/2001 e na Resolução nº 37/2012 do CONARQ. Para conferir a autenticidade, acesse <https://siadoc.ufv.br/validar-documento>. No campo 'Código de registro', informe o código **ZJWU.A4TU.5PIW** e clique no botão 'Validar documento'.

AGRADECIMENTOS

Primeiramente, agradeço a Deus por me dar saúde, força e perseverança para superar cada desafio desta jornada. Sem a Sua presença e sustento, eu não teria chegado até aqui.

Ao meu orientador, Professor Helio Garcia Leite, minha mais profunda gratidão. Por ser um exemplo não só no âmbito acadêmico, mas também no pessoal, agradeço imensamente por sua paciência, por guiar meus passos com sabedoria e rigor científico, por me desafiar a ir além e pela confiança depositada em mim. Seus ensinamentos ultrapassaram os limites da academia e serão levados por toda a minha vida. Muito obrigado pelo apoio incondicional em todos os momentos.

Aos membros da banca examinadora, Professores Drs. Carlos Pedro Boechat Soares, Gilciano Saraiva Nogueira e ao Dr. Daniel Henrique Breda Binoti, meu sincero agradecimento pelo tempo dedicado e pelas valiosas contribuições que enriqueceram este trabalho.

Agradeço à Universidade Federal de Viçosa (UFV) pela excelência de ensino e pela estrutura oferecida. Estendo minha gratidão a todos os professores e funcionários do Departamento de Engenharia Florestal, que sempre contribuíram para minha formação.

Aos meus colegas do departamento, minha sincera gratidão. A jornada foi mais leve graças às discussões científicas, à ajuda mútua nos experimentos e, principalmente, à amizade que construímos. Essa amizade foi um pilar, e minha gratidão se estende a todos os amigos que se fizeram presentes com palavras de incentivo, confiança e com o ombro amigo para me escutar. Vocês me deram o fôlego necessário para continuar e a alegria não só para transpor cada obstáculo, mas para viver.

À minha família, meu porto seguro e minha maior inspiração. Aos meus pais, José Batista dos Santos e Maria das Graças Fontes Santos, por todo o amor, sacrifício e por acreditarem em mim mesmo quando eu duvidava. À minha irmã, Maria Aline Fontes dos Santos, por ser meu maior exemplo de força e resiliência. Aos meus sobrinhos, Maria Clara, Gael e Ravi, por serem minha inspiração e fonte de força para buscar um mundo melhor. Aos meus avós Agostinho, Zilda, João (in memoriam) e Sebastiana (in memoriam), por me inspirarem a ser uma pessoa melhor e a lutar pelos meus ideais e sonhos. À toda a minha família, por me trazer inspiração, dar exemplos e apoiar-me incondicionalmente. A todos vocês, meu eterno amor.

Por fim, meu mais sincero agradecimento a todos que, de alguma forma, impactaram minha vida e contribuíram para que este objetivo fosse alcançado.

Este trabalho foi realizado com o apoio das seguintes agências de pesquisa brasileiras: Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior – Brasil (CAPES) – Código de Financiamento 001, Fundação de Amparo à Pesquisa do Estado de Minas Gerais (FAPEMIG) e Conselho Nacional de Desenvolvimento Científico e Tecnológico (CNPq).

RESUMO

SANTOS, Pedro Henrique Fontes dos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, agosto de 2025. **Quantificação do volume de madeira empilhada utilizando apenas contagem de toras.** Orientador: Helio Garcia Leite.

Este estudo teve por objetivo desenvolver e validar um método para quantificar o volume sólido de madeira empilhada utilizando apenas a contagem do número de toras e da distribuição diamétrica derivada de inventários florestais, eliminando a necessidade de medições diretas nas pilhas. Para isso, foram utilizados dois conjuntos de dados: um proveniente de inventários pré-corte de povoamentos de eucalipto, que serviu de base para simulações do corte mecanizado com modelos de afilamento, e outro composto por medições diretas de toras empilhadas em campo, aplicando as fórmulas de Smalian e Huber com interpolações. A metodologia parte da premissa de que há aleatoriedade no empilhamento das toras, assim, ora os maiores diâmetros de cada tora estão dispostos para um lado, ora para outro, com isso as distribuições de diâmetro nas duas faces da pilha podem ser estatisticamente iguais, e isto foi confirmado pelo teste de Kolmogorov-Smirnov, em 124 pilhas avaliadas. O modelo de afilamento de Garay foi selecionado como o mais preciso para simular toras comerciais de 6 metros de comprimento e gerar distribuições empíricas e teóricas dos diâmetros. Foram ajustadas as distribuições estatísticas Johnson SB e Weibull Exponenciada, dentre outras, para avaliar a aderência aos dados da distribuição diamétrica observada. Quatro cenários de aplicação foram avaliados, dois baseados em dados simulados do inventário e dois em dados reais das toras mensuradas. Os erros relativos médios dos volumes estimados variaram de 0,09% a 3,78%, sendo as menores diferenças obtidas com o uso de distribuições teóricas ajustadas, o que evidencia a robustez e precisão do método avaliado neste estudo. Os resultados demonstram que é possível quantificar o volume sólido de pilhas de madeira, dispensando medições in loco nas pilhas de toras, desde que haja as medições de inventário florestal. O uso do método é indicado no caso de necessidade de automação, escalabilidade e redução de custos nos processos de quantificação volumétrica na indústria florestal.

Palavras-chave: quantificação volumétrica; modelagem estatística; pilhas de madeira; volume de toras; eucalipto

ABSTRACT

SANTOS, Pedro Henrique Fontes dos, M.Sc., Universidade Federal de Viçosa, August, 2025. **Quantification of stacked timber volume using only log counting.** Adviser: Helio Garcia Leite.

This study aimed to develop and validate a method to quantify the solid volume of stacked wood using only the count of logs and the diameter distribution derived from forest inventories, eliminating the need for direct measurements in the piles. For this purpose, two datasets were used: one from pre-harvest inventories of eucalyptus stands, which served as the basis for simulations of mechanized cutting with taper models, and another composed of direct field measurements of stacked logs, applying Smalian's and Huber's formulas with interpolations. The methodology relies on the premise that there is randomness in the stacking of logs; thus, sometimes the largest diameters of each log are positioned to one side and sometimes to the other, making the diameter distributions on both faces of the pile statistically equivalent, a result confirmed by the Kolmogorov–Smirnov test in 124 evaluated piles. Garay's taper model was selected as the most accurate for simulating commercial logs of 6 meters in length and for generating empirical and theoretical diameter distributions. Statistical distributions such as Johnson SB and Exponentiated Weibull, among others, were fitted to assess adherence to the observed diameter distribution data. Four application scenarios were evaluated: two based on simulated inventory data and two on real measured log data. The mean relative errors of the estimated volumes ranged from 0.09% to 3.78%, with the smallest differences obtained using fitted theoretical distributions, highlighting the robustness and accuracy of the method evaluated in this study. The results demonstrate that it is possible to quantify the solid volume of wood piles without in situ log pile measurements, provided that forest inventory measurements are available. The use of this method is recommended when automation, scalability, and cost reduction are required in volumetric quantification processes in the forest industry.

Keywords: volumetric quantification; statistical modeling; stack of wood; log volume; eucalyptus

LISTA DE ILUSTRAÇÕES

Figura 1 - Sistema automático para estimar o volume de toras de madeira LogMeter	17
Figura 2 – Fluxograma metodológico das etapas de coleta, processamento e análise dos dados nos quatro cenários avaliados	27
Figura 3 – Percentagem de casos (eixo y) por classe de p -valor do teste de Kolmogorov-Smirnov (eixo x). As barras correspondem às distribuições descartadas e a linha pontilhada e números em vermelho correspondem às distribuições selecionadas para o Banco de dados 1	30
Figura 4 – Histograma de frequência dos diâmetros simulados a partir do inventário pré-corte e curva de densidade da distribuição Beta ajustada	31
Figura 5 – Percentagem de casos (eixo y) por classe de p -valor do teste de Kolmogorov-Smirnov (eixo x). As barras correspondem às distribuições descartadas e a linha pontilhada e números em vermelho correspondem às distribuições selecionadas para o Banco de Dados 2	32
Figura 6 – Histograma de frequência dos diâmetros medidos em campo e curva de densidade da distribuição Johnson SB ajustada	33
Figura 7 – Dispersão e histograma de frequência das diferenças percentuais entre os volumes estimados pelo Cenário I e II em relação ao volume de referência	36
Figura 8 – Dispersão e histograma de frequência das diferenças percentuais entre os volumes estimados pelo Cenário III em relação ao volume de referência	37
Figura 9 - Dispersão e histograma de frequência das diferenças percentuais entre os volumes estimados no Cenário IV em relação ao volume de referência	40

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 - Exemplo de estatísticas descritivas dos diâmetros (cm) de faces opostas para uma pilha representativa e p-valor para o teste não paramétrico de Kolmogorov-Smirnov (KS) aplicado para comparar as distribuições de diâmetros das duas faces da pilha	28
Tabela 2 - Estatísticas de avaliação dos modelos de afilamento para projetos representativo em três ocasiões (ano de inventário florestal), para a variável <i>d</i> (diâmetro comercial em cm)	29
Tabela 3 – Resumo dos volumes (m ³) obtidos no Cenário I, agrupados por projeto.	34
Tabela 4 – Resumo dos volumes (m ³) para o Cenário II, agrupados por projeto	34
Tabela 5 – Resumo comparativo dos volumes (m ³) para o Cenário I e II, agrupados por projeto	35
Tabela 6 – Resumo dos volumes (m ³) para o Cenário III, agrupados por projeto	37
Tabela 7 – Resumo dos volumes (m ³) para o Cenário IV, agrupados por projeto.....	39
Tabela 8 – Resumo comparativo dos volumes (m ³) obtidos nos Cenários III e IV, agrupados por projeto	39

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	10
2. OBJETIVOS	14
3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA	15
4. MATERIAIS E MÉTODOS.....	20
4.1. Dados.....	20
4.2. Distribuição diamétrica das faces das pilhas.....	21
4.3. Simulação do corte mecanizado	21
4.4. Distribuição estatística dos diâmetros das toras	23
4.5. Cenários utilizados na validação do método de quantificação do volume de madeira empilhada.....	25
5. RESULTADOS	28
5.1. Validação da similaridade da distribuição de diâmetros das duas faces das pilhas.....	28
5.2. Modelagem do afilamento do fuste e definição da distribuição de diâmetros	29
5.2.1. Definição da distribuição de diâmetros das toras com dados simulados	29
5.2.2. Definição da distribuição de diâmetros com dados da medição direta .	31
5.3. Quantificação do volume sólido e validação dos cenários	33
5.3.1. Cenário I	33
5.3.2. Cenário II	34
5.3.3. Cenário III	36
5.3.4. Cenário IV.....	38
6. DISCUSSÃO	41
5. CONCLUSÕES	45
REFERÊNCIAS.....	46
APÊNDICE A.....	51
APÊNDICE B.....	59
APÊNDICE C	63
APÊNDICE D	64
APÊNDICE E.....	83
APÊNDICE F.....	105
APÊNDICE G.....	110

1. INTRODUÇÃO

A quantificação do volume sólido de madeira em povoamentos equiâneos é imprescindível para a implementação de planos de manejo florestal. Para quantificar esse volume executa-se um inventário florestal que consiste na medição de parte da população, isto é, de unidades amostrais (parcelas), para depois extrapolar os resultados para a área total. Assim, visando planejar as operações florestais, têm-se estimativas da quantidade, qualidade e distribuição espacial da madeira disponível (Leite e Andrade, 2002).

Algumas fórmulas aproximativas do volume de toras já foram propostos sendo mais conhecidas e utilizadas as de Smalian, Newton e Huber. Conforme Campos e Leite (2017), para o emprego dessas fórmulas é necessário medir os diâmetros nas extremidades da tora, além de seu comprimento. Esses diâmetros podem ser medidos utilizando fita métrica ou suta (Bernardi, L. K. 2024). A aplicação sucessiva de uma dessas fórmulas nas seções do fuste, resulta na totalização de seu volume de madeira, ou seja, no volume sólido do fuste e, até mesmo, da árvore. A exatidão do volume sólido do fuste depende do tamanho das seções (comprimento) e da forma de seção (de cada tora). Quanto menor a seção maior a exatidão, para qualquer fórmula aproximativa (Domiciano *et al.*, 2025)

Este processo de determinação do volume do fuste (v), denominado como *cubagem*, é complementado pela medição do *dap* e da altura total (h_t) da árvore-amostra. Após a cubagem de um número (n) representativo de árvores-amostra (árvores selecionadas para cubagem), obtém-se uma amostra de dados de dap_i , h_{ti} e v_i , $i = 1, 2, \dots, n$, que são utilizados para ajuste de modelos volumétricos ou afilamento do fuste (*taper*). As equações ajustadas são utilizadas para estimar o volume de árvores em pé e, assim, totalizar o volume de madeira em cada parcela de inventário.

O processo descrito tem como foco a quantificação do volume de madeira antes da colheita florestal, por exemplo, no inventário de pré-corte (inventário feito visando planejar o corte). No caso de povoamentos comerciais de eucalipto, após o corte, a madeira é baldeada para a margem dos talhões onde fica empilhada por um certo período. Posteriormente ela transportada para as fábricas ou pátios intermediários. Muitas vezes a madeira empilhada à margem do talhão também precisa ser mensurada, de modo que seja possível estimar eventual perda de madeira nesta etapa.

Quando a madeira chega à fábrica ela precisa ser novamente mensurada. Essa mensuração pode ser feita utilizando fatores médios de empilhamento, fatores de conversão de peso para volume, deslocamento de água ou escaneamento e posterior uso de estimadores de regressão (LogMeter). Embora bastante prático, a exatidão de sistemas como o LogMeter, em grande escala, requer constante calibração de seu estimador de regressão (Campos e Leite, 2017) e isto envolve um esforço amostral considerável.

Quando a madeira já está empilhada, seja no campo, pátio intermediário, na carreta de transporte, em unidades de produção de carvão, em pátios de madeira de uma indústria de celulose etc., diferentes métodos podem ser utilizados para a mensuração do volume sólido. Alguns exemplos são o uso de imagens fotográficas no *software* Digitora, para a determinação de fatores de empilhamento e posterior conversão em volume sólido (Bertola *et al.*, 2003), e o processamento de imagens digitais com emprego de redes neurais artificiais (sistema *Neurodic*) (Silveira, 2014). Outros exemplos de métodos para a quantificação do volume de madeira nas pilhas, utilizando imagens digitais, são os sistemas Timbeter (Moskalik *et al.*, 2022) e PixLog (PixLog, 2020). É importante lembrar o emprego de qualquer desses sistemas requer medições nas pilhas de madeira e, ou, processamento de imagens.

Todo procedimento de medição de madeira tem seus erros, que em grande escala são relativamente pequenos. Isto significa que não se trata de medição de madeira e sim de uma aproximação ou estimação do volume sólido. Nas soluções Timbeter e PixLog há o erro natural de “medição” dos diâmetros das toras, além dos erros de amostragem e de não amostragem que ocorrem no caso de pilhas relativamente grandes; no Digitora há o erro de aproximação ao quantificar o estéreo e o erro de processamento da imagem; no Neurodic e similares há possibilidade de erro no fator de empilhamento e possíveis erros de predição da rede neural artificial; no LogMeter há o erro estatístico do estimador de regressão utilizado para converter estéreo em m^3 e, também, a possibilidade de erro no próprio escaneamento; no xilômetro há o erro devido a impurezas e modificações na densidade; no caso de escaneamento com Lidar há erros devido ao próprio escaneamento, algoritmos de processamento e, se for o caso, fator de empilhamento. Além disso, à exceção do xilômetro, sempre há o erro, de difícil controle, devido a variações de comprimento das toras e da forma exata das mesmas.

Não há, dentre os métodos mencionados, um sistema de medição de volume sólido de pilhas de madeira que possa ser reconhecido como método de medição. Ou seja, qualquer dos procedimentos ou métodos mencionados, se repetidos a uma mesma pilha irá gerar resultados que podem ser diferentes. Esses fatos levam à formulação das seguintes hipóteses:

Ho(1): é impossível estimar o volume sólido de madeira de uma pilha de toras sem fazer algum tipo de medição em toras e na própria pilha (dimensões da pilha)!

Ho(2): é impossível estimar o volume sólido de uma pilha de toras utilizando apenas a informação sobre o número total de toras presentes na pilha!

Atualmente com a evolução tecnológica, a utilização de sensores remotos, veículos aéreos não tripulados (VANT e drones) com sensores LIDAR, algoritmos de aprendizado de máquina, IoT (Internet das Coisas), e outras tecnologias, têm disso cada vez mais frequente. Em parte o objetivo é reduzir, o tempo gasto para a medição de variáveis a campo e o tempo de processamento dos dados (Lopes, L. S. S. 2020; Stolle, 2021; Leite *et al.*, 2022; Tavares Júnior *et al.*, 2022).

Drones equipados com tecnologia capaz de capturar uma variedade de dados de imagem, em múltiplos espectros, ou outros meios de coleta de dados, como o LiDAR, formam a base para seu uso nas florestas. Em combinação com o constante avanço dos algoritmos de aprendizado de máquina e visão computacional, uma série de vantagens podem ser observadas (Buchelt *et al.* 2024). Com o avanço das tecnologias, as técnicas de medição estão se transformando, incorporando novos recursos computacionais e sendo constantemente atualizadas de acordo com as inovações tecnológicas.

Segundo Casas *et al.* (2023), o modelo YOLO-8 demonstrou ser uma ferramenta eficaz para a automação da contagem de madeira empilhada de eucalipto. Ele fornece informações valiosas para otimizar os processos de contagem de toras, melhorando a eficiência na indústria florestal. Além disso, o modelo automatizado pode agilizar significativamente o processo manual, economizando tempo e recursos. Técnicas de IA mais modernas e extremamente recentes permitem não só a contagem como também a mensuração das dimensões de diferentes objetos.

O YOLO é uma das abordagens de detecção de objetos baseadas em redes neurais profundas (DNN), destacando-se tanto pela velocidade quanto pela precisão (Fang; Wang; Ren, 2019). Métodos de detecção de objetos baseados em redes neurais profundas são compostos por redes neurais convolucionais (CNN), que têm a

capacidade de extrair características de imagens de forma automática e aprender com diferentes condições ambientais. Com a ampla aplicação das CNN, os métodos de aprendizado profundo superam as limitações das técnicas tradicionais de processamento de imagens, demonstrando um desempenho elevado e ganho de exatidão na detecção de objetos (Chen *et al.* 2019; Wang *et al.* 2020; Liu *et al.* 2021).

2. OBJETIVOS

O presente estudo foi conduzido com os seguintes objetivos:

- a) avaliar a eficiência da metodologia proposta por Casas *et al.*, 2023, excluindo possíveis efeitos de erros de contagem de toras;
- b) definir e validar um procedimento para caracterizar a distribuição de diâmetros de toras comerciais de eucalipto utilizando dados de inventario florestal;
- c) avaliar a operacionalidade de métodos utilizados para quantificação indireta do volume sólido de pilhas de madeira.

3. REVISÃO BIBLIOGRÁFICA

Esta revisão abrange os principais métodos e técnicas aplicados aos inventários florestais pré-corte, destacando tanto as abordagens clássicas quanto as inovações que vêm ampliando as possibilidades de mensuração de variáveis dendrométricas e volumétricas. São apresentados métodos de amostragem tradicionais, avanços em técnicas digitais e os desafios inerentes à integração de diferentes metodologias para otimização dos processos de quantificação.

O inventário florestal pré-corte é uma etapa importante para o manejo florestal, pois visa quantificar com precisão o estoque de madeira disponível, antes da colheita. Esse tipo de inventário difere dos inventários contínuos por demandar uma maior intensidade amostral devido a necessidade de maior exatidão nas estimativas de volume (Campos e Leite, 2017). Ele é fundamental para a tomada de decisão e para a sustentabilidade econômica e ambiental da colheita florestal.

Os métodos clássicos de amostragem (aleatória e sistemática, sem ou com estratificação) têm sido amplamente empregados na definição de parcelas de área fixa ou método de área variável (método de Bitterlich). Alguns autores, como Pereira (2002), compararam a eficiência relativa do método Bitterlich com os métodos de área fixa, discutindo vantagens e limitações para diferentes tipos de povoamentos florestais. De modo geral qualquer dessas alternativas pode resultar em estimativas com exatidão.

O avanço tecnológico tem permitido o uso de Sistemas de Informação Geográfica (SIG), *Global Positioning System* - GPS e sensores Lidar para complementar e aprimorar os inventários pré-corte. Isto tem contribuído para a automação da coleta de dados com objetivo de facilitar o tratamento e a análise dos dados coletados (Pinto *et al.*, 2024).

Apesar dos avanços, os inventários florestais pré-corte ainda enfrentam desafios importantes. A necessidade de balancear a exatidão das estimativas com os custos e o tempo de coleta é um dos principais desafios. A escolha do método (área fixa versus área variável) deve ser baseada nas características do povoamento e na finalidade do inventário.

Estudos recentes têm explorado o uso de métodos que consideram a continuidade espacial das variáveis, oferecendo redução dos custos operacionais, uma vez que podem reduzir a necessidade de amostragem intensiva em cada talhão

(Reis *et al.*, 2022). Além disso, com o avanço computacional das últimas décadas, o uso de ferramentas mais robustas vem sendo feito para melhorar as estimativas do inventário florestal. Por exemplo, Binoti (2013) obteve êxito no uso de redes neurais artificiais (RNA) para estimar alturas em povoamentos equiâneos de eucalipto. Esta estimação de altura de árvores com RNA já é usual em muitas empresas florestais no Brasil (Campos e Leite, 2017).

A quantificação volumétrica de madeira empilhada é um tema importante para a engenharia florestal, com implicações diretas na gestão de recursos, comercialização e planejamento logístico (Azadeh Mobtaker *et al.*, 2021). Tradicionalmente, esse processo baseia-se em dois tipos de quantificação, o volume estéreo e o volume sólido.

O volume estéreo, definido como o espaço ocupado por uma pilha de madeira incluindo os vazios entre as toras, é calculado pelas dimensões externas da pilha (comprimento \times largura \times altura). Já o volume sólido, que representa apenas a madeira propriamente dita, é obtido por meio de cubagem ou pela aplicação de um fator de empilhamento (FE), que converte o volume estéreo em volume sólido (Soares *et al.*, 2011).

O fator de empilhamento é influenciado por múltiplas variáveis, como diâmetro e comprimento das toras, espessura da casca, método de empilhamento (manual ou mecanizado) e tempo de armazenamento no campo (Campos e Leite, 2017). Estudos demonstram que a utilização de um único fator para condições heterogêneas pode levar a erros significativos, justificando a necessidade de métodos mais precisos. Por exemplo, Berti (2019) analisou fatores de empilhamento para eucalipto em diferentes comprimentos, obtendo variações nos fatores.

Para superar estas limitações, técnicas mais avançadas têm sido exploradas. Gouveia Filho *et al.* (2022) propuseram o uso do processamento de fotografias digitais utilizando o software *Digitora*, software que emprega redes de pontos equidistantes para determinação do fator de empilhamento. Estas soluções automatizadas representam avanços importantes na redução de erros humanos e na padronização da mensuração volumétrica.

Além dessas abordagens baseadas em imagem, têm sido empregados sistemas que utilizam sensores laser de alta precisão. O LogMeter, desenvolvido pela empresa Woodtech (2024), é um sistema automático capaz de obter medições volumétricas de alta exatidão e estimar características biométricas da madeira

carregada em carretas de caminhões. Esse sistema emprega tecnologia laser de ponta e proporciona medições confiáveis sem necessidade de intervenção direta do operador, agilizando significativamente o processo de quantificação (Figura 1).

Figura 1 - Sistema automático para estimar o volume de toras de madeira LogMeter



Fonte: Woodtech (2024).

O sucesso no emprego das novas tecnologias resulta em aplicações cada vez mais inovadoras, incluindo técnicas de visão computacional, como o modelo YOLO (*You Only Look Once*), que permite a detecção automatizada e a contagem de objetos (Lin *et al.*, 2025).

O YOLO emergiu como um dos *frameworks* mais revolucionários para detecção de objetos em tempo real, combinando exatidão com eficiência computacional. Desde sua primeira versão em 2016, o YOLO evoluiu incorporando avanços em arquiteturas de redes neurais e técnicas de otimização, tornando-se um padrão em aplicações como segurança, medicina, agricultura e veículos autônomos (Ali e Zhanq, 2024).

Diferentemente dos métodos baseados em regiões (como R-CNN e suas variações), que realizam essas tarefas em etapas separadas, o YOLO processa toda a imagem em uma única passagem pela rede neural, o que lhe confere notável vantagem em termos de velocidade de processamento, tornando-o particularmente adequado para aplicações em tempo real (Redmon *et al.*, 2016).

A evolução arquitetural do YOLO ao longo de suas diferentes versões reflete os avanços mais recentes em aprendizado profundo. A primeira versão (YOLOv1) estabeleceu os princípios fundamentais do sistema, mas apresentava limitações na detecção de objetos pequenos e agrupados (Hussain, 2023). Já o YOLOv3,

introduzido em 2018, trouxe melhorias significativas com a implementação de múltiplas escalas de detecção e a arquitetura *Darknet-53* como *backbone*, permitindo maior precisão sem comprometer a velocidade. (Cai *et al.*, 2020). As versões subsequentes, como YOLOv4 e YOLOv5, incorporaram técnicas avançadas de aumento de dados, redes neurais mais eficientes e mecanismos de atenção, elevando ainda mais o desempenho do sistema (Li e Wu, 2022). A versão YOLOv13 alcançou o estágio de estado da arte, sendo o que se tem de mais eficaz e tecnológico na área no primeiro semestre de 2025 (Lei *et al.*, 2025).

As aplicações práticas do YOLO abrangem um espectro amplo de domínios. Na agricultura de precisão, por exemplo, tem sido utilizado para monitoramento automatizado de cultivos, contagem de frutos e detecção de pragas (Badgujar *et al.*, 2024). No setor industrial, mostra-se valioso para inspeção de qualidade em linhas de produção e gestão de inventário (Hussain, 2023). Na área médica, pesquisas demonstram seu potencial para auxiliar em diversas tarefas, incluindo detecção de lesões, classificação de lesões de pele, identificação de anormalidades da retina, detecção de anormalidades cardíacas, segmentação de tumores cerebrais e detecção de equipamentos de proteção individual (Mohammed *et al.*, 2024). A indústria automotiva também se beneficia dessa técnica de machine learning, empregando-a em sistemas avançados de assistência ao motorista e veículos autônomos (Alahdal *et al.*, 2024). A integração desses métodos com dados de inventário pré-corte, que fornecem a distribuição de diâmetro das árvores e das toras, surge como uma solução promissora para reduzir incertezas.

A combinação de inventário florestal e visão computacional baseia-se na premissa de que a distribuição de diâmetros de toras geradas ao processar dados de inventário de pré-corte não difere da distribuição de diâmetros de toras já colhidas e baldeadas. Ou seja, a premissa é de que é possível simular a produção de toras feita por uma Harvester utilizando apenas dados de *dap* e altura total, de parcelas de inventário, juntamente com uma equação de afilamento do fuste (*taper*).

A oclusão de toras e a necessidade de padronização na captura de imagens ainda são problemas importantes a serem resolvidos em processos de mensuração do volume de pilhas utilizando imagens ou nuvens de pontos. Estudos como o de Portnov *et al.* (2024) reforçam a importância de algoritmos de pós-processamento (ex.: filtros por tamanho ou forma) para melhorar a precisão do YOLO em condições reais.

Além disso, a validação em campo, utilizada para comparar os volumes estimados com cubagem manual, é essencial para calibrar os modelos.

Ou seja, a literatura demonstra que a quantificação volumétrica de madeira empilhada está em transição: de métodos tradicionais, sujeitos a alta variabilidade, para abordagens híbridas que combinam inventário florestal, visão computacional e inteligência artificial. Futuros estudos devem focar na padronização de protocolos de imagem e na expansão dessas técnicas para diferentes espécies e cenários operacionais. Também são esperados estudos que visem automação e automatização da medição das pilhas ou cargas de madeira.

4. MATERIAIS E MÉTODOS

4.1. Dados

Um primeiro conjunto de dados para este estudo foi oriundo de inventários florestais conduzidos em povoamentos de clones de híbridos de *Eucalyptus urophylla* X *Eucalyptus grandis* sob os regimes de auto fuste e talhadia, coletados nos anos de 2022, 2023 e 2024 no estado do Mato Grosso do Sul. Os povoamentos se encontravam em idade entre 7 e 10 anos.

O conjunto de dados de inventário abrange um total de 104 talhões, oriundos de 8 projetos de manejo distintos. A distribuição anual compreende: 43 talhões de 3 projetos em 2022; 27 talhões de 2 projetos em 2023; e 34 talhões de 3 projetos em 2024. O levantamento em campo foi realizado a partir de parcelas de área fixa de 400 m² (20 m x 20 m), onde foram registradas as variáveis dendrométricas e de povoamento. Em cada parcela, foram medidas as circunferências a 1,3 m de altura (*cap*) de todas as árvores, sendo estes valores posteriormente convertidos para *dap*. A altura total (h_t) foi medida em, no mínimo, três árvores por parcela. Para o ajuste de modelos volumétricos e de afilamento, foram dados de cubagem de árvores-amostra abatidas nos talhões. A equação de afilamento ajustada foi utilizada para estimar os diâmetros (d) em diferentes alturas comerciais ao longo dos fustes das árvores. As idades das árvores também foram registradas.

Um segundo conjunto de dados foi proveniente de medição direta de toras com comprimentos e diâmetros variáveis, transportadas do campo ao pátio de uma indústria. A madeira transportada foi descarregada para medição do comprimento e diâmetros de cada tora. As medições diretas dos diâmetros foram feitas assim: uma medição em cada extremidade da tora e outras duas a 2 metros da base e do topo da seção (tora).

Para esse segundo banco de dados, o volume sólido de cada tora foi calculado com as fórmulas de Smalian e de Huber, sem e com a interpolação de seções (Campos e Leite, 2017). O volume calculado pela fórmula de Huber com $2^{100}-1$ interpolações foi considerado como valor paramétrico para as validações subsequentes. Desse modo, para cada carregamento (feixe de madeira), estavam disponíveis o volume calculado com as fórmulas de Smalian e Huber, os diâmetros e comprimento, de cada tora gerada com a equação de afilamento. Considerando todos

os talhões e anos de inventário, foram mensuradas 32.316 toras de madeira em 124 pilhas. Também foi calculada a proporção de toras por classe de diâmetro.

A madeira foi cortada seguindo o comprimento padrão de 6 metros. O diâmetro mínimo de aproveitamento da tora foi fixado em 3 cm, incluindo a casca, sendo esses diâmetros medidos nas extremidades da peça e a 2 metros de cada extremidade, resultando em 4 medições por tora. Algumas toras com comprimento inferior a 6 m são identificadas devido ao aproveitamento na parte superior dos fustes, que visa minimizar resíduos comerciais no campo.

4.2. Distribuição diamétrica das faces das pilhas

A metodologia proposta por esse estudo se baseia em uma premissa fundamental sobre as distribuições diamétricas contidas nas pilhas de toras. A distribuição diamétrica é estatisticamente igual nas duas faces dispostas na pilha montadas em campo, tanto a “Face A”, quanto a “Face B”?

Para validar essa premissa da metodologia de que a análise de uma única face da pilha de madeira é suficiente para representar a totalidade das toras, foi realizada uma análise comparativa da distribuição de diâmetros entre as faces opostas dos carregamentos. Esta análise utilizou os dados de medição direta em campo, onde os diâmetros de todas as toras de cada face foram mensurados. Foi feita uma análise comparativa da distribuição de diâmetros entre as faces opostas de todas as 124 pilhas de madeira mensuradas. Esses dados foram coletados ao longo de três anos (2022, 2023 e 2024) em 104 talhões distintos. Com o intuito de validar estatisticamente as distribuições, foi aplicado a estatística de Kolmogorov-Smirnov (KS).

4.3. Simulação do corte mecanizado

Para simular a produção de toras comerciais e gerar a distribuição de diâmetros estimada foi implementado um código computacional, em linguagem Python, com os seguintes passos:

i) A altura total de árvores mensuradas no inventário de pré-corte foi estimada utilizando a equação obtida pelo ajuste do modelo $h_t = \alpha * \exp(-\exp(\beta - \gamma * dap)) + \varepsilon$, em que α , β e γ são os parâmetros do modelo.

ii) Os dados de 1152 árvores-amostra (medições de diâmetros nas alturas de 0,15m; 0,7m; 1,3m; 2m; e a partir daí a cada 2 metros) foram utilizados para ajuste dos modelos (Campos e Leite, 2017): Demaerschalk (Equação 1), Kozak (Eq2), Ormerod (Equação 3) e Garay (Equação 4). O modelo com melhor desempenho, avaliado por meio de estatísticas como soma de quadrados dos resíduos (SQR), coeficiente de correlação (R), coeficiente de determinação (R²), bias e raiz quadrada do erro médio (RQEM), foi selecionado para cada projeto.

$$\left(\frac{d}{dap}\right)^2 = 10^{2\beta_0} dap^{2\beta_1-2} (ht-h)^{2\beta_2} ht^{2\beta_3} + \varepsilon \quad (1)$$

$$\left(\frac{d}{dap}\right)^2 = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{h}{ht}\right) + \beta_2 \left(\frac{h}{ht}\right)^2 + \varepsilon \quad (2)$$

$$\left(\frac{d}{dap}\right)^2 = \left[\frac{ht-h}{ht-1,30}\right]^{2\beta_1} + \varepsilon \quad (3)$$

$$\frac{d}{dap} = \beta_0 [1 + \beta_1 \ln(1 - \beta_2 h^{\beta_3} ht^{-\beta_3})] + \varepsilon \quad (4)$$

em que:

d = diâmetro com casca ou sem casca em uma altura qualquer (h), em centímetros (cm);

dap = diâmetro com casca medido a 1,30 m do solo, em cm;

h = altura em que ocorre determinado diâmetro d , em metros (m);

ht = altura total, em m;

$\beta_0, \beta_1, \beta_2$ e β_3 = Parâmetros do modelo;

ε = erro aleatório.

iii) a equação de afilamento selecionada foi utilizada para simular a conversão de fustes em toras (Harvester). Para isto foi considerado, ainda: uma altura de toco igual a 0,1 m, um limite comercial de diâmetro de 3 cm e um comprimento de tora de 6 m. Para a última tora de cada fuste considerou-se a possibilidade de produção de toras com pelo menos 1,5 m, simulando a logística operacional do corte com Harvester.

IV) Para cada tora foram registrados os diâmetros nas extremidades e a 50% do seu comprimento. O volume sólido foi calculado com as fórmulas de Huber e de Smalian, sem (Eq5 e Eq6) e com interpolação se secções (Eq7 e Eq 8). O volume calculado

com $2^{100} - 1$ secções para cada tora foi considerado como valor paramétrico e utilizado nas validações.

$$V = g_D \cdot L \quad (5)$$

$$V = \frac{g_{D1} + g_{D2} + g_{D3} + g_{D4}}{4} L \quad (6)$$

$$V_n^S = \frac{h}{4^n} \left(\left(\frac{2^{2n+1} + 1}{6} \right) g_1 + \left(\frac{2^{2n+1} + 1}{6} \right) g_2 + \left(\frac{2^{2n+1} - 1}{3} \right) \sqrt{g_1 g_2} \right) \quad (7)$$

$$V_n^H = \frac{h}{4^n} \left(\left(\frac{4^n + 1}{3} \right) (g_1 + g_2) + \left(\frac{4^n - 1}{3} + 1 \right) \sqrt{g_1 g_2} \right) \quad (8)$$

em que:

g_{D1}, g_{D2}, g_{D3} e g_{D4} = áreas seccionais medidas nas secções 1, 2, 3 e 4, em m^2 ;

g_D = área seccional na secção $L/2$, em m^2 ;

$a_n = 2^n - 1$ interpolações lineares e conhecidas as áreas g_1 e g_2 , além do comprimento $h=L$;

V_n^S , com n natural, o volume pela fórmula de Smalian;

V_n^H , com n natural, o volume pela fórmula de Huber.

V) Os diâmetros obtidos conforme item 4.2.1 foram utilizados para calcular a proporção de dados por classe de diâmetro (com amplitude de 1 cm) e, também, para ajuste de distribuições estatísticas.

4.4. Distribuição estatística dos diâmetros das toras

Tanto os diâmetros simulados a partir do processamento dos dados de pré-corte quanto os diâmetros medidos em cada tora efetivamente transportada foram utilizados para ajuste de distribuições estatísticas. Para cada um desses dois casos, para cada talhão e para cada feixe de madeira transportada, foram ajustadas as distribuições estatísticas.

Para o caso particular do Banco de Dados 1, as toras tiveram seus diâmetros estimados e para melhor simular as condições operacionais da montagem de uma pilha de madeira, seja ela de baldeio ou em um pátio de produção, foram utilizadas, de maneira aleatória, os diâmetros gerados pela simulação das toras, ou seja, ora foi utilizado o diâmetro na base da tora, ora o diâmetro no topo. Para realizar as escolhas dos diâmetros empregou-se a função *randon.choice()* do módulo *random* do *python*

que gera a escolha aleatória. Além disso, foi fixada o a semente aleatória 42 para que o estudo possa ser replicado, utilizou-se a função *random.seed(42)*.

A seleção da melhor distribuição, para cada talhão e tipo de dados (toras simuladas e toras efetivamente transportadas) foi feita com base nos critérios AIC (referência), BIC (referência), p-valor para o teste de Kolmogorov-Smirnov (referência) e análises gráficas das frequências observadas e estimadas por classe de diâmetro de tora. Portanto, para cada tipo de dados foram geradas as proporções observadas de toras por classe de diâmetro e as correspondentes proporções estimadas.

Para o ajuste e a avaliação dos modelos, foram empregados algoritmos do módulo *stats* do pacote *SciPy*, versão 1.15.0 (Gommers *et al.*, 2025), implementado em linguagem Python. Foram avaliadas as seguintes distribuições estatísticas presentes no pacote: Beta (*beta*), Burr (*burr*), Erlang (*erlang*), "Fatigue-Life" (*fatiguelife*), Gama (*gamma*), Gama Dupla (*dgamma*), Log-Gama (*loggamma*), Gompertz (*gompertz*), Gumbel Direita (*gumbel_r*), Gumbel Esquerda (*gumbel_l*), Hiperbólica Secante (*hypsecant*), Johnson SB (*johnsonsb*), Johnson SU (*johnsonsu*), Logística (*logistic*), Log-Normal (*lognorm*), Nakagami (*nakagami*), Normal (*norm*), Normal Assimétrica (*skewnorm*), Normal Generalizada (*gennorm*), Normal Potencial (*powernorm*), Normal Truncada (*truncnorm*), Normal Modificada Exponencialmente (*exponnorm*), Pearson Tipo III (*pearson3*), t de Student não Central (*nct*), Valor Extremo Generalizado (*genextreme*), Weibull Dupla (*dweibull*), Weibull Exponenciada (*exponweib*), Weibull Máxima (*weibull_max*), Weibull Mínima (*weibull_min*) e Weibull Mínima Truncada (*truncweibull_min*), essas distribuições foram descritas por completo no Apêndice A. As distribuições foram ajustadas aos dados observados e avaliadas com emprego de métricas de erro, testes de aderência e visualizações dos resíduos. Por fim, a distribuição com que mais se adequou aos dados foi ajustada aos dados de diâmetros mensurados ou gerados. As estatísticas utilizadas para validação e para subsidiar a escolha da melhor distribuição estatística, para cada talhão, foram:

Estatística de Kolmogorov-Smirnov (KS) – Avalia a aderência entre a distribuição empírica dos dados e a distribuição teórica ajustada. Compara a função de distribuição acumulada empírica $F_n(x)$ com a função de distribuição acumulada teórica $F(x)$, e considera a maior diferença absoluta entre ambas (Equação 9).

$$D = \sup_x |F_n(x) - F(x)| \quad (9)$$

em que:

D : estatística KS (maior distância entre as funções)

\sup_x : supremo (máximo valor)

$F_n(x)$: função de distribuição acumulada empírica

$F(x)$: função de distribuição acumulada teórica do modelo.

Critério de Informação de Akaike (AIC) – Permite comparar modelos distintos, levando em consideração o grau de ajuste e o número de parâmetros estimados. Mede a qualidade do modelo ajustado, penalizando o número de parâmetros k . L é a verossimilhança máxima (Equação 10).

$$AIC = -2Ln(L) + 2k \quad (10)$$

em que:

$Ln(L)$: logaritmo da verossimilhança do modelo

k : número de parâmetros estimados no modelo

Critério de Informação Bayesiano (BIC) – Semelhante ao AIC, mas com uma penalização maior para modelos mais complexos, sendo mais conservador (Equação 11).

$$BIC = -2Ln(L) + kLn(n) \quad (11)$$

em que:

$Ln(L)$: logaritmo da verossimilhança do modelo

k : número de parâmetros estimados no modelo

n : número de observações

Logaritmo da verossimilhança - Indica o grau de ajuste do modelo aos dados, sendo um dos principais critérios utilizados na inferência estatística. Soma dos logaritmos das probabilidades atribuídas aos dados x_i pela função de densidade f , considerando os parâmetros ajustados θ (Equação 12).

$$L(L) = \sum_{i=1}^k Ln(f(x_i; \theta)) \quad (12)$$

4.5. Cenários utilizados na validação do método de quantificação do volume de madeira empilhada

Foram analisados quatro cenários de aplicação da metodologia de quantificação de madeira empilhada com base em contagem de toras. Em dois desses cenários foram utilizados os dados de toras simuladas com os dados de inventários de pré-corte e nos outros dois, as pilhas de madeira processadas com Harvester, empilhadas e mensuradas manualmente, assim:

Cenário I: Uso da distribuição empírica de diâmetros (proporção de toras em cada classe de diâmetro) e número total de toras, ambos gerados pelo processamento de todas as árvores de cada parcela mensurada em cada talhão, utilizando a equação de afilamento e as especificações de 6 m de comprimento e no mínimo 3 cm de diâmetro.

Cenário II: Uso de uma distribuição de probabilidade ajustada à distribuição empírica de diâmetros do Cenário I e do número de toras gerado pelo processamento de todas as árvores de cada parcela mensurada em cada talhão, utilizando a equação de afilamento e as especificações de 6 m de comprimento e no mínimo 3 cm de diâmetro.

Cenário III: Uso do número total de toras e da distribuição de frequência de toras observada por classe de diâmetro em cada pilha de madeira processada pela Harvester e em seguida empilhada (segundo banco de dados).

Cenário IV: Uso da distribuição estatística ajustada no Cenário II combinada com o total de toras contadas em cada pilha de madeira processada pela Harvester e em seguida transportada e empilhada.

Esses quatro cenários foram idealizados para viabilizar uma análise robusta do método de quantificação proposto por Casas *et al.* (2023) com exclusão de possíveis efeitos de erros de contagem de toras. Para cada cenário foram comparados os volumes observados e aqueles mensurados pelo método proposto por Casas *et al.* Utilizando estatísticas de precisão e de exatidão, além de análises gráficas de resíduos e de erros relativos de quantificação, conforme Campos e Leite (2017). Na Figura 2 é apresentado um fluxograma para sumarizar a metodologia seguida no presente estudo.

Figura 2 – Fluxograma metodológico das etapas de coleta, processamento e análise dos dados nos quatro cenários avaliados



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

5. RESULTADOS

Neste capítulo, são apresentados os resultados obtidos a partir das análises descritas na metodologia. Inicialmente, são apresentados os resultados referentes ao ajuste dos modelos de afilamento e a seleção da distribuição de probabilidade para os diâmetros das toras. Em seguida, as estimativas de volume sólido para os quatro cenários propostos, finalizando com a validação estatística e a comparação entre as diferentes abordagens e o volume de referência.

5.1. Validação da similaridade da distribuição de diâmetros das duas faces das pilhas

A comparação estatística entre as distribuições de diâmetros da "Face A" e "Face B" de cada uma das 124 pilhas foi conduzida por meio do teste não paramétrico de Kolmogorov-Smirnov (KS) para duas amostras, adotando-se um nível de significância de 5%.

Os resultados foram conclusivos e consistentes para todo o conjunto de dados. Em 100% das 124 pilhas analisadas, o teste de KS indicou que não há diferença entre a distribuição de diâmetros de suas faces opostas ($p > 0,05$). A Tabela 1 apresenta um exemplo para cada ano de medição em um projeto, talhão e pilha escolhido aleatoriamente para ilustrar a similaridade encontrada (Apêndice B). Este teste traz validação à abordagem de utilizar as informações de uma única face para inferir as características da pilha inteira, fornecendo uma base sólida para as estimativas de volume apresentadas nas seções subsequentes.

Tabela 1 - Exemplo de estatísticas descritivas dos diâmetros (cm) de faces opostas para uma pilha representativa e p-valor para o teste não paramétrico de Kolmogorov-Smirnov (KS) aplicado para comparar as distribuições de diâmetros das duas faces da pilha

Ano	Métricas	Face A (cm)	Face B (cm)
2022	Diâmetro Médio	10,71	10,76
	Desvio Padrão	3,33	3,39
	Mediana	10,70	10,80
	p-valor (Teste KS)	0,9898	
2023	Diâmetro Médio	12,06	12,50
	Desvio Padrão	3,23	3,33

	Mediana	11,80	12,20
	p-valor (Teste KS)		0,1662
2024	Diâmetro Médio	12,51	12,54
	Desvio Padrão	3,62	3,66
	Mediana	12,40	12,15
	p-valor (Teste KS)		0,9951

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

5.2. Modelagem do afilamento do fuste e definição da distribuição de diâmetros

A modelagem das distribuições de diâmetros das toras tanto do banco de dados do inventário florestal quanto da medição direta das toras empilhadas, foi feita a partir dos modelos e validações descritas nas seções 4.4.1 e 4.4.2, conforme 5.2.1 e 5.1.2.

5.2.1. Definição da distribuição de diâmetros das toras com dados simulados

A primeira etapa para a geração da distribuição de diâmetros das toras estimada para os dados do inventário florestal (Banco de Dados 1), consistiu na seleção do modelo de afilamento mais preciso para os povoamentos em estudo. Os resultados da avaliação foram conclusivos, demonstrando que o modelo de Garay foi superior em todas as métricas de precisão e para todos os oito projetos analisados (Tabela 2 e Apêndice C). Assim, o modelo de Garay foi selecionado como o mais adequado para simular o desdobro do fuste das árvores do inventário pré-corte. Essa etapa foi fundamental para gerar tanto as distribuições empíricas, como as distribuições estimadas dos diâmetros das toras, que são as estimativas utilizadas para o cálculo do volume nos Cenários I e II.

Tabela 2 - Estatísticas de avaliação dos modelos de afilamento para projetos representativo em três ocasiões (ano de inventário florestal), para a variável d (diâmetro comercial em cm)

Ano	Modelo	$a0$	$a1$	$a2$	$a3$	SQR	$ry\hat{y}$	Bias (d)	MDA (d)	RQEM (d)
2022	Demaerschalk	0,0681	1,1261	-0,4177	0,3421	139,79	0,9970	-0,0358	0,3952	0,5458
	Kozak	1,0503	-1,5793	0,5212	-	147,61	0,9968	-0,0197	0,4174	0,5580
	Ormerod	1,2000	0,7043	-	-	169,33	0,9964	0,1011	0,4705	0,5984
	Garay	1,1022	0,3501	0,9416	0,4183	105,50	0,9977	-0,0258	0,3724	0,4865
2023	Demaerschalk	-0,0390	0,9994	-0,3157	0,3314	191,81	0,9986	0,1280	0,5587	0,7703

	Kozak	1,0416	-1,5005	0,4466	-	184,91	0,9987	0,1432	0,5450	0,7416
	Ormerod	1,2000	0,6831	-	-	213,61	0,9985	0,2796	0,6400	0,8171
	Garay	1,1124	0,3179	0,9565	0,3733	144,27	0,9990	0,1506	0,4691	0,6354
2024	Demaerschalk	0,0076	0,9805	-0,3613	0,3709	252,42	0,9975	0,0153	0,5716	0,8237
	Kozak	1,0685	-1,7361	0,6604	-	233,37	0,9977	0,0017	0,5434	0,7921
	Ormerod	1,2000	0,7505	-	-	268,49	0,9974	0,0714	0,6067	0,8363
	Garay	1,2331	0,2760	0,9737	0,2097	163,33	0,9984	-0,0128	0,4269	0,6050

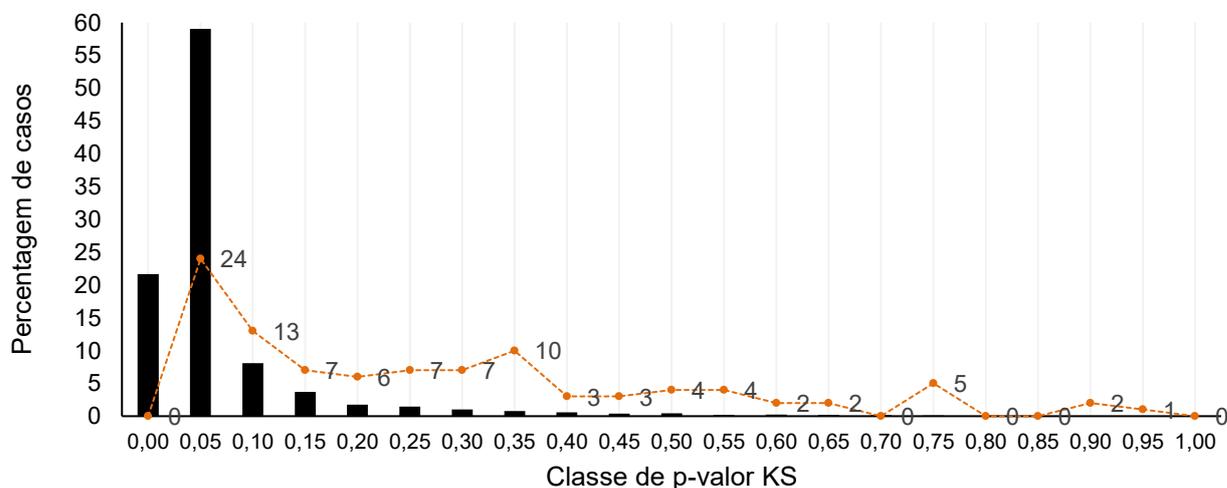
SQR = Soma de Quadrados dos Resíduos; Ryy = Coeficiente de correlação; Biais (d) = Viés do diâmetro (cm); MDA (d) = Média das Diferenças Absolutas do diâmetro (cm); RQEM (d) = Raiz Quadrada do Erro Médio do diâmetro (cm).

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Após a seleção da equação de afilamento, procedeu-se à simulação do desdobro das árvores do inventário pré-corte, gerando uma distribuição estimada de diâmetros em nível de talhão. O passo seguinte foi identificar um modelo de probabilidade que melhor representasse esta distribuição simulada. Para isso, diversas distribuições estatísticas foram avaliadas com base em critérios de aderência.

A Figura 3 contém os resultados da análise estatística comparativa para as distribuições ajustadas, utilizando a métrica da estatística do teste de Kolmogorov-Smirnov (KS).

Figura 3 – Percentagem de casos (eixo y) por classe de p -valor do teste de Kolmogorov-Smirnov (eixo x). As barras correspondem às distribuições descartadas e a linha pontilhada e números em vermelho correspondem às distribuições selecionadas para o Banco de dados 1

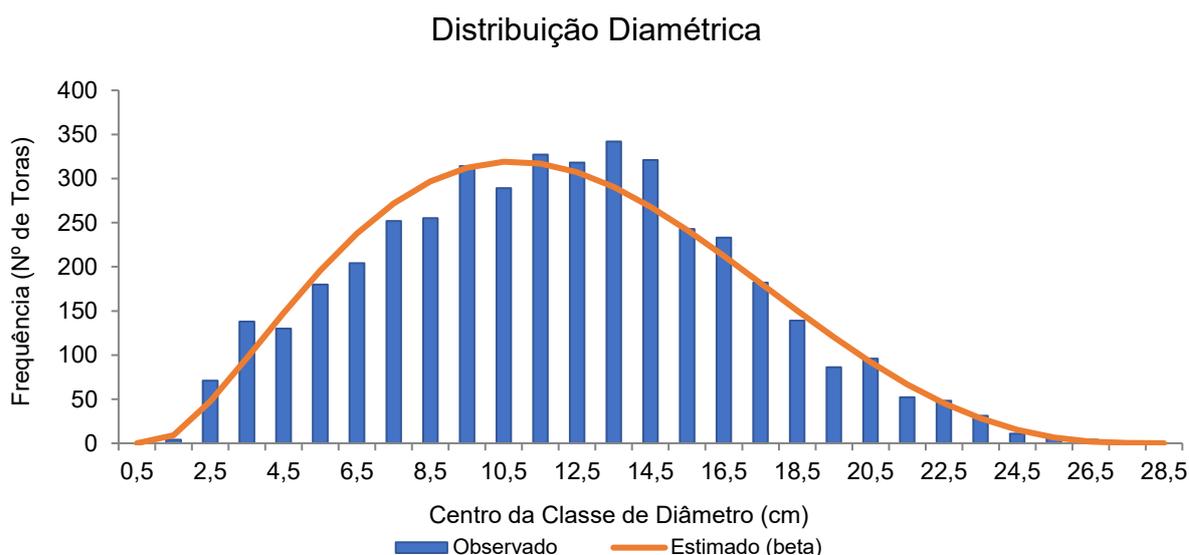


Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Com base nos resultados, diferentes modelos se apresentaram melhores ao descrever os dados em cada um dos talhões. Os menores valores de AIC e BIC, além da análise visual das estimativas e dos erros relativos, nortearam a escolha do modelo mais parcimonioso e com melhor ajuste para os dados de diâmetro gerados via simulação.

A qualidade destes ajustes é ilustrada na Figura 4, que exibe a distribuição de frequência dos diâmetros simulados sobreposto à curva de densidade de probabilidade da distribuição Weibull Exponenciada foi a que se ajustou melhor na maioria dos casos (Apêndice D).

Figura 4 – Histograma de frequência dos diâmetros simulados a partir do inventário pré-corte e curva de densidade da distribuição Beta ajustada



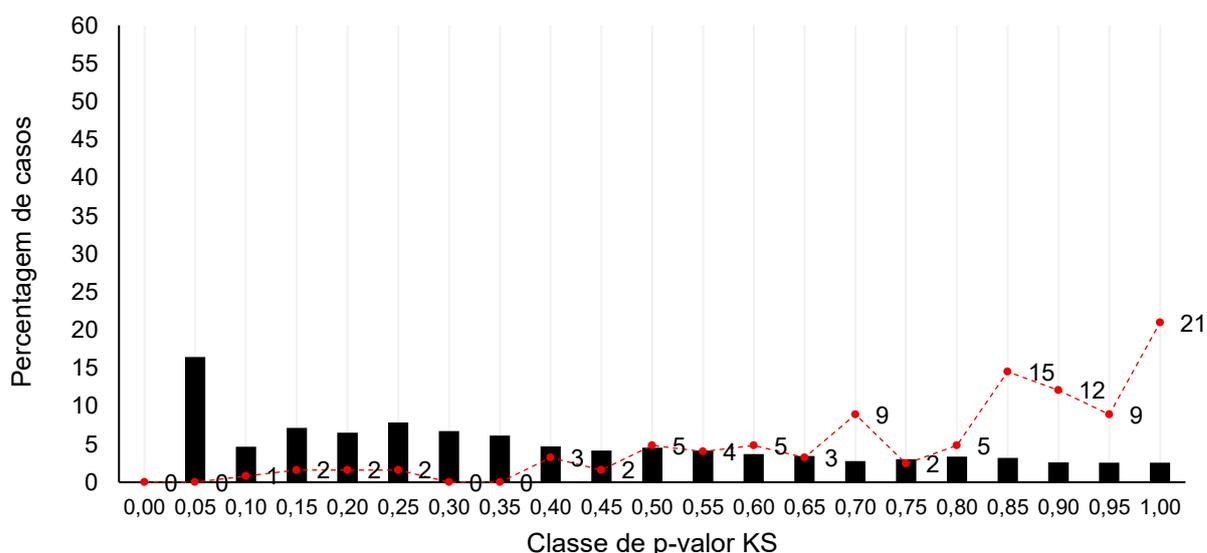
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A definição desta distribuição teórica a partir dos dados do inventário é um resultado central do estudo, pois ela serve como base para a estimativa do volume de madeira nos Cenários II e IV, que testam a metodologia proposta sem a necessidade de medir os diâmetros diretamente nas pilhas.

5.2.2. Definição da distribuição de diâmetros com dados da medição direta

De forma análoga à análise dos dados simulados, buscou-se identificar a distribuição de probabilidade que melhor se ajustasse aos diâmetros das toras efetivamente medidas a campo (Banco de Dados 2). Esses dados são medições reais dos diâmetros e tamanho de cada uma das toras distribuídas na pilha de madeira. A avaliação seguiu os mesmos critérios de aderência (AIC, BIC, teste KS e análise visual). A Figura 5 apresenta um gráfico das métricas de seleção para as distribuições testadas.

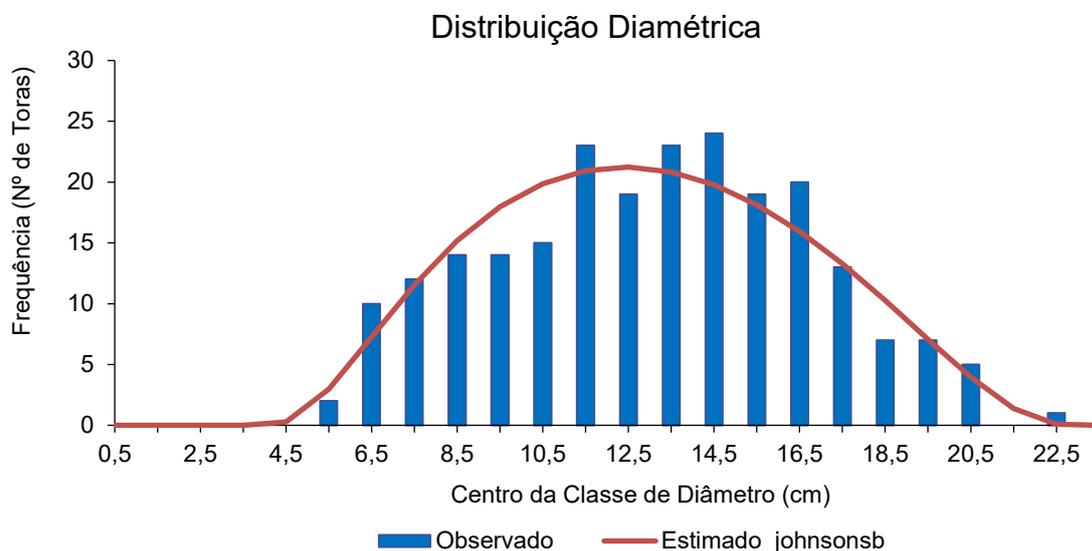
Figura 5 – Percentagem de casos (eixo y) por classe de p -valor do teste de Kolmogorov-Smirnov (eixo x). As barras correspondem às distribuições descartadas e a linha pontilhada e números em vermelho correspondem às distribuições selecionadas para o Banco de Dados 2



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Diferentemente da análise dos dados simulados, na qual a distribuição Weibull Exponenciada foi mais adequada, para os diâmetros medidos em campo a distribuição Johnson SB se mostrou o modelo mais adequado pelas métricas e validações propostas. A Figura 6 e o Apêndice E ilustram a alta qualidade do ajuste para este conjunto de dados, sobrepondo a curva de densidade da distribuição Johnson SB ao histograma de frequência dos diâmetros observados.

Figura 6 – Histograma de frequência dos diâmetros medidos em campo e curva de densidade da distribuição Johnson SB ajustada



Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

5.3. Quantificação do volume sólido e validação dos cenários

Considerando as particularidades e estimativas empregadas para quantificar o volume sólido em cada um dos quatro cenários, chegou-se nos valores que foram comparados com o volume de referência de cada um dos bancos de dados.

A partir dos dados de volume quantificados, iniciou-se a análise comparativa para avaliar a acurácia de cada um dos quatro cenários frente ao volume de referência.

Nos Cenários I e II, os volumes estimados por Huber interpolado (Equação 8), foram utilizados como os volumes paramétricos, ou seja, os volumes de referência comparados aos gerados pela metodologia.

5.3.1. Cenário I

Os resultados para o primeiro cenário, agrupados por projeto, são apresentados na Tabela 3. O detalhamento completo por talhão encontra-se no Apêndice F. O uso da distribuição empírica resultou em uma diferença média de

2,50% em relação ao volume paramétrico (Volume total obtido com a fórmula de Huber com interpolação das seções, conforme Campos e Leite, 2017), com variações entre os projetos (Tabela 3).

Tabela 3 – Resumo dos volumes (m³) obtidos no Cenário I, agrupados por projeto

Ano – Projeto	Volume Total Huber Int. (m ³)	Volume Total Smalian (m ³)	Volume Total Huber (m ³)	Volume Total Dist. Empírica (m ³)	Erro Relativo (%)
2022 – A	3.966,7660	4.037,5149	4.037,6779	4.053,3608	2,18%
2022 – B	3.705,6244	3.772,4211	3.764,6473	3.778,5767	1,97%
2022 – C	1.070,8916	1.091,4146	1.089,5848	1.093,2482	2,09%
2023 – D	3.524,0641	3.591,0601	3.583,4624	3.598,7461	2,12%
2023 – E	1.911,2044	1.958,2511	1.959,9895	1.968,4841	3,00%
2024 – F	2.880,3356	2.936,9287	2.938,6781	2.950,8325	2,45%
2024 – G	3.853,5561	3.930,5598	3.926,4384	3.942,0754	2,30%
2024 – H	798,9950	823,0218	822,7761	830,1038	3,89%

Nota: Erro Relativo (%) é a diferença percentual entre o volume estimado pelo cenário (coluna 5) e o volume de referência (coluna 2).

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

5.3.2. Cenário II

O Cenário II, por sua vez, utilizou o mesmo número de toras da simulação, mas aplicou a distribuição de probabilidade teórica que melhor se ajustou ao talhão para modelar os diâmetros (Tabela 4). O objetivo desta análise é verificar se o uso de um modelo de distribuição ajustado melhora a acurácia da estimativa em comparação com a distribuição empírica (Tabela 5) e os resultados estão resumidos nas Tabelas 4 e 5. O detalhamento desses resultados é apresentado no Apêndice F.

Tabela 4 – Resumo dos volumes (m³) para o Cenário II, agrupados por projeto

Ano – Projeto	Volume Total Huber Int. (m ³)	Volume Total Smalian (m ³)	Volume Total Huber (m ³)	Volume Total Dist. Estimada (m ³)	Erro Relativo (%)
2022 – A	3.966,7660	4.037,5149	4.037,6779	4.040,2760	1,85%
2022 – B	3.705,6244	3.772,4211	3.764,6473	3.764,4046	1,59%
2022 – C	1.070,8916	1.091,4146	1.089,5848	1.094,4771	2,20%
2023 – D	3.524,0641	3.591,0601	3.583,4624	3.588,6413	1,83%
2023 – E	1.911,2044	1.958,2511	1.959,9895	1.968,4841	3,00%
2024 – F	2.880,3356	2.936,9287	2.938,6781	2.944,2628	2,22%
2024 – G	3.853,5561	3.930,5598	3.926,4384	3.942,0754	2,30%

2024 – H 798,9950 823,0218 822,7761 829,1812 3,78%

Nota: Erro Relativo (%) é a diferença percentual entre o volume estimado pelo cenário (coluna 5) e o volume de referência (coluna 2).

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Tabela 5 – Resumo comparativo dos volumes (m³) para o Cenário I e II, agrupados por projeto

Ano – Projeto	Volume Total Huber Int. (m ³)	Volume Total Dist. Empírica (m ³)	Volume Total Dist. Estimada (m ³)	Erro Relativo I (%)	Erro Relativo II (%)	Dist. Empírica vs Dist. Estimada (%)
2022 – A	3.966,7660	4.053,3608	4.040,2760	2,18%	1,85%	0,32%
2022 – B	3.705,6244	3.778,5767	3.764,4046	1,97%	1,59%	0,38%
2022 – C	1.070,8916	1.093,2482	1.094,4771	2,09%	2,20%	-0,11%
2023 – D	3.524,0641	3.598,7461	3.588,6413	2,12%	1,83%	0,28%
2023 – E	1.911,2044	1.968,4841	1.968,4841	3,00%	3,00%	0,22%
2024 – F	2.880,3356	2.950,8325	2.944,2628	2,45%	2,22%	0,22%
2024 – G	3.853,5561	3.942,0754	3.942,0754	2,30%	2,30%	0,24%
2024 – H	798,9950	830,1038	829,1812	3,89%	3,78%	0,11%

Nota: Erro Relativo (%) é a diferença percentual entre o volume estimado pelo cenário (coluna 3 e 4) e o volume de referência (coluna 2).

Erro Relativo I (%) - Erro relativo ao Cenário I.

Erro Relativo II (%) - Erro relativo ao Cenário II.

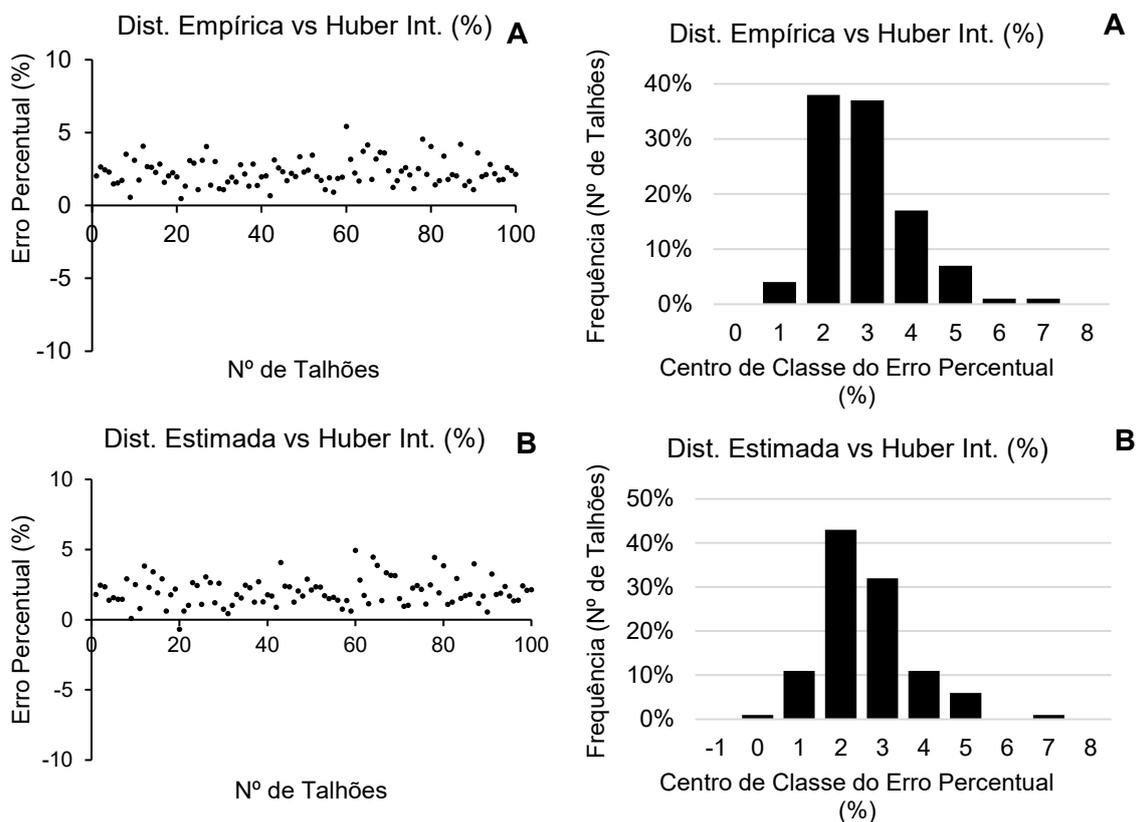
Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Ao comparar os resultados, nota-se que o Cenário II resultou em uma diferença média de 2,35%, uma redução em relação ao Cenário I. Este resultado sugere uma diferença média entre as metodologias de 0,21%, ou seja, a modelagem da distribuição de diâmetros por projeto contribuiu para uma estimativa de volume mais acurada dentro do ambiente simulado.

A Figura 7 ilustra a dispersão das diferenças das estimativas por Talhão para cada um dos cenários. Observa-se nos gráficos A, que o Cenário I (distribuição empírica) apresentou uma tendência a superestimar o volume, porém, com erros relativamente baixos, na faixa de 1% a 3%. Ao analisar a Figura 7, percebe-se que a aplicação Do Cenário II (distribuição estimada) resultou em uma distribuição de erros mais centrada na mesma faixa, embora com uma dispersão ligeiramente menor em comparação ao Cenário I. Isso reforça a conclusão de que a modelagem teórica da

distribuição contribuiu para uma estimativa de volume com menor viés no ambiente simulado.

Figura 7 – Dispersão e histograma de frequência das diferenças percentuais entre os volumes estimados pelo Cenário I e II em relação ao volume de referência



Nota: O erro percentual é calculado como $[(\text{Volume Estimado} - \text{Volume de Referência}) / \text{Volume de Referência}] \times 100$. Os gráficos (A) representam o Cenário I (usando a distribuição empírica) e os (B) representa o Cenário II (usando a distribuição teórica ajustada).

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

5.3.3. Cenário III

O Cenário III representa uma abordagem robusta, utilizando tanto a contagem manual de toras quanto a distribuição empírica de seus diâmetros das toras medidas a campo. O objetivo aqui foi de avaliar a acurácia da metodologia de cálculo de volume quando se tem informações a medição de todas as toras e a contagem exata das mesmas em cada pilha, comparando o resultado com o volume de referência obtido

pela cubagem manual utilizando a fórmula de Huber com 100 interpolações de cada tora. Conforme Campos e Leite (2017) o resultado assim obtido é o de maior exatidão em relação às fórmulas aproximativas usuais e métodos de medição aplicados em escala operacional. Por isso os volumes de cada tora obtidos com a fórmula de Huber incluindo as interpolações foram considerados como “parâmetros”.

Os resultados de volume por pilha de madeira para o Cenário III foram apresentados no Apêndice G juntamente a uma exemplificação por projeto na Tabela 6.

Tabela 6 – Resumo dos volumes (m^3) para o Cenário III, agrupados por projeto

Ano – Projeto	Volume Total Huber Int. (m^3)	Volume Total Smalian (m^3)	Volume Total Huber (m^3)	Volume Total Dist. Empírica (m^3)	Erro Relativo (%)
2022 – A	383,7905	384,2436	386,0907	397,4344	3,56
2022 – B	320,0754	320,313	321,0877	331,2673	3,50
2022 – C	229,7916	229,9462	230,0518	235,506	2,49
2023 – D	432,0277	432,471	428,3159	444,8831	2,98
2023 – E	295,1973	295,6081	294,3770	297,7203	0,85
2024 – F	403,4857	403,9158	406,5861	403,1089	-0,09
2024 – G	390,1138	390,5312	395,0610	392,7583	0,68
2024 – H	160,0707	160,238	161,8604	159,3781	-0,43

Nota: Erro Relativo (%) é a diferença percentual entre o volume estimado pelo cenário (coluna 5) e o volume de referência (coluna 2).

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Analisando a coluna do volume total pela distribuição observada, observa-se que a média de volume estimado por esta abordagem ($332,76 m^3$) foi muito próximo da média de referência ($326,82 m^3$), resultando em erros variando de $-0,43\%$ a $3,56\%$, com uma média das diferenças percentuais de apenas $1,69\%$. Para uma análise visual da exatidão foram elaborados os gráficos da Figura 8.

Figura 8 – Dispersão e histograma de frequência das diferenças percentuais entre os volumes estimados pelo Cenário III em relação ao volume de referência



Nota: O erro percentual é calculado como $[(\text{Volume Estimado} - \text{Volume de Referência}) / \text{Volume de Referência}] \times 100$.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

A análise visual da Figura 8 revela que o Cenário III apresentou uma dispersão com tendência a normalidade, com a média dos erros na classe de 1% a 5%, uma tendência a superestimar o volume, com a grande maioria dos pontos de dispersão situando-se acima da linha de erro zero. O histograma de frequência corrobora esta observação, mostrando que a maior concentração de erros ocorreu na faixa de positiva de erros.

5.3.4. Cenário IV

A análise deste Cenário, assim como a análise do Cenário II, representa a metodologia central do presente estudo. Este cenário combina a contagem manual de toras com a distribuição de probabilidade teórica ajustada para os diâmetros medidos em campo. O objetivo é avaliar se esta abordagem, que elimina a necessidade de medir os diâmetros de todas as toras na pilha, pode produzir estimativas de volume estatisticamente iguais às do método de referência (cubagem de todas as toras da pilha, utilizando a fórmula de Huber com as interpolações mencionadas neste item 5.3). Os resultados obtidos estão sumarizados em nível de projeto na Tabela t e detalhados por pilha de madeira no Apêndice G.

Tabela 7 – Resumo dos volumes (m³) para o Cenário IV, agrupados por projeto

Ano – Projeto	Volume Total Huber Int. (m ³)	Volume Total Smalian (m ³)	Volume Total Huber (m ³)	Volume Total Dist. Estimada (m ³)	Erro Relativo (%)
2022 – A	383,7905	384,2436	386,0907	393,740922	2,59%
2022 – B	320,0754	320,313	321,0877	330,18369	3,16%
2022 – C	229,7916	229,9462	230,0518	234,798825	2,18%
2023 – D	432,0277	432,471	428,3159	443,20029	2,59%
2023 – E	295,1973	295,6081	294,377	294,519338	-0,23%
2024 – F	403,4857	403,9158	406,5861	400,657212	-0,70%
2024 – G	390,1138	390,5312	395,061	387,382157	-0,70%
2024 – H	160,0707	160,238	161,8604	158,637177	-0,90%

Nota: Erro Relativo (%) é a diferença percentual entre o volume estimado pelo cenário (coluna 5) e o volume de referência (coluna 2).

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Ao analisar os resultados da Tabela 7, verifica-se que a média de volume estimado pelo Cenário IV (330,32 m³) resultou em uma diferença percentual média de apenas 1,00%. É importante comparar este resultado com o do Cenário III (Tabela 8) para verificar se a modelagem estatística manteve, piorou ou melhorou a acurácia para os diferentes métodos. Ao comparar os resultados do volume estimado pelos diferentes cenários que utilizaram a medição de toras em campo, o anterior (Cenário III), obteve um volume estimado pela distribuição empírica 1,69% maior que o valor de referência, enquanto o cenário atual resultou em uma estimativa 1,00% maior, o que aponta uma maior acurácia ao empregar o modelo estatístico, indicando a possibilidade do uso da estimativa das distribuições na quantificação volumétrica de uma pilha de madeira.

Tabela 8 – Resumo comparativo dos volumes (m³) obtidos nos Cenários III e IV, agrupados por projeto

Ano – Projeto	Volume Total Huber Int. (m ³)	Volume Total Dist. Empírica (m ³)	Volume Total Dist. Estimada (m ³)	Erro Relativo III (%)	Erro Relativo IV (%)	Dist. Empírica vs Dist. Estimada (%)
2022 – A	383,7905	397,4344	393,7409	3,56%	2,59%	-0,93%
2022 – B	320,0754	331,2673	330,1837	3,50%	3,16%	-0,33%
2022 – C	229,7916	235,506	234,7988	2,49%	2,18%	-0,30%
2023 – D	432,0277	444,8831	443,2003	2,98%	2,59%	-0,38%

2023 – E	295,1973	297,7203	294,5193	0,85%	-0,23%	-1,08%
2024 – F	403,4857	403,1089	400,6572	-0,09%	-0,70%	-0,61%
2024 – G	390,1138	392,7583	387,3822	0,68%	-0,70%	-1,37%
2024 – H	160,0707	159,3781	158,6372	-0,43%	-0,90%	-0,46%

Nota: Erro Relativo (%) é a diferença percentual entre o volume estimado pelo cenário (coluna 3 e 4) e o volume de referência (coluna 2).

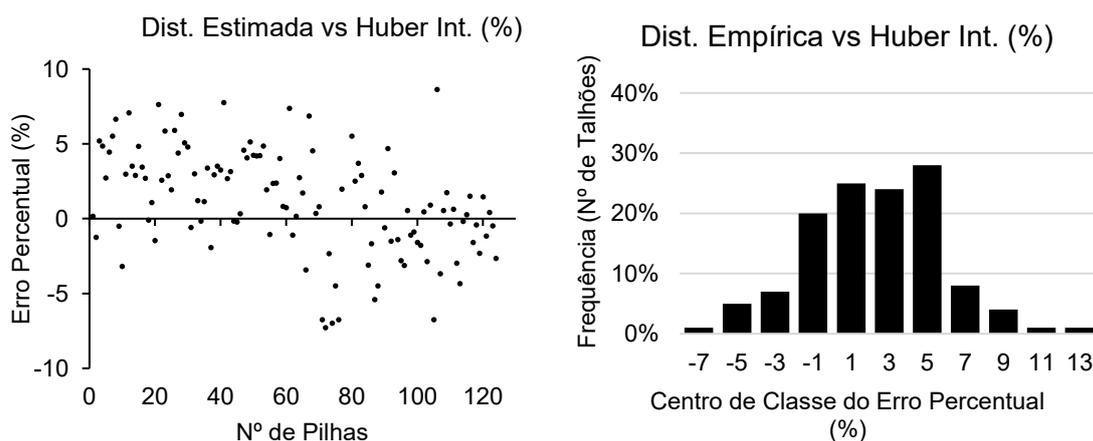
Erro Relativo III (%) - Erro relativo ao Cenário III.

Erro Relativo IV (%) - Erro relativo ao Cenário IV.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

Os gráficos da Figura 9 mostram uma distribuição de erros bem próximos ao terceiro cenário, com baixo viés e alta precisão. Ao comparar com os resultados do Cenário III (Figura 8), pode-se avaliar se a substituição da distribuição empírica pela teórica alterou os comportamentos dos erros, concentrando-se na faixa de -1% a 5% por amostra de pilha de toras. Com a distribuição de erros na mesma faixa do Cenário III, e a estimativa volumétrica mais apurada, a utilização de um modelo estatístico que mais se adapta a realidade das distribuições, é uma ferramenta aplicável e que traz benefícios à metodologia.

Figura 9 - Dispersão e histograma de frequência das diferenças percentuais entre os volumes estimados no Cenário IV em relação ao volume de referência



Nota: O erro percentual é calculado como $100(\text{Volume Estimado} - \text{Volume de Referência}) / \text{Volume de Referência}$.

Fonte: Elaborado pelo autor (2025).

6. DISCUSSÃO

O presente estudo foi conduzido com o objetivo de validar os componentes do método proposto por Casas *et al.* (2024), para a quantificação do volume de madeira empilhada, que buscou combinar a contagem de toras em campo com uma distribuição diamétrica derivada de dados de inventário pré-corte, eliminando a necessidade de medições diretas nas pilhas. Os resultados obtidos confirmaram a eficiência e consistência do método. Foi possível demonstrar que mesmo em condições operacionais diversas é possível obter estimativas de volume de pilhas de madeira com erros relativos médios inferiores a 3% sem qualquer tipo de medição, seja de toras ou das dimensões da pilha.

Constatou-se que a distribuição diamétrica das toras é estatisticamente igual entre as faces das pilhas. Isso foi concluído pela análise de 124 pilhas de madeira, onde 100% das amostras não apresentaram diferença significativa ($p > 0,05$) ao serem submetidas ao teste de Kolmogorov-Smirnov (Apêndice B). O resultado corrobora com o referido método de determinação do volume de madeira em pilhas de toras, que utiliza uma contagem de toras em uma única face da pilha, juntamente com uma distribuição estatística dos diâmetros de toras previamente ajustada a dados de inventário de pré corte. Cabe lembrar que há a possibilidade de gerar tal distribuição com a medição das seções de algumas poucas toras aleatoriamente na face da pilha.

Para as condições do estudo ficou comprovado que o arranjo das toras de diferentes diâmetros ocorre de forma aleatória, ora com o diâmetro maior para um lado, ora para outro, fornecendo uma base sólida para a análise subsequente dos cenários de estimação, o que também está alinhado com observações feitas por Galsgaard *et al.* (2015) sobre a variabilidade no posicionamento e na exposição das toras em pilhas em ambientes reais.

Quando se utilizou a contagem de toras simuladas com uma função de afilamento do fuste e dados de inventário de pré-corte (cenários I e II), foi evidenciada uma alta acurácia, com um erro médio de 2,50% para a distribuição empírica (Cenário I) e 2,35% para a distribuição teórica ajustada (Cenário II). A modelo de afilamento utilizado neste estudo já teve sua eficiência relativa para estimação de diâmetros comerciais comprovada em vários estudos (Garay, 2000; Martins *et al.*, 2016; Souza *et al.*, 2018).

Em paralelo, os Cenários III e IV foram utilizados para estabelecer um parâmetro de referência do desempenho do método em condições de campo, utilizando as medições em campo e contagem real de toras. Nestas condições, a metodologia apresentou erros médios de 1,69% para a abordagem que utiliza a distribuição empírica, ou seja, as proporções de diâmetros em cada classe diamétrica (Cenário III) e 1,00% para a utilização da distribuição diamétrica teórica estimada com base nos dados das medições feitas nas pilhas de madeira montadas em campo (Cenário IV).

Os erros obtidos pelos modelos baseados puramente no inventário (Cenários I e II) são bastante próximos dos erros obtidos em condições de campo (Cenários III e IV). Essa similaridade aponta que a informação da distribuição diamétrica, gerada a partir do inventário, é um substituto altamente eficaz para a medição direta e trabalhosa dos diâmetros em campo. Yu *et al.* (2024) empregaram uma metodologia baseada em redes neurais profundas, especificamente um modelo aprimorado Cascade Mask R-CNN combinado com Deep SORT, para detecção dos topos das toras, rastreamento e mensuração automática do diâmetro e do volume das pilhas, o que resultou em um erro médio de 4,07% na estimativa de volume em comparação ao volume mensurado manualmente. Esses pontos buscam validar a metodologia proposta: a combinação da contagem de toras em campo com um modelo de distribuição, seja ele empírico ou teórico, derivado do inventário pré-corte é capaz de gerar estimativas de volume com elevada acurácia.

Em todos os cenários os resultados indicam uma tendência geral à superestimação do volume sólido, evidenciada pelos erros médios positivos e pela assimetria das distribuições de erros nos gráficos de dispersão, principalmente nos Cenários I e II (Figura 7). Essa tendência ocorre pelo fato de que, nas quantificações volumétricas, todas as toras foram consideradas com comprimento fixo de 6 metros, enquanto na prática uma proporção das toras apresenta comprimento inferior, devido a restrições de diâmetro mínimo e ao aproveitamento residual dos fustes na ponta das árvores, fazendo assim, com que a média dos comprimentos das toras seja inferior ao valor de 6 m. Ao fixar o comprimento de 6 metros resultou em uma tendência de bias positivo nas estimativas de volume das pilhas. Isto já era esperado (diferenças mais positivas do que negativas), evidenciando a necessidade de maior rigor em relação ao padrão operacional do corte no campo.

Uma diferença de comprimento de 5 cm em relação a um padrão parece ser pequena, mas veja, por exemplo, para dois diâmetros d_1 e d_2 em cada ponta da tora, os volumes seriam, por Smalian, $6(g_1 + g_2)/2$ e $6,05(g_1+g_2)/2$. Portanto, a diferença no volume para 6 e 6+0,05m seria:

$$100 \frac{6,05 \left(\frac{g_1 + g_2}{2} \right) - 6 \left(\frac{g_1 + g_2}{2} \right)}{6 \left(\frac{g_1 + g_2}{2} \right)} = 100 \frac{0,05}{6} = 0,83\%$$

em que:

g_1, g_2 = áreas seccionais medidas nas faces das toras, em m^2 ;

Generalizando, a diferença ($Di\%$) de volume de um tronco com diâmetros d_1 e d_2 , com comprimentos L' e L , $L' > L$, é $Di\% = 100(L' - L)L^{-1}$. Esta mesma a irá ocorrer se for empregada a formula de Huber ou a de Newton. Isto evidencia a importância de um rigoroso controle de qualidade em relação ao tamanho das toras no corte florestal. Se a diferença entre o comprimento especificado e aquele resultante do corte for aleatória, com distribuição normal leptocúrtica, não deverá haver efeito sobre o volume final da pilha de madeira; caso contrário ocorrerá um *bias*.

Para o Banco de dados 2, projeto A, foram feitas as estimativas da diferença entre os resultados volumétricos para toras de 6m a 6,25m, resultando em uma diferença de exata de 0,83%, ao comprar o volume estimado com toras de 6m ($397,4344 m^3$) e o volume com comprimento de 6,05 ($400,7464 m^3$), o erro foi se somando a cada 0,05m acrescidos, até o um erro de 4,17% ao comparar com o volume de uma tora com 6,25m ($413,9942 m^3$). Erros na conformidade no tamanho das toras podem ser mais prejudiciais do que a escolha entre a distribuição empírica ou teórica, o que impacta diretamente na assertividade das quantificações volumétricas.

Uma vez estabelecida a eficiência e consistência do método, pode-se discutir qual abordagem de se utilizar a distribuição empírica ou a teórica dos diâmetros. Os resultados mostraram, tanto no ambiente simulado quanto no de campo, que a distribuição teórica ajustada é mais assertiva. Um resultado de relevância, que demonstra que a distribuição diamétrica teórica ajustada (em especial a Johnson SB e a Weibull Exponenciada) atua como um filtro estatístico capaz de reduzir o ruído amostral, aproximando a estimativa do verdadeiro valor populacional de forma mais consistente do que a frequência empírica direta. Este é um achado que converge com

o princípio da modelagem estocástica aplicada a fenômenos biológicos complexos (Bailey & Dell, 1973; Schmidt *et al.*, 2020).

A distribuição empírica apresenta vantagens em simplicidade e transparência, por ser um reflexo direto da simulação do inventário, sem etapas adicionais de modelagem estatística. Ou seja, se as estimativas das toras gerarem dados com mais ruídos, o emprego das distribuições teóricas podem ser um aliado na suavização das amostras, como aconteceu nos primeiros dois cenários. Se a distribuição empírica for mais uniforme, a diferença entre o uso da distribuição teórica ou empírica é menor, como os cenários I e II. A escolha entre as duas dependerá, portanto, dos dados e objetivo da utilização da metodologia, para máxima precisão, o modelo teórico é recomendado, para máxima simplicidade e com uma acurácia ainda elevada, o modelo empírico é uma alternativa pragmática e robusta.

Diante da comprovação da eficácia da metodologia, as hipóteses nulas do estudo foram rejeitadas. Prova-se que é possível estimar o volume sem medições diretas nas toras empilhadas (refutando $H_0(1)$), sem qualquer medição de dimensões da pilha e, também, que a combinação da contagem de toras com um modelo de distribuição de diâmetros obtida de uma fonte externa de dados previamente disponíveis, como o inventário, é uma técnica eficaz ($H_0(2)$ foi, portanto, rejeitada).

Por fim, a integração potencial da metodologia com sistemas de visão computacional, como o YOLO ou outras redes neurais convolucionais, configura uma oportunidade estratégica para criar fluxos de trabalho totalmente automatizados, escaláveis e de baixo custo. Estudos recentes relatam taxas de detecção de toras elevadas e precisão volumétrica altamente competitiva quando acoplados a modelos preditivos robustos (De Miguel-Díez *et al.*, 2021; Li, Liu, Wang, 2023; Casas *et al.*, 2024; Mazzochin *et al.*, 2025) reforçando que o futuro da mensuração florestal reside na convergência entre inventários de alta fidelidade, inteligência artificial e processos digitais.

5. CONCLUSÕES

Com base nos objetivos propostos e nos resultados obtidos, conclui-se que a premissa fundamental de que a distribuição de diâmetros das toras é a mesma em ambas as faces das pilhas foi confirmada para as condições do estudo. Isto viabiliza a aplicação de tecnologias de sensoriamento remoto e visão computacional em escala operacional.

A metodologia de simular o desdobro de toras a partir de dados de inventário pré-corte, utilizando um modelo de afilamento, provou ser altamente eficaz para gerar distribuições de diâmetros de toras da madeira colhida. As estimativas de volume derivadas dessa abordagem (Cenários I e II) apresentam elevada acurácia, com erros médios de 2,50% e 2,35%, respectivamente, em relação aos volumes de referência simulados.

O ajuste de uma distribuição de probabilidade teórica (como a Weibull Exponenciada ou a Johnson SB) aos dados de diâmetro, tanto simulados quanto medidos, aumenta a exatidão das estimativas volumétricas em comparação com o uso direto de uma distribuição empírica. Este resultado evidencia que a modelagem estatística atua como um filtro eficaz, reduzindo o ruído amostral e gerando resultados com menor viés.

A combinação da contagem de toras em campo com a distribuição de diâmetros derivada do inventário pré-corte (Cenário IV) resulta em estimativas de volume com um erro médio muito baixo (nesse estudo, 1,00%) em relação à cubagem de todas as toras. Este desempenho validou a abordagem como uma alternativa eficiente e operacionalmente viável aos métodos tradicionais de medição.

As hipóteses nulas formuladas neste estudo foram rejeitadas. Foi comprovado que é possível estimar o volume sólido de uma pilha sem a medição direta dos diâmetros das toras e de qualquer dimensão das pilhas, e que a contagem de toras, quando combinada com distribuição estatística dos diâmetros de toras comerciais, é um método robusto para a quantificação do volume de pilhas de toras.

A metodologia validada neste trabalho apresenta grande potencial para ser integrada a sistemas automatizados de contagem de toras baseados em visão computacional, como os modelos YOLO. Tal integração pode viabilizar o desenvolvimento de um fluxo de trabalho totalmente digital, escalável e de baixo custo, otimizando de forma significativa a gestão e a logística na indústria florestal.

REFERÊNCIAS

- ALI, M. L., & ZHANG, Z. The YOLO Framework: A Comprehensive Review of Evolution, Applications, and Benchmarks in Object Detection. **Computers**, 13(12), 336–336. 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/computers13120336>
- AZADEH MOBTAKER *et al.* A review on decision support systems for tactical logistics planning in the context of forest bioeconomy. **Renewable & Sustainable Energy Reviews**, v. 148, p. 111250–111250, 1 set. 2021. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.rser.2021.111250>
- BADGUJAR, C. M.; POULOSE, A.; GAN, H. Agricultural object detection with You Only Look Once (YOLO) Algorithm: A bibliometric and systematic literature review. **Computers and electronics in agriculture**, v. 223, p. 109090–109090, 1 ago. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.compag.2024.109090>
- BAILEY, R. L.; DELL, T. R. Quantifying Diameter Distributions with the Weibull Function. **Forest Science**, v. 19, n. 2, p. 97–104, 1 jun. 1973.
- BERNARDI, L. K. **Estimativa de volume do tronco por reconstrução tridimensional e triangulação de contornos**. Tese (Doutorado em Planejamento e Uso de Recursos Renováveis) – Centro de Ciências e Tecnologias para a Sustentabilidade, Universidade Federal de São Carlos, 2024. Disponível em: <https://repositorio.ufscar.br/handle/ufscar/19824>
- BERTOLA, A. *et al.* Determinação de fatores de empilhamento através do software Digitara. **Revista Árvore**, v. 27, n. 6, p. 837–844, 1 dez. 2003. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622003000600010>
- BINOTI, M. L. M. DA S.; BINOTI, D. H. B.; LEITE, H. G. Aplicação de redes neurais artificiais para estimação da altura de povoamentos equiâneos de eucalipto. **Revista Árvore**, v. 37, n. 4, p. 639–645, ago. 2013. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622013000400007>
- BUCHELT, A. *et al.* Exploring artificial intelligence for applications of drones in forest ecology and management. **Forest Ecology and Management**, v. 551, p. 121530–121530, 1 jan. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2023.121530>
- CAMPOS, J.C.C.; LEITE, H.G. **Mensuração Florestal: perguntas e respostas**. 5.ed. atualizada e ampliada.; UFV: Viçosa, Brasil, 2017. 636 p.
- CAI, K. *et al.* A modified YOLOv3 model for fish detection based on MobileNetv1 as backbone. **Aquacultural Engineering**, v. 91, p. 102117, nov. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.aquaeng.2020.102117>
- CASAS, G. G. *et al.* Automatic detection and counting of stacked eucalypt timber using the YOLOv8 model. **Forests**, v. 14, p. 2369, 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14122369>.

CASAS, G. G. *et al.* Quantifying solid volume of stacked eucalypt timber using detection-segmentation and diameter distribution models. **Smart Agricultural Technology**, v. 9, p. 100653, 22 nov. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1016/j.atech.2024.100653>

CASAS, G. (2024). NeuroTimber: Estimating stacked timber volume using AI detection and diameter distribution models [Repositório GitHub]. GitHub. <https://github.com/Casas846/NeuroTimber>

CASAS, G. G. **Modelagem do crescimento e da produção de povoamentos de eucalipto utilizando regressão, redes neurais artificiais e redes profundas**. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2021.

CHEN, H. *et al.* Research on recognition method of electrical components based on YOLO V3. **IEEE Access**, v. 7, p. 157818–157829, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2950053>.

DE MIGUEL-DÍEZ, F. *et al.* Analysis of the Influence That Parameters Crookedness and Taper Have on Stack Volume by Using a 3D-Simulation Model of Wood Stacks. **Forests**, v. 12, n. 2, p. 238, 20 fev. 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/f12020238>

DOMICIANO, C. A. R. *et al.* Efeito do tamanho de seções de medição no ajuste de equações volumétricas de eucalipto. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 45, 22 maio 2025. DOI: <https://doi.org/10.4336/2025.pfb.45e202302286>

FANG, W.; WANG, L.; REN, P. Tinier-YOLO: A Real-time Object Detection Method for Constrained Environments. **IEEE Access**, p. 1–1, 2019. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2019.2961959>.

GALSGAARD, B. *et al.* Circular Hough Transform and Local Circularity Measure for Weight Estimation of a Graph-Cut Based Wood Stack Measurement. **2015 IEEE Winter Conference on Applications of Computer Vision**, p. 686–693, jan. 2015. DOI: <https://doi.org/10.1109/WACV.2015.97>

GOMMERS, R. *et al.* `scipy/scipy`: SciPy 1.15.0. **Zenodo**, 2025. DOI: <https://doi.org/10.5281/zenodo.14593523>

HUSSAIN, M. YOLO-v1 to YOLO-v8, the Rise of YOLO and Its Complementary Nature toward Digital Manufacturing and Industrial Defect Detection. **Machines**, v. 11, n. 7, p. 677, 1 jul. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/machines11070677>.

LEI, M. *et al.* YOLOv13: Real-Time Object Detection with Hypergraph-Enhanced Adaptive Visual Perception. **arXiv (Cornell University)**. 2025. DOI: <https://doi.org/10.48550/arXiv.2506.17733>

LEITE, H. G.; ANDRADE, V. C. L. DE. Um método para condução de inventários florestais sem o uso de equações volumétricas. **Revista Árvore**, v. 26, n. 3, p. 321–328, maio 2002. DOI: <https://doi.org/10.1590/S0100-67622002000300007>

LEITE, M. V. S. *et al.* Classificação da capacidade produtiva com alturas de árvores dominantes estimadas por RNA. **Ciência Florestal**, v. 32, n. 3, p. 1552–1574, 22 set. 2022. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509867120>

LEITE, H. G.; TAVARES DE OLIVEIRA, F. H. Statistical procedure to test identity between analytical methods. **Communications in Soil Science and Plant Analysis**, v. 33, n. 7-8, p. 1105–1118, 28 maio 2002. DOI: <https://doi.org/10.1081/css-120003875>

LIU, C. *et al.* Insulator Faults Detection in Aerial Images from High-Voltage Transmission Lines Based on Deep Learning Model. **Applied Sciences**, v. 11, n. 10, p. 4647, 19 maio 2021. DOI: <https://doi.org/10.3390/app11104647>.

LI, H.; LIU, J.; WANG, D. A Fast Instance Segmentation Technique for Log End Faces Based on Metric Learning. **Forests**, v. 14, n. 4, p. 795–795, 13 abr. 2023. DOI: <https://doi.org/10.3390/f14040795>

LI, R.; WU, Y. Improved YOLO v5 Wheat Ear Detection Algorithm Based on Attention Mechanism. **Electronics**, v. 11, n. 11, p. 1673, 24 maio 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/electronics11111673>

LIN, X. *et al.* WDNET-YOLO: Enhanced Deep Learning for Structural Timber Defect Detection to Improve Building Safety and Reliability. **Buildings**, v. 15, n. 13, p. 2281, 28 jun. 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/buildings15132281>

LOPES, L. S. S. **Análise de métodos estatísticos em experimento com medidas repetidas no tempo**. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2020.

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 - Brazilian Journal of Agricultural Sciences**, v. 11, n. 1, p. 33–38, 31 mar. 2016. DOI: <https://doi.org/10.5039/agraria.v11i1a5354>

MAZZOCHIN J. V. C. *et al.* A Novel Approach for the Counting of Wood Logs Using cGANs and Image Processing Techniques. **Forests**, v. 16, n. 2, p. 237–237, 26 jan. 2025. DOI: <https://doi.org/10.3390/f16020237>

MOHAMMED *et al.* A Comprehensive Systematic Review of YOLO for Medical Object Detection (2018 to 2023). **IEEE access**, p. 1–1, 1 jan. 2024. DOI: <https://doi.org/10.1109/ACCESS.2024.3386826>

MOSKALIK, T. *et al.* Methods of Wood Volume Determining and Its Implications for Forest Transport. **Sensors (Basel, Switzerland)**, v. 22, n. 16, p. 6028, 12 ago. 2022. DOI: <https://doi.org/10.3390/s22166028>

PEREIRA, A. P. **Emprego do Método de Bitterlich em Inventários Florestais e em modelagem do Crescimento e da Produção**. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2002.

PINTO L O R, DANTAS D, TERRA M C N S, MELLO J M, CABACINHA C D. Cost, time and accuracy: an optimization of the pre-harvest forest inventory in a eucalyptus stands. **Pesquisa Florestal Brasileira**, 44. 2024. <https://doi.org/10.4336/2024.pfb.44e202102251>

Pixlog - Precisão ao seu alcance. Disponível em: <https://pixlog.com.br>
Acesso em: 28 nov. 2024.

PORTNOV, A., SHUBIN, A., & GULFINA FROLOVA. The effect of pre- and post-processing techniques on tree detection in young forest stands from images of snow cover using YOLO neural networks. **European Journal of Forest Engineering**. 2024. DOI: <https://doi.org/10.33904/ejfe.1462335>

REDMON, J. *et al.* You Only Look Once: Unified, Real-Time Object Detection. **Cv-foundation.org**, p. 779–788, 2016.

REIS, A. A. D. *et al.* Temporal stability of stratifications using different dendrometric variables and geostatistical interpolation. **Ciência Florestal**, v. 32, n. 1, p. 102–121, 25 mar. 2022. DOI: <https://doi.org/10.5902/1980509843274>

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, 23 abr. 2020. DOI: <https://doi.org/10.1139/cjfr-2020-0051>

SILVEIRA, D. P. **Estimação do volume de madeira empilhada utilizando imagens digitais e redes neurais**. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, MG, 2014.

SOARES, C.P.B.; PAULA NETO. F.; SOUZA, A.L. **Dendrometria e inventário florestal**. 2. Ed. Viçosa: Editora UFV. 2011. 272 p.

SOUZA *et al.* EVALUATION OF NON-LINEAR TAPER EQUATIONS FOR PREDICTING THE DIAMETER OF EUCALYPTUS TREES. **Revista Árvore**, v. 42, n. 1, 28 mar. 2018. DOI: <http://doi.org/10.1590/1806-90882018000100002>

STOLLE, L. **Inventário florestal: inferência por área ou por número de árvores?**. Tese (Doutorado em Ciência Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, PR, 2021.

TAVARES JUNIOR, I. S. *et al.* Machine learning and regression models to predict multiple tree stem volumes for teak. **Southern Forests: A Journal of Forest Science**, n. 83, p. 1-09, 2022. DOI: <https://doi.org/10.2989/20702620.2021.1994345>

WANG, Y. *et al.* Insulator defect recognition based on Faster R-CNN. In: **Proceedings of the 2020 International Conference on Computer, Information and**

Telecommunication Systems (CITS), Hangzhou, China, 5–7 out. 2020. DOI: <http://doi.org/10.1109/CITS49457.2020.9232614>.

WOODTECH. A red to green company. Acesso: ago. 2024. Disponível em: <https://www.woodtechms.com/pt/logmeter>.

WOODTECH. A red to green company. Laser technology for mensuring volume os logs loaded on moving vehicules., il. color. Acesso: ago. 2024. Disponível em: https://www.woodtechms.com/pt/files/ugd/b374e6_751359a46f824ff5a23682ae9206fe0c.pdf.

YU, C. *et al.* Log Volume Measurement and Counting Based on Improved Cascade Mask R-CNN and Deep SORT. **Forests**, v. 15, n. 11, p. 1884, 26 out. 2024. DOI: <https://doi.org/10.3390/f15111884>

APÊNDICE A

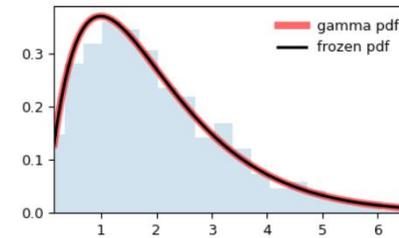
Descrição das distribuições estatísticas do pacote SciPy

Distribuição	Modelo	Gráfico da distribuição
Beta (<i>beta</i>)	$f(x, a, b) = \frac{\Gamma(a + b)x^{a-1}(1 - x)^{b-1}}{\Gamma(a)\Gamma(b)}$ <p>Em que $0 \leq x \leq 1$; $a > 0$; $b > 0$; Γ é a função gamma</p>	
Burr (<i>burr</i>)	$f(x; c; d) = cd \frac{x^{-c-1}}{(1 + x^{-c})^{d+1}}$ <p>Em que $x \geq 0$ e $c; d > 0$</p>	
Erlang (<i>erlang</i>)	$f(x; \alpha; n) = \frac{\alpha^n x^{n-1} e^{-\alpha x}}{(n - 1)!}$ <p>Em que $x \geq 0$; $\alpha > 0$; e n é um número inteiro</p>	
Fatigue-Life (<i>fatiguelife</i>)	$f(x; c) = \frac{x + 1}{2c\sqrt{2\pi}x^3} e^{(-\frac{(x-1)^2}{2xc^2})}$ <p>Em que $x \geq 0$ e $c > 0$</p>	

Gama (*gamma*)

$$f(x; \alpha; \beta) = \frac{\beta^\alpha x^{\alpha-1} e^{-\beta x}}{\Gamma(\alpha)}$$

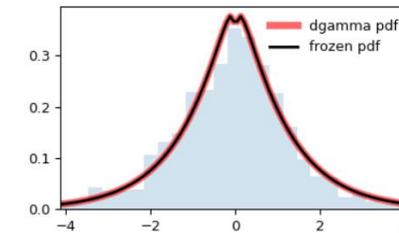
Em que $x \geq 0$; $\alpha > 0$; $\beta > 0$; Γ é a função gamma



Gama Dupla
(*dgamma*)

$$f(x; a) = \frac{|x|^{a-1} e^{-|x|}}{2\Gamma(a)}$$

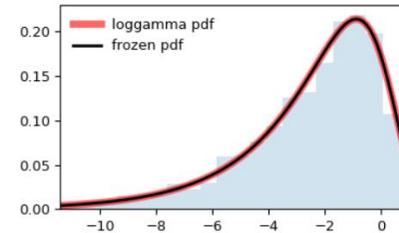
Em que $x =$ número real; $a > 0$; Γ é a função gamma



Log-Gama
(*loggamma*)

$$f(x; c) = \frac{e^{(cx - e^x)}}{\Gamma(c)}$$

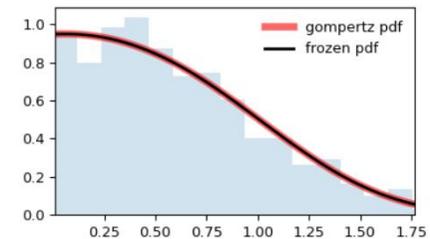
Em que x e $c > 0$; Γ é a função gamma



Gompertz
(*gompertz*)

$$f(x; c) = ce^{x(e^{-c(e^x-1)})}$$

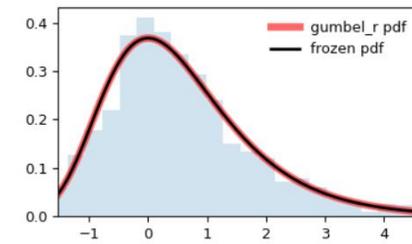
Em que $x \geq 0$; $c > 0$



Gumbel Direita
(*gumbel_r*)

$$f(x) = e^{-(e+e^{-x})}$$

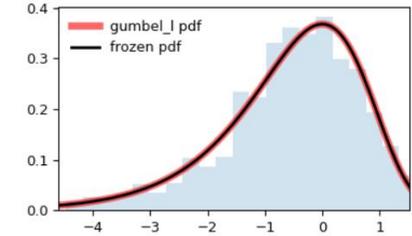
Em que x = número real



Gumbel Esquerda
(*gumbel_l*)

$$f(x) = e^{(x-e^x)}$$

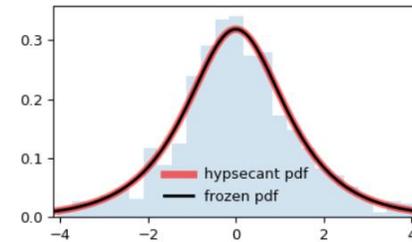
Em que x = número real



Hiperbólica Secante
(*hypsecant*)

$$f(x) = \frac{\operatorname{sech}(x)}{\pi}$$

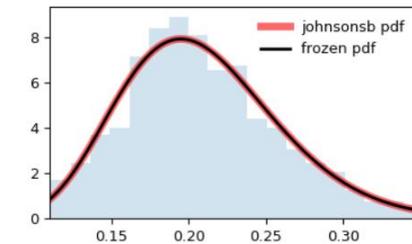
Em que x = número real



Johnson SB
(*johnsonsb*)

$$f(x; \alpha; b) = \frac{b}{x(1-x)} \phi\left(a + b \log \frac{x}{1-x}\right)$$

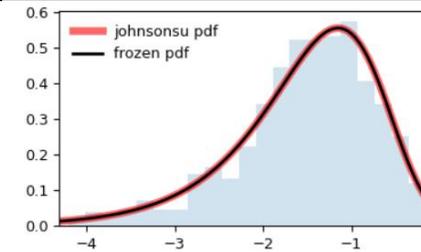
Em que x, a, b é um escalar real; $b > 0$ e $x \in [0,1]$; ϕ é a função densidade probabilidade da distribuição normal



Johnson SU
(johnsonsu)

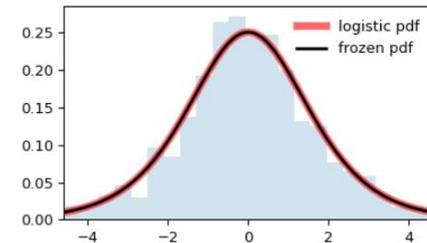
$$f(x; a; b) = \frac{b}{\sqrt{x^2 + 1}} \phi \left(a + b \log (x + \sqrt{x^2 + 1}) \right)$$

Em que x, a, b é um escalar real; $b > 0$ e $x \in [0,1]$; ϕ é a função densidade probabilidade da distribuição normal



Logística (logistic)

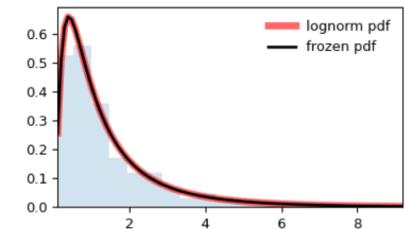
$$f(x) = \frac{e^{-x}}{(1 + e^{-x})^2}$$



Log-Normal
(lognorm)

$$f(x; s) = \frac{1}{sx\sqrt{2\pi}} e^{\left(-\frac{\log^2(x)}{2s^2}\right)}$$

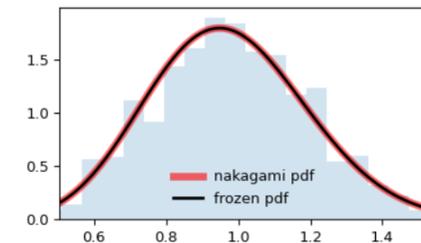
Em que $x, s > 0$



Nakagami
(nakagami)

$$f(x; v) = \frac{2v^v}{\Gamma(v)} x^{2v-1} e^{-vx^2}$$

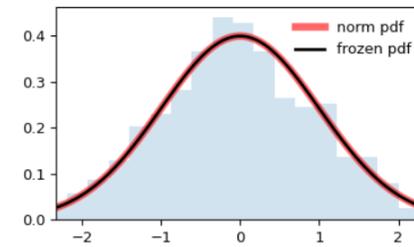
Em que $x \geq 0, v > 0$.



Normal (*norm*)

$$f(x) = \frac{e^{\left(\frac{-x^2}{2}\right)}}{\sqrt{2\pi}}$$

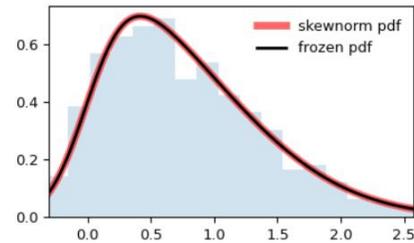
Em que x = número real



Normal Assimétrica
(*skewnorm*)

$$f(x; \alpha) = 2\phi(x)\Phi(\alpha x)$$

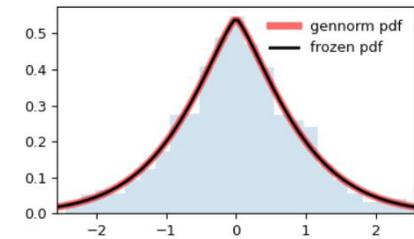
Em que $\phi(x)$ é a função densidade probabilidade da normal padrão e a $\Phi(x)$ é a função densidade acumulada da normal padrão



Normal
Generalizada
(*gennorm*)

$$f(x; \beta) = \frac{\beta}{2\Gamma\left(\frac{1}{\beta}\right)} e^{(-|x|^\beta)}$$

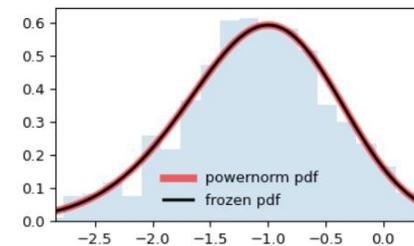
Em que x = número real $\beta > 0$ Γ é a função gamma



Normal Potencial
(*powernorm*)

$$f(x; c) = c\phi(x)(\Phi(-x))^{c-1}$$

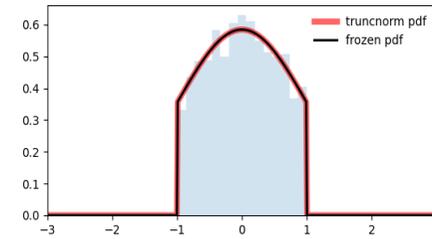
Em que $\phi(x)$ é a função densidade probabilidade da normal padrão e a $\Phi(x)$ é a função densidade acumulada da normal padrão e $x, c > 0$



Normal Truncada
(*truncnorm*)

$$f(x; a; b) = \frac{\phi(x)}{\Phi(b) - \Phi(a)}$$

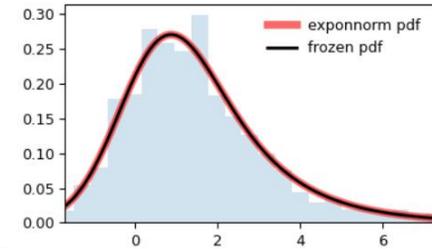
Em que $\phi(x)$ é a função densidade probabilidade da normal padrão e a $\Phi(x)$ é a função densidade acumulada da normal padrão e $a < x < b$



Normal Modificada Exponencialmente
(*exponnorm*)

$$f(x; K) = \frac{1}{2K} e^{\left(\frac{1}{2k^2} - \frac{x}{k}\right) \operatorname{erfc}\left(-\frac{x-\frac{1}{k}}{\sqrt{2}}\right)}$$

Em que x = número real $K > 0$

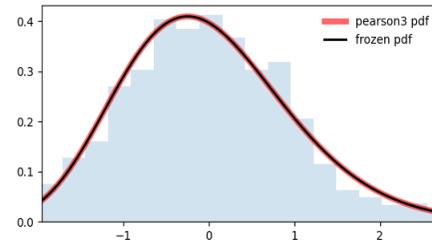


Pearson Tipo III
(*pearson3*)

$$f(x; k) = \frac{|\beta|}{\Gamma(\alpha)} (\beta(x - \zeta))^{\alpha-1} e^{-\beta(x-\zeta)}$$

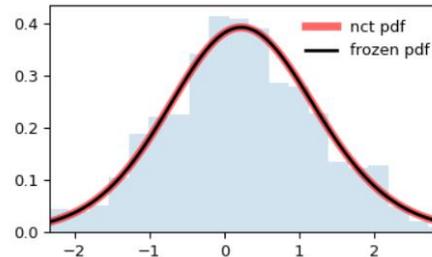
Em que $\beta = \frac{2}{k}$; $\alpha^2 = \frac{4}{k^2}$; $\zeta = -\frac{\alpha}{\beta} = -\beta$

Γ é a função gamma



t de Student não Central (*nct*)

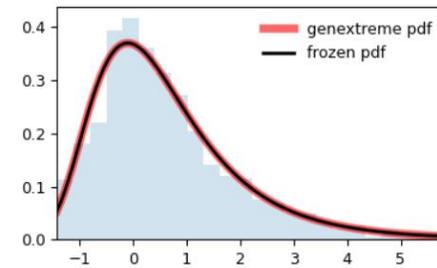
$$X = \frac{Y + c}{\sqrt{\frac{V}{k}}}$$



Valor Extremo
Generalizado
(*genextreme*)

$$f(x; c) = e^{(-1-cx)^{\frac{1}{c}}}(1-cx)^{\frac{1}{c-1}}$$

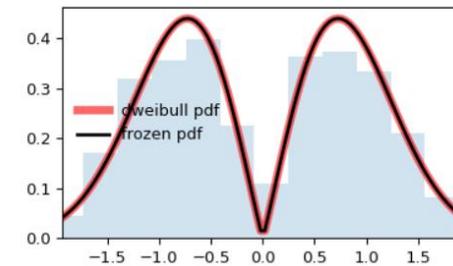
Em que $-\infty < x \leq \frac{1}{c}$ se $c > 0$ e $\frac{1}{c} \leq x < \infty$ se $c < 0$



Weibull Dupla
(*dweibull*)

$$f(x; c) = \frac{c}{2}|x|^{c-1}e^{-|x|^c}$$

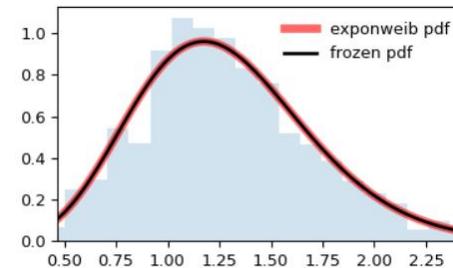
Em que $x = \text{número real}$ $c > 0$



Weibull
Exponenciada
(*exponweib*)

$$f(x; a; c) = ac[1 - e^{(-x^c)}]^{a-1}e^{(-x^c)x^{c-1}}$$

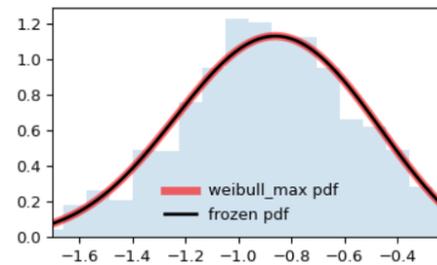
Em que $x, a, c > 0$



Weibull Máxima
(*weibull_max*)

$$f(x; c) = c(-x)^{c-1}e^{(-(-x)^c)}$$

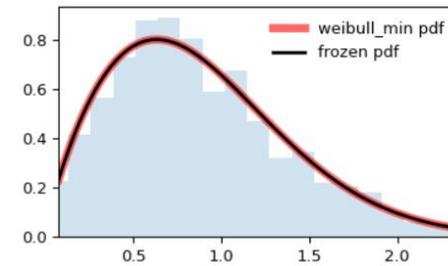
Em que $x < 0, c > 0$



Weibull Mínima
(*weibull_min*)

$$f(x; c) = cx^{c-1}e^{(-x)^c}$$

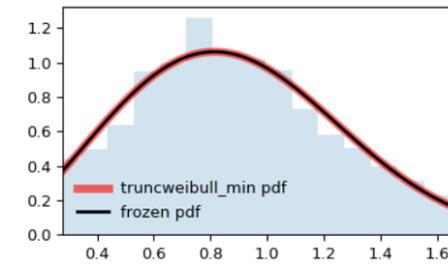
Em que $x < 0, c > 0$



Weibull Mínima
Truncada
(*truncweibull_min*)

$$f(x; a; b; c) = \frac{cx^{c-1}e^{(-x)^c}}{e^{(-a)^c} - e^{(-b)^c}}$$

Em que $a < x \leq b, 0 < a < b$ e $c > 0$



Fonte: SciPy 1.15.0 (2025)

APÊNDICE B

Teste não paramétrico de Kolmogorov-Smirnov (KS) aplicado para comparar as distribuições de diâmetros das duas faces da pilha

Ano	Projeto	Talhão	Amostra	Nº de Toras	Estatísticas KS	P-Valor	Diâmetro Mínimo Face A	Diâmetro Mínimo Face B	Diâmetro Máximo Face A	Diâmetro Máximo Face B	Diâmetro Médio Face A	Diâmetro Médio Face B
2022	A	1	1884	297	0,0673	0,5117	5,1	12,33	24,1	6,7	12,62	23,4
2022	A	2	1890	273	0,0366	0,9932	5,4	12,65	19,5	6,7	12,65	19,3
2022	A	25	1963	301	0,0698	0,457	3,4	11,21	25,9	3,9	10,98	24,5
2022	A	26	1964	309	0,0356	0,9898	4,1	10,71	19,3	4	10,76	20,1
2022	A	27	1965	266	0,0489	0,9093	4,9	12,12	19,6	4	12,02	19,8
2022	A	28	1969	234	0,0342	0,9992	5,9	12,6	21,3	5,7	12,55	21,5
2022	A	29	1971	282	0,0603	0,6857	5	11,75	18,7	4,5	11,58	18,3
2022	A	30	1972	233	0,0601	0,7954	4,4	11,88	22,5	3,2	11,71	23,7
2022	A	32	1974	264	0,0341	0,998	3,6	12,45	22,9	4,5	12,38	22,7
2022	A	34	1985	327	0,0673	0,4504	3,4	11,1	22,9	3,9	11,1	22,4
2022	A	35	1986	329	0,0365	0,9812	4,6	11,82	25,9	4,6	11,83	24,5
2022	A	36	1987	306	0,0784	0,3038	5	10,92	28,5	3,9	10,56	27,1
2022	A	37	1988	437	0,0412	0,8529	4,5	10,2	22,9	4,3	10,09	24,2
2022	A	39	1990	268	0,0373	0,9924	4,5	12,28	21,6	4,9	12,3	22,2
2022	A	40	1991	298	0,0403	0,9695	4,3	11,64	20,9	4,8	11,49	21,8
2022	A	41	1994	289	0,0484	0,8876	5,2	12,36	19,6	6,1	12,18	20,2
2022	A	42	1997	238	0,042	0,985	6,2	13,57	25,6	5,3	13,52	26,6
2022	A	43	1998	266	0,0489	0,9093	4,9	12,76	22,8	5,7	12,62	20,2
2022	A	44	1999	287	0,0383	0,9846	4,8	12,28	23,3	5,1	12,31	22,5
2022	B	9	1918	204	0,049	0,9677	5,3	13,58	23,4	5,6	13,66	23,6
2022	B	10	1920	223	0,0314	0,9999	5,1	13,03	20,9	5,5	13,1	21,7
2022	B	11	1922	197	0,0355	0,9997	6,1	13,69	24,7	5,9	13,76	24,6
2022	B	12	1923	216	0,0417	0,9922	6,1	13,77	26	6,5	13,8	27,4
2022	B	16	1939	225	0,04	0,994	6	13,1	27,9	6,1	13,07	27,9
2022	B	17	1940	185	0,0378	0,9994	6,7	14,7	29,1	6,4	14,55	28,9
2022	B	18	1945	252	0,0556	0,8326	4,9	13,45	23	5,6	13,38	24
2022	B	19	1947	204	0,0392	0,9977	5,7	14,44	24,8	5,7	14,33	26,1
2022	B	20	1949	228	0,0482	0,9541	6	12,72	22,7	5,6	12,69	21,7
2022	B	21	1952	295	0,0271	0,9999	5,4	12,33	20,9	6	12,29	20,9

2022	B	22	1954	255	0,0314	0,9996	4,7	13,22	22,1	5,9	13,16	20,8
2022	B	23	1955	176	0,0568	0,9399	7	15,63	33,1	6,7	15,3	32,9
2022	B	24	1958	225	0,0533	0,9072	6,4	14,43	25,7	4,8	14,4	25,4
2022	B	31	1973	215	0,0698	0,6733	5,9	13,2	20,6	5,4	12,9	20,8
2022	B	33	1981	191	0,0681	0,7696	5,4	13,19	21,1	5,1	13,19	21,8
2022	B	38	1989	201	0,0498	0,9654	7	14,07	26,2	6,6	14,31	26
2022	C	3	1897	259	0,0386	0,9907	5,4	12,2	19,5	6,1	12,31	19,9
2022	C	4	1898	285	0,0351	0,9949	4,9	11,96	22,4	5,3	12,04	21,6
2022	C	4	1899	287	0,0383	0,9846	4,4	11,97	21,2	5,6	12,07	20,3
2022	C	5	1906	346	0,0289	0,9988	4,7	11,88	20	4,5	11,89	18,8
2022	C	6	1908	240	0,0458	0,9632	4,7	12,88	22,3	5	12,88	21,8
2022	C	7	1911	277	0,0433	0,9579	6,3	12,95	21,5	6,6	12,92	21
2022	C	8	1913	248	0,0363	0,9969	5,1	12,89	22,9	4,4	12,99	23
2022	C	13	1928	306	0,0621	0,5977	5,4	11,85	23,9	4,7	11,6	22,9
2022	C	14	1931	261	0,0383	0,9911	5,9	12,62	18,6	6,3	12,56	18,9
2022	C	15	1932	306	0,0359	0,9892	6,1	11,92	20,8	5,5	11,87	21,6
2022	C	15	1933	286	0,035	0,995	5,3	11,3	18,9	5,6	11,34	18,3
2023	D	45	2017	281	0,0249	1	3,8	11,53	18,8	4,4	11,52	19,3
2023	D	45	2021	229	0,0437	0,9816	4,9	12,53	22,5	4,4	12,51	23,8
2023	D	46	2022	306	0,0458	0,9067	5,3	12,04	20,4	5	11,94	19,4
2023	D	47	2024	299	0,0301	0,9993	4,8	11,2	19,3	4,5	11,18	19,1
2023	D	48	2026	325	0,0523	0,7664	5,2	11,53	20,9	4,7	11,47	21,8
2023	D	49	2036	270	0,0481	0,9138	5,6	12,04	22,9	5,7	11,95	23,1
2023	D	49	2037	285	0,0316	0,9989	5	12,09	19,9	5,1	12,12	20,1
2023	D	49	2046	321	0,0374	0,9787	5,6	12,05	18,2	4,9	12,07	18,9
2023	D	50	2054	276	0,0471	0,9202	6,3	12,67	21,3	6,1	12,75	19,6
2023	D	51	2065	358	0,0531	0,6952	4,3	10,82	19,4	5,3	11	21
2023	D	52	2071	293	0,0922	0,1662	5,9	12,06	22,7	5	12,5	22,1
2023	D	52	2072	224	0,0625	0,7753	5	12,8	21,5	5,6	13,16	22,6
2023	D	53	2075	289	0,0623	0,6302	5,8	12,59	21,4	6,4	12,87	21,4
2023	D	65	2175	266	0,0414	0,9772	5,3	13,17	25,8	6,5	13,4	27,5
2023	D	67	2177	310	0,0645	0,5396	4,2	12,16	20,9	4,7	12,53	23,2
2023	D	68	2184	241	0,0664	0,664	5,3	13,23	26,3	5	13,66	27,7
2023	D	68	2186	263	0,0532	0,8511	4,8	12,46	22,7	5,2	12,69	24,7
2023	D	69	2190	225	0,0356	0,9989	5,4	13,67	24,9	5,8	13,76	25,5

2023	D	70	2196	215	0,0419	0,992	4,1	13,15	22,4	3,4	13,23	22,1
2023	D	71	2197	201	0,0348	0,9997	5,4	14,23	27,7	4,9	14,37	28,2
2023	D	72	2203	288	0,0417	0,9644	3,9	10,92	19,4	4,4	11,02	20,3
2023	E	54	2077	530	0,0491	0,5469	3,9	8,92	17,5	3,2	9,12	16,6
2023	E	55	2079	264	0,0379	0,9917	4	12,78	22,8	4,8	12,88	22
2023	E	55	2080	259	0,0425	0,9741	5,1	12,14	23,9	5,1	12,42	24,3
2023	E	56	2085	273	0,0549	0,8054	4,4	12,23	22,2	5,2	12,49	22,9
2023	E	56	2086	261	0,0421	0,975	4,1	13,03	23,5	4,9	13,11	24
2023	E	57	2094	249	0,0763	0,464	4,7	11,84	20,9	5,3	12,29	21,3
2023	E	58	2108	261	0,0575	0,7829	5,9	12,8	20,1	5,4	13,03	21,2
2023	E	59	2110	257	0,0506	0,8983	4,7	13,09	20,9	5,8	13,25	20,8
2023	E	60	2125	274	0,0547	0,8071	4,3	12,29	21,5	4,7	12,5	22,2
2023	E	61	2143	300	0,0667	0,5183	4,4	11,28	21,2	4,8	10,94	20,6
2023	E	62	2152	349	0,0659	0,4351	3,7	10,52	18,7	2,6	10,09	17,7
2023	E	63	2160	356	0,1011	0,0524	4,5	11,07	21,9	3,3	10,38	21
2023	E	64	2171	280	0,0357	0,9942	4,4	11,39	22,4	4,6	11,5	21,9
2023	E	66	2176	367	0,079	0,2022	3,6	10,96	26,4	4,5	11,11	27,7
2024	F	76	2284	436	0,0917	0,0509	5,8	13,82	30,5	5,4	14,1	29,4
2024	F	79	2290	255	0,051	0,8957	5,5	12,93	28,3	5,3	13,1	27,2
2024	F	80	2292	160	0,05	0,9887	6,5	16,03	30,1	6,6	16,2	30
2024	F	81	2294	241	0,0456	0,9639	5,8	12,63	23,2	5,2	12,7	22,6
2024	F	82	2295	232	0,0388	0,9951	5,9	12,51	22,2	6,1	12,54	23,4
2024	F	83	2297	253	0,0435	0,971	6,2	13,03	22,3	6,4	13,11	23,5
2024	F	84	2302	241	0,0456	0,9639	3,9	13,02	21,8	5,3	13,07	22,4
2024	F	85	2307	150	0,0667	0,8943	7,1	15,85	28	6,1	15,98	27,9
2024	F	86	2308	195	0,0359	0,9996	5,9	15,28	25,6	5,4	15,19	27,1
2024	F	87	2309	161	0,0435	0,9982	7,3	16,38	30	7,7	16,31	28,6
2024	F	88	2311	228	0,057	0,8536	5,3	12,96	22,1	4,8	13,05	21,2
2024	F	88	2312	265	0,0528	0,8543	5,5	12,84	22,6	5,9	13	22,2
2024	F	88	2313	257	0,0467	0,9428	4,3	13,24	24,2	4,2	13,26	23,1
2024	F	89	2317	269	0,0558	0,7981	5,5	12,13	20,5	5,5	12,31	21,4
2024	F	90	2321	191	0,0524	0,9568	4,1	15,39	29,7	5,4	15,51	28,4
2024	F	102	2342	190	0,0632	0,8444	6,6	14,38	23,2	6,1	14,42	25
2024	F	104	2346	198	0,0404	0,9971	5,5	14,27	24	4,8	14,36	24,4
2024	F	104	2347	213	0,0563	0,889	4,9	13,03	30,8	4,6	13,21	30

2024	G	91	2325	245	0,0531	0,8816	5	12,72	22,6	5	12,87	22,8
2024	G	92	2326	243	0,037	0,9964	5,2	13,47	26,5	5,4	13,46	25,2
2024	G	93	2327	206	0,068	0,7296	5,2	13,26	26,3	4,5	13,53	27,1
2024	G	94	2328	184	0,087	0,491	5,4	14,95	29,2	4,8	15,18	27,5
2024	G	94	2329	227	0,0485	0,9533	5,2	13,92	24,3	4,5	14,12	25,1
2024	G	95	2330	177	0,0452	0,9939	5	14,72	28,6	5,6	14,89	30,9
2024	G	96	2334	230	0,0696	0,635	4,6	12,5	22	3,9	12,82	22,9
2024	G	97	2336	226	0,0354	0,999	5	12,94	23,5	4,2	13,04	23,3
2024	G	98	2338	213	0,061	0,8237	4,7	12,98	24,7	6,3	13,25	25,5
2024	G	99	2339	261	0,0383	0,9911	4,8	11,79	20,9	4,1	11,9	20,7
2024	G	100	2340	226	0,0487	0,9524	3,5	12,69	23,4	5,5	12,83	22,5
2024	G	101	2341	221	0,0271	1	6,4	13,87	26,4	6,3	13,85	24,6
2024	G	103	2345	238	0,0336	0,9993	4,8	13,81	23	6,8	13,92	23,6
2024	G	105	2353	212	0,0519	0,9387	7	14,48	24,7	7,6	14,83	24,9
2024	G	105	2355	231	0,0433	0,9824	4,9	13,92	27,2	5,2	14,17	28
2024	G	106	2356	215	0,093	0,3106	3,7	12,58	23,7	5	13,21	23,9
2024	G	107	2357	197	0,0558	0,9196	5,4	13,94	33,2	5,5	13,64	35,4
2024	G	108	2360	215	0,0605	0,828	6,4	14,09	25,7	6,5	14,22	25,6
2024	G	109	2375	197	0,0508	0,9622	5,7	13,83	33	6,5	14,15	29,9
2024	H	73	2274	264	0,0417	0,9764	5,7	12,63	19,7	4,9	12,62	20,9
2024	H	74	2275	271	0,0295	0,9998	5,1	12,08	21,7	5	12,17	20,4
2024	H	75	2283	538	0,0483	0,5566	5,5	12,89	23,5	5,2	13,02	23,2
2024	H	77	2286	277	0,0794	0,3471	4,4	12,8	23	3,8	13,17	24,5
2024	H	77	2288	269	0,0595	0,7291	6,3	13,13	21	5,6	13,33	22
2024	H	78	2289	256	0,0469	0,9419	5,5	13,62	25,8	6,6	13,8	27

APÊNDICE C

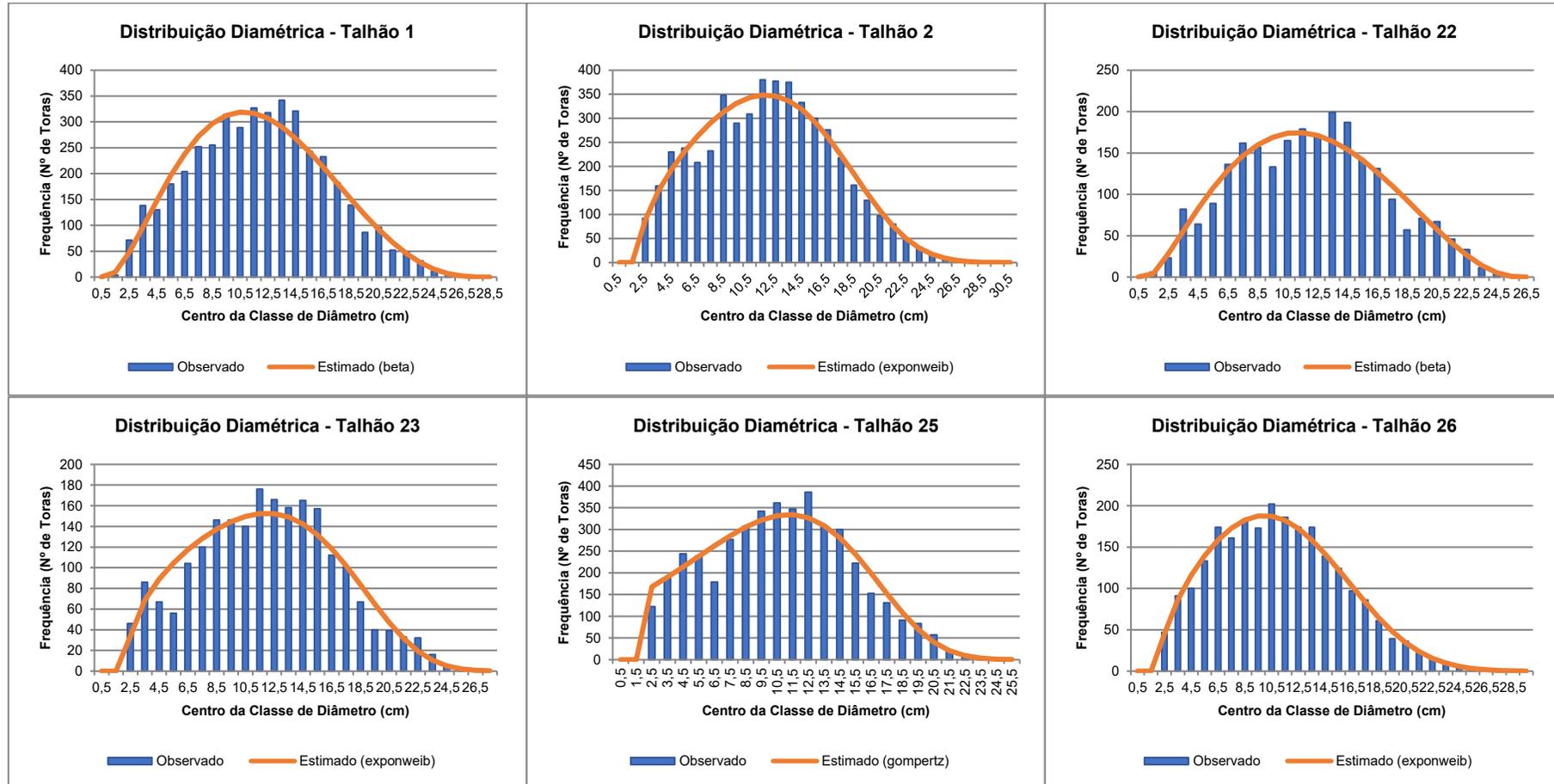
Estatísticas de avaliação dos modelos de afilamento testados em cada um dos projetos.

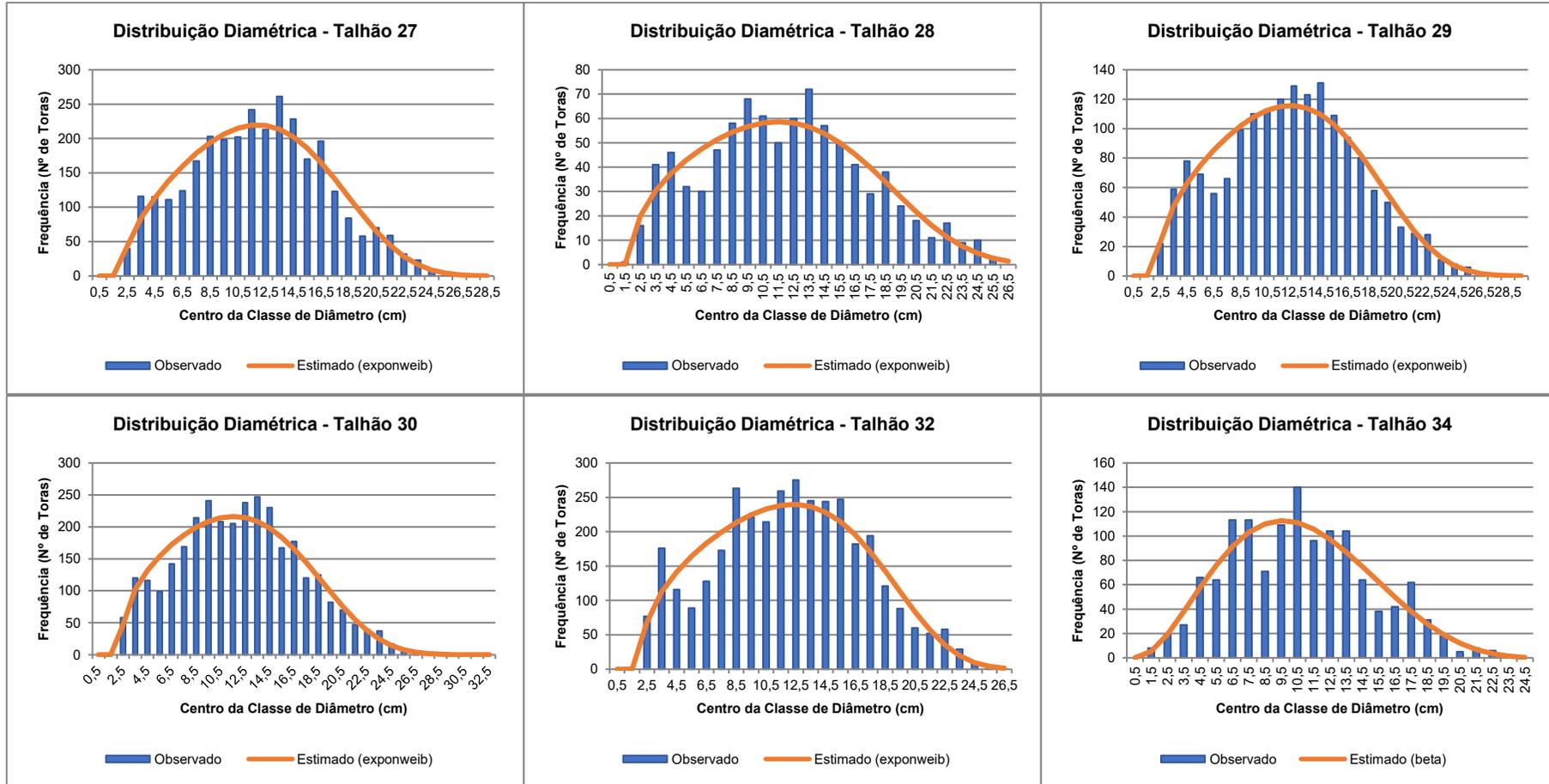
Ano	Projeto	Modelo	a0	a1	a2	a3	SQR	Ryy	Bias (d)	MDA (d)	RQEM (d)
2022	A	Demaerschalk	0,026692	1,035295	-0,345352	0,325437	223,76	0,9977	0,0980	0,5233	0,7188
		Kozak	1,075278	-1,532587	0,447645	-	213,25	0,9978	0,0845	0,5051	0,6907
		Ormerod	1,200000	0,652915	-	-	226,68	0,9976	0,1039	0,5243	0,7100
		Garay	1,152567	0,290129	0,967684	0,316756	167,85	0,9982	0,0838	0,4402	0,5852
2022	B	Demaerschalk	-1,042841	0,380005	0,270214	0,342225	326,10	0,9985	-0,3783	0,8111	1,2185
		Kozak	1,040180	-1,567952	0,519659	-	354,74	0,9984	0,1667	0,6441	0,8855
		Ormerod	1,200000	0,705969	-	-	400,69	0,9982	0,2822	0,7452	0,9463
		Garay	1,174686	0,270030	0,976705	0,245934	259,70	0,9988	0,1526	0,5420	0,7258
2022	C	Demaerschalk	0,068103	1,126127	-0,417685	0,342108	139,79	0,9970	-0,0358	0,3952	0,5458
		Kozak	1,050318	-1,579330	0,521181	-	147,61	0,9968	-0,0197	0,4174	0,5580
		Ormerod	1,200000	0,704343	-	-	169,33	0,9964	0,1011	0,4705	0,5984
		Garay	1,102207	0,350135	0,941572	0,418349	105,50	0,9977	-0,0258	0,3724	0,4865
2023	D	Demaerschalk	-0,039020	0,999371	-0,315660	0,331423	191,81	0,9986	0,1280	0,5587	0,7703
		Kozak	1,041611	-1,500526	0,446628	-	184,91	0,9987	0,1432	0,5450	0,7416
		Ormerod	1,200000	0,683130	-	-	213,61	0,9985	0,2796	0,6400	0,8171
		Garay	1,112350	0,317862	0,956450	0,373334	144,27	0,9990	0,1506	0,4691	0,6354
2023	E	Demaerschalk	-0,165285	0,836361	-0,227688	0,370356	200,48	0,9991	0,7131	0,9605	1,2557
		Kozak	1,089227	-1,737960	0,634460	-	191,35	0,9992	0,0945	0,5855	0,7790
		Ormerod	1,200000	0,756742	-	-	216,07	0,9991	0,0470	0,6183	0,8075
		Garay	1,367578	0,227106	0,989138	0,117511	95,58	0,9996	0,1048	0,4743	0,6393
2024	F	Demaerschalk	-0,030768	1,013012	-0,353794	0,361276	201,22	0,9991	0,0978	0,6469	0,9214
		Kozak	1,047965	-1,641428	0,582128	-	194,61	0,9991	0,0481	0,6010	0,8734
		Ormerod	1,200000	0,741376	-	-	216,47	0,9990	0,1225	0,6873	0,9341
		Garay	1,142264	0,315404	0,960395	0,321733	135,90	0,9994	0,0462	0,5163	0,7056
2024	G	Demaerschalk	0,007571	0,980540	-0,361252	0,370874	415,10	0,9989	-0,0802	0,6139	0,8753
		Kozak	1,068494	-1,736079	0,660394	-	383,53	0,9990	-0,0847	0,5895	0,8354
		Ormerod	1,200000	0,750506	-	-	420,24	0,9988	-0,0560	0,6379	0,8834
		Garay	1,233132	0,276020	0,973668	0,209733	243,86	0,9993	-0,0982	0,4925	0,6528
2024	H	Demaerschalk	0,007571	0,980540	-0,361252	0,370874	252,42	0,9975	0,0153	0,5716	0,8237
		Kozak	1,068494	-1,736079	0,660394	-	233,37	0,9977	0,0017	0,5434	0,7921
		Ormerod	1,200000	0,750506	-	-	268,49	0,9974	0,0714	0,6067	0,8363
		Garay	1,233132	0,276020	0,973668	0,209733	163,33	0,9984	-0,0128	0,4269	0,6050

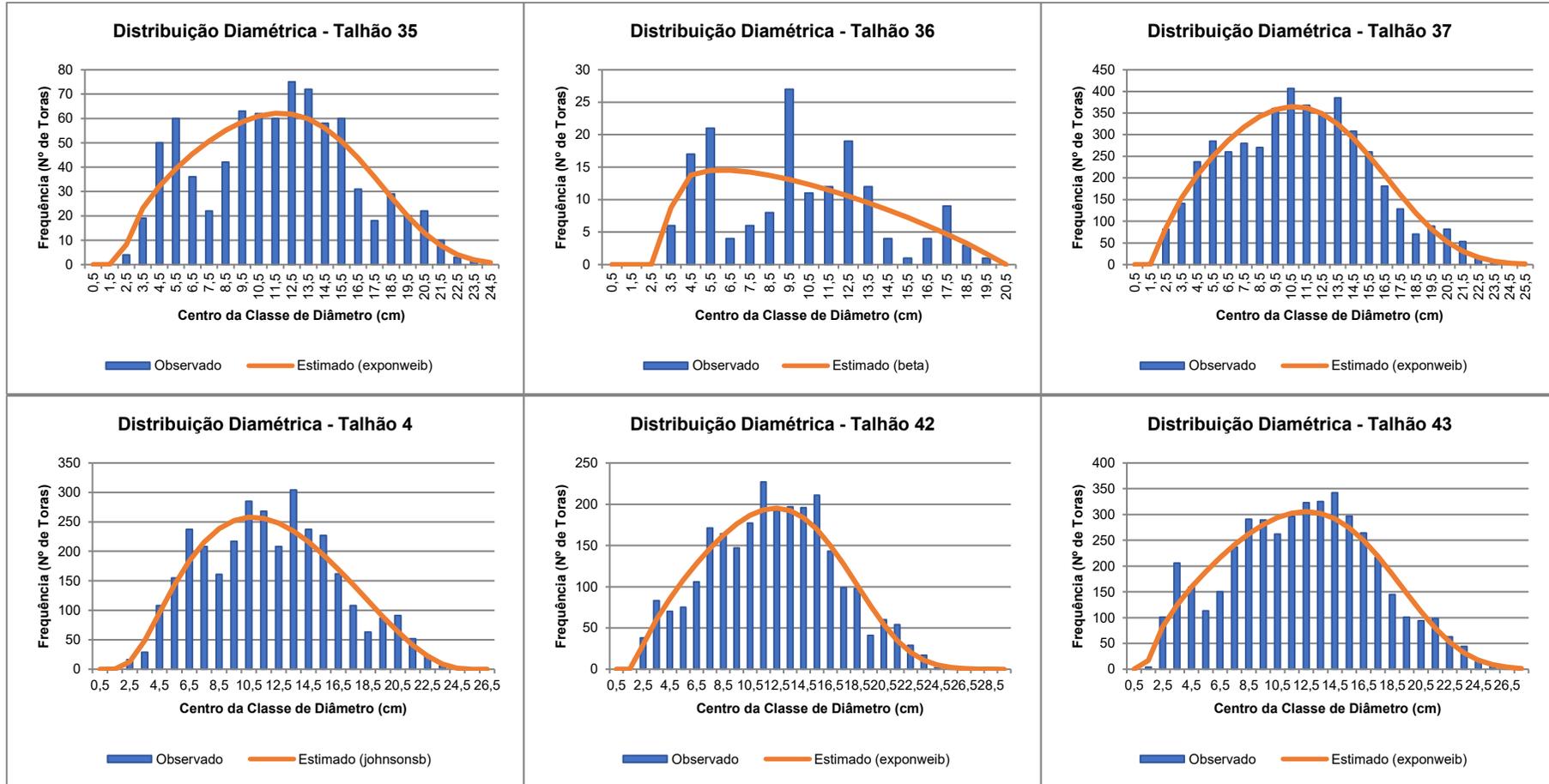
APÊNDICE D

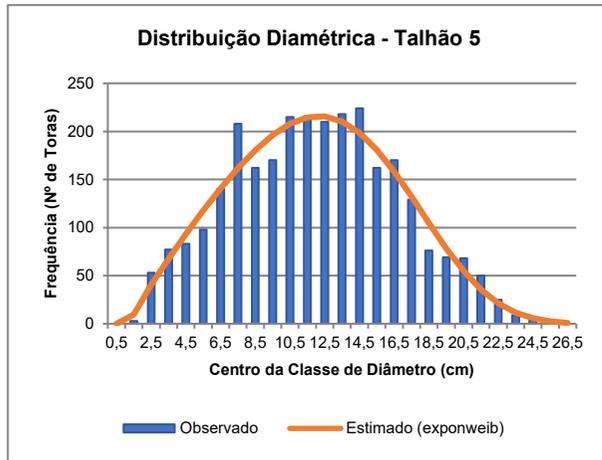
Histograma de frequência dos diâmetros simulados a partir do inventário pré-corte e curva de densidade da distribuição ajustada em cada caso.

2022 - A

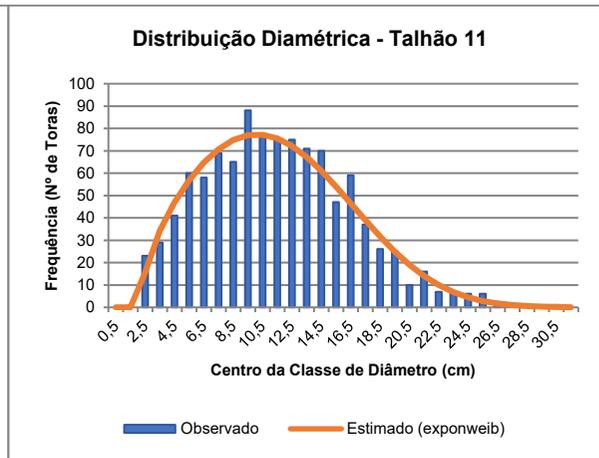
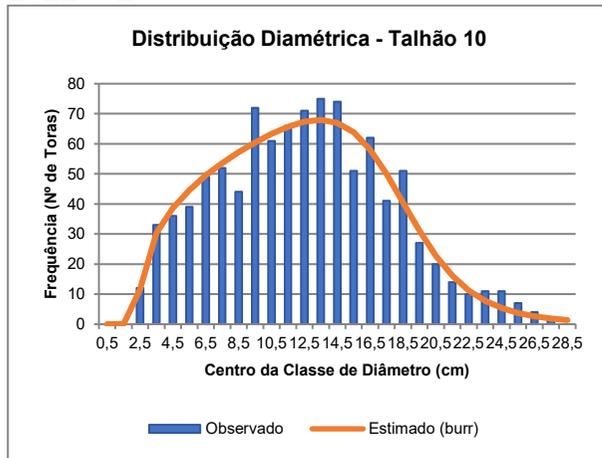


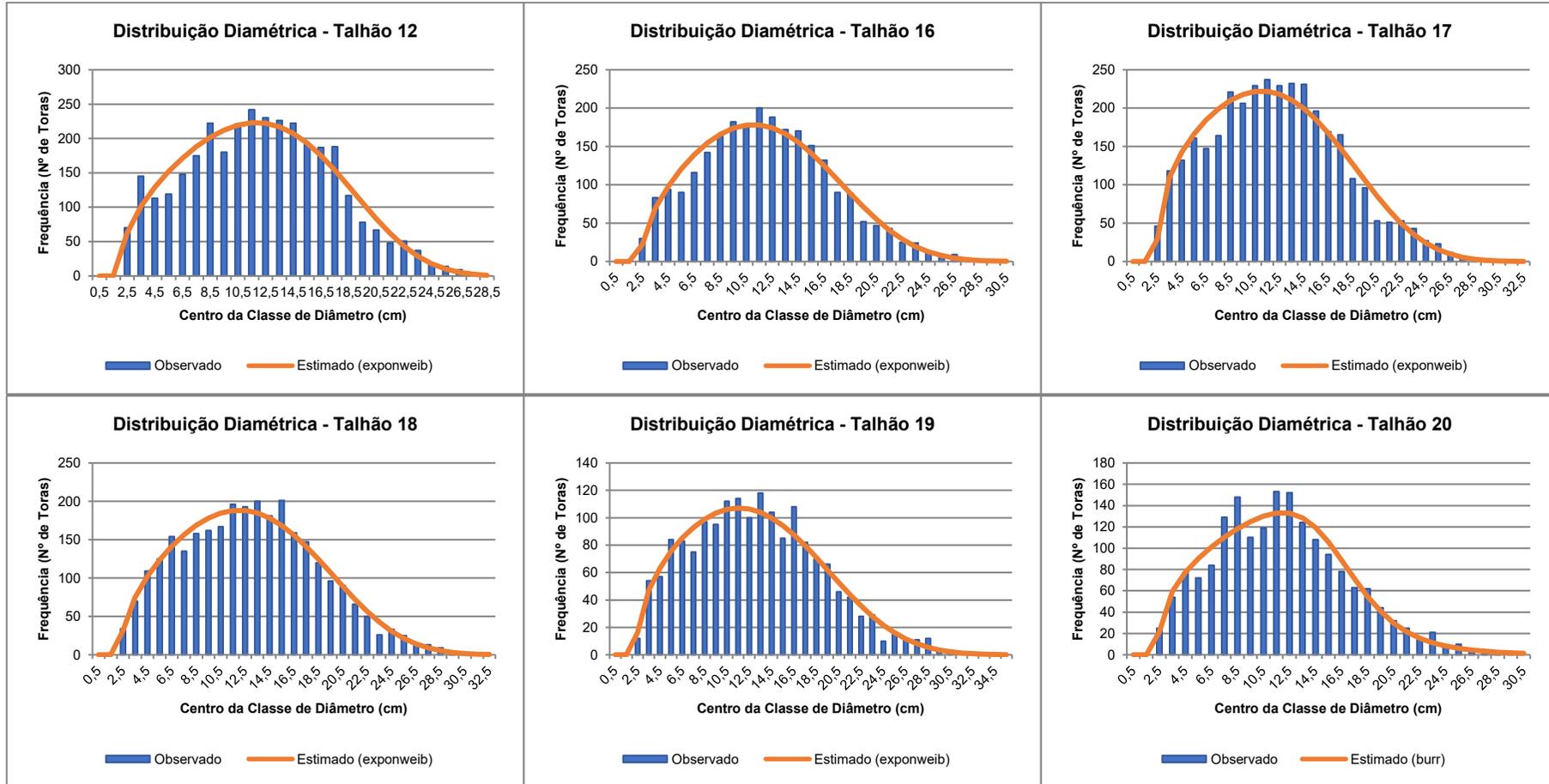


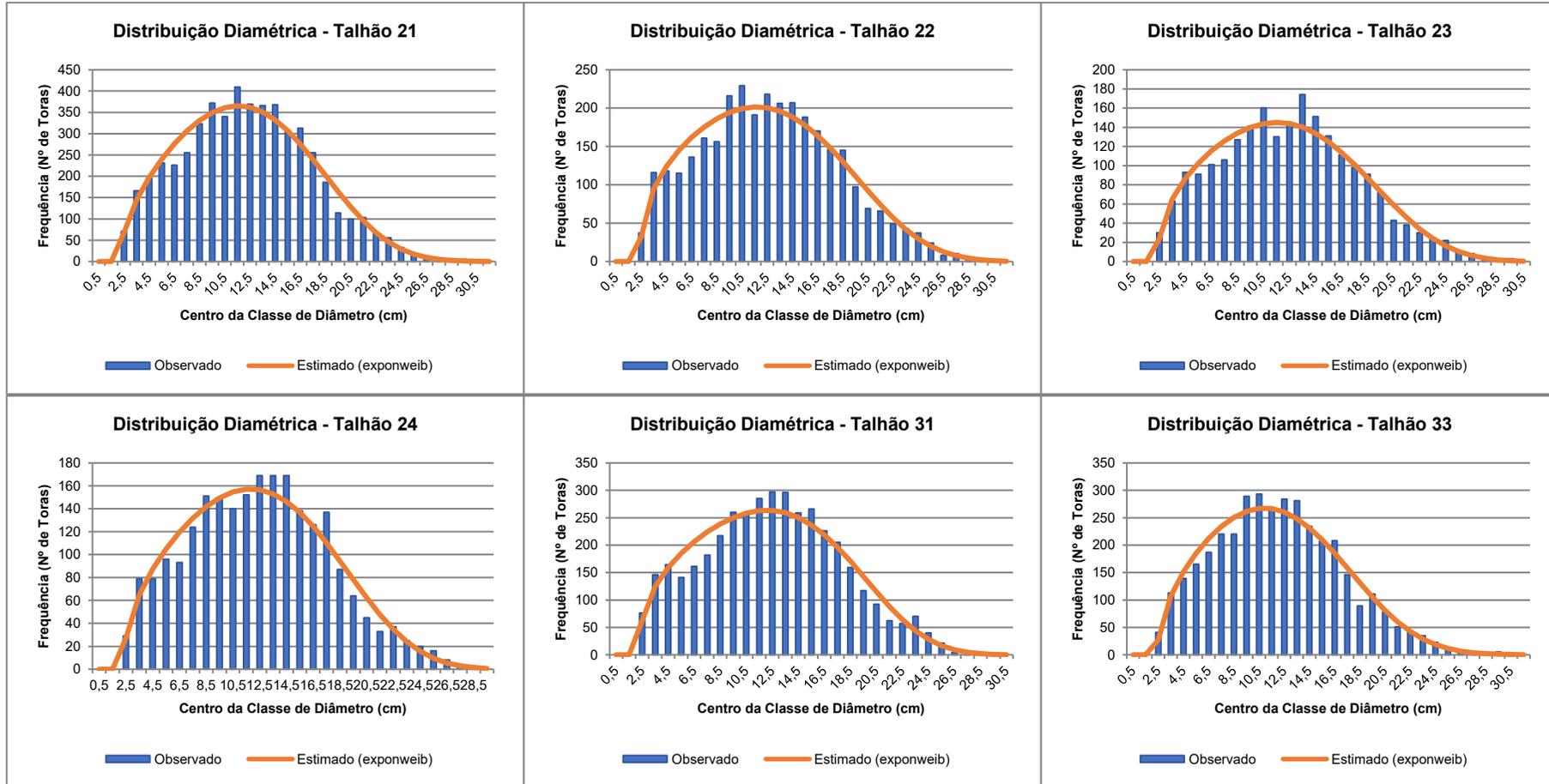


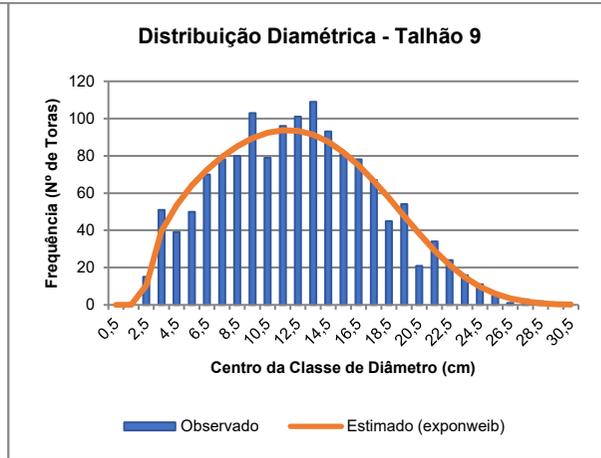
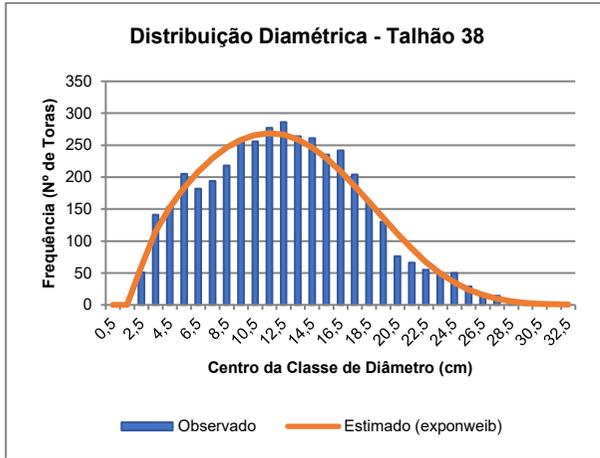


2022 – B

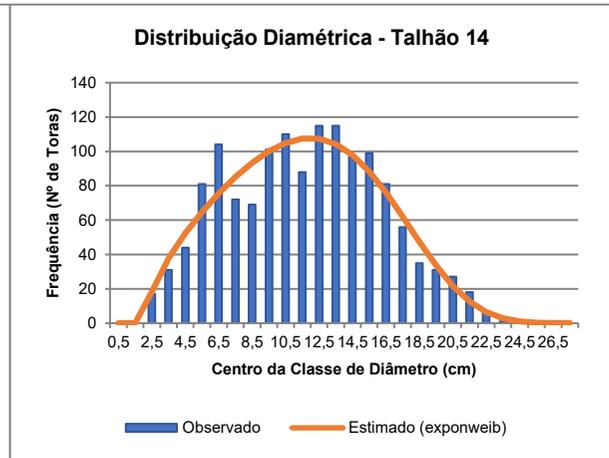
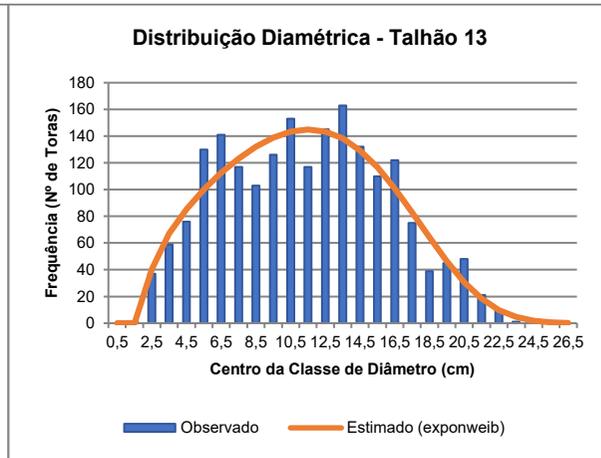
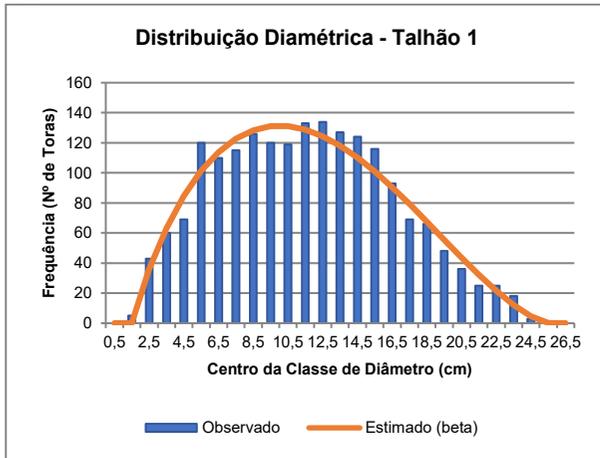


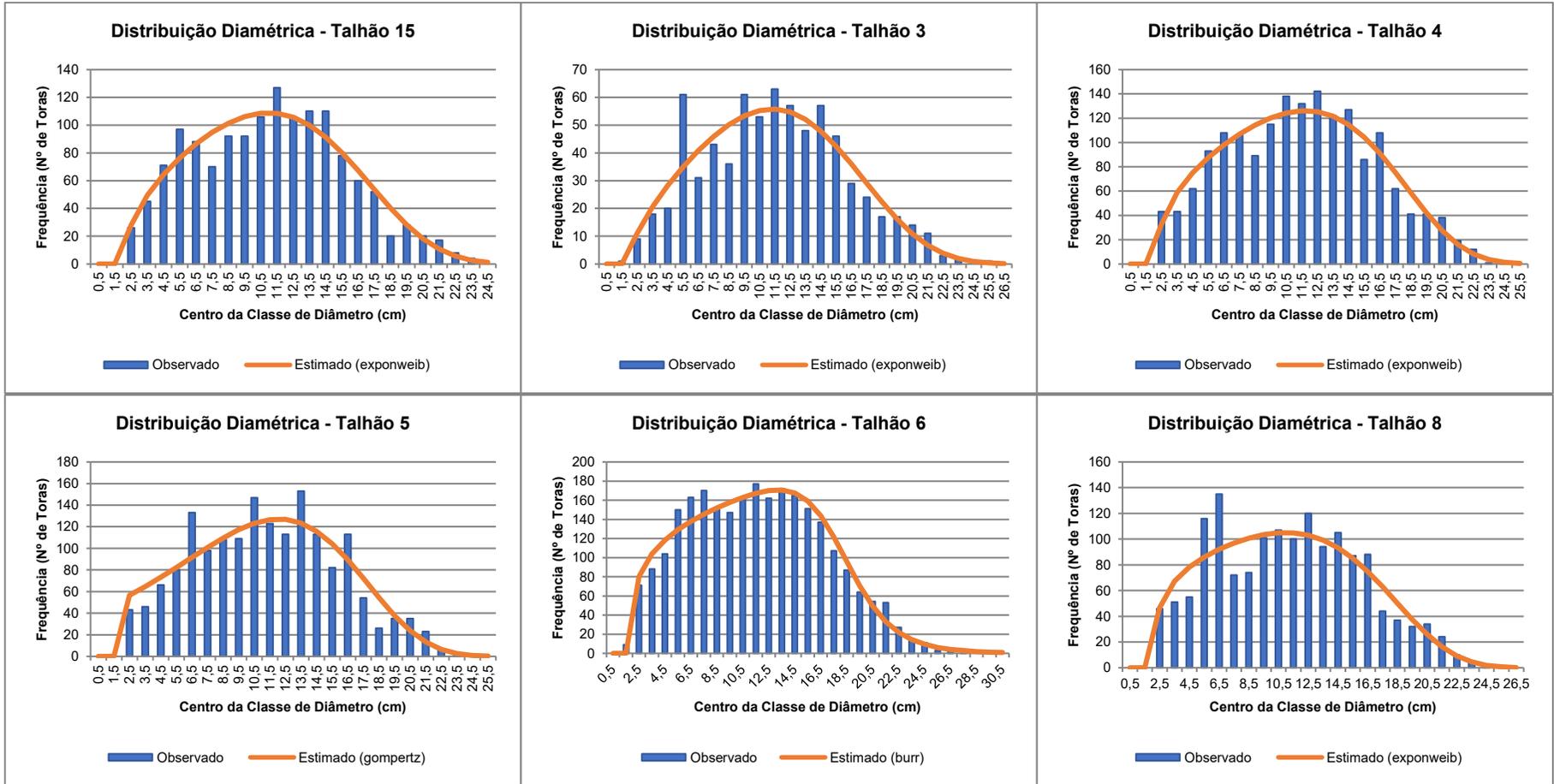




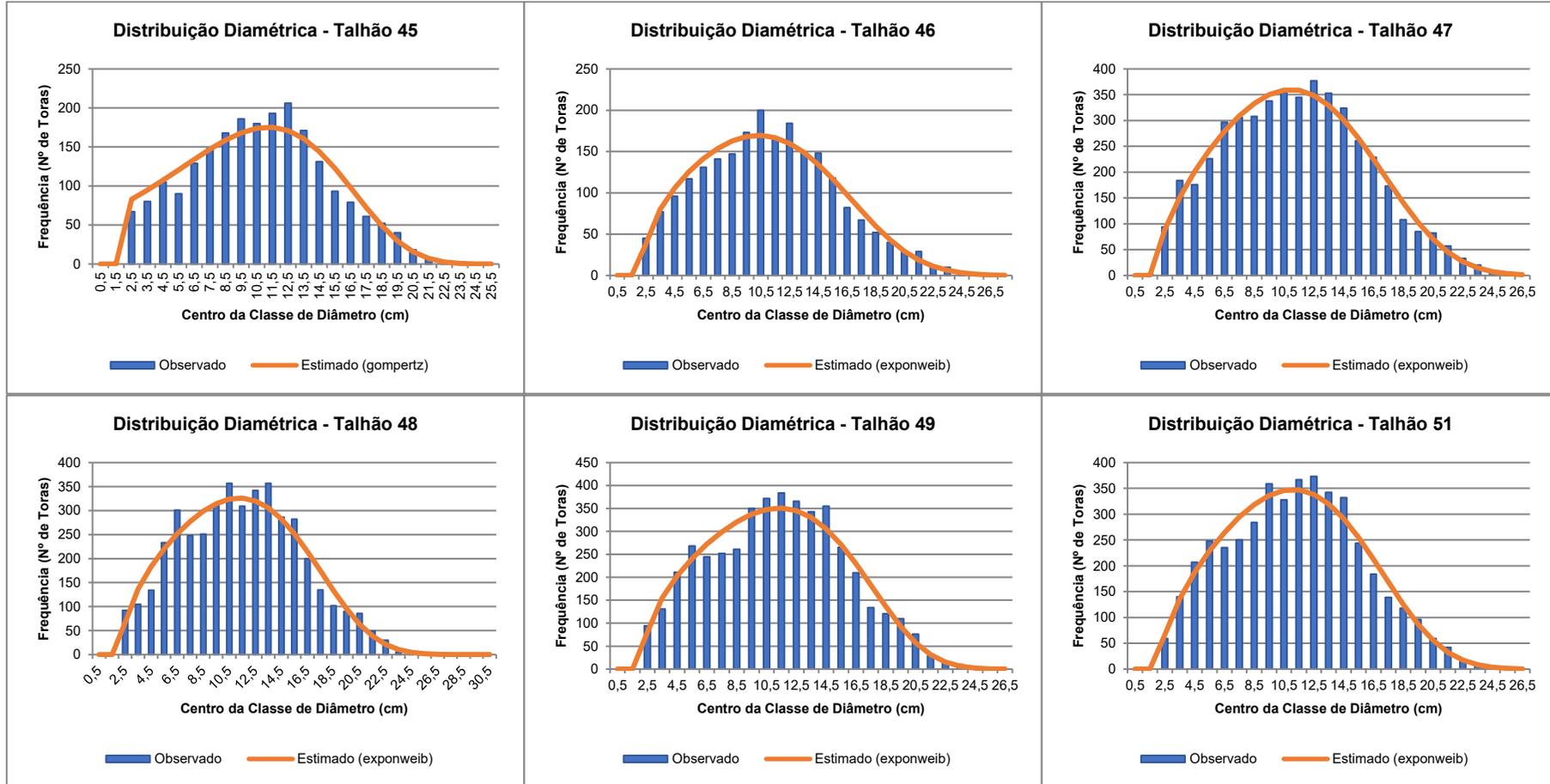


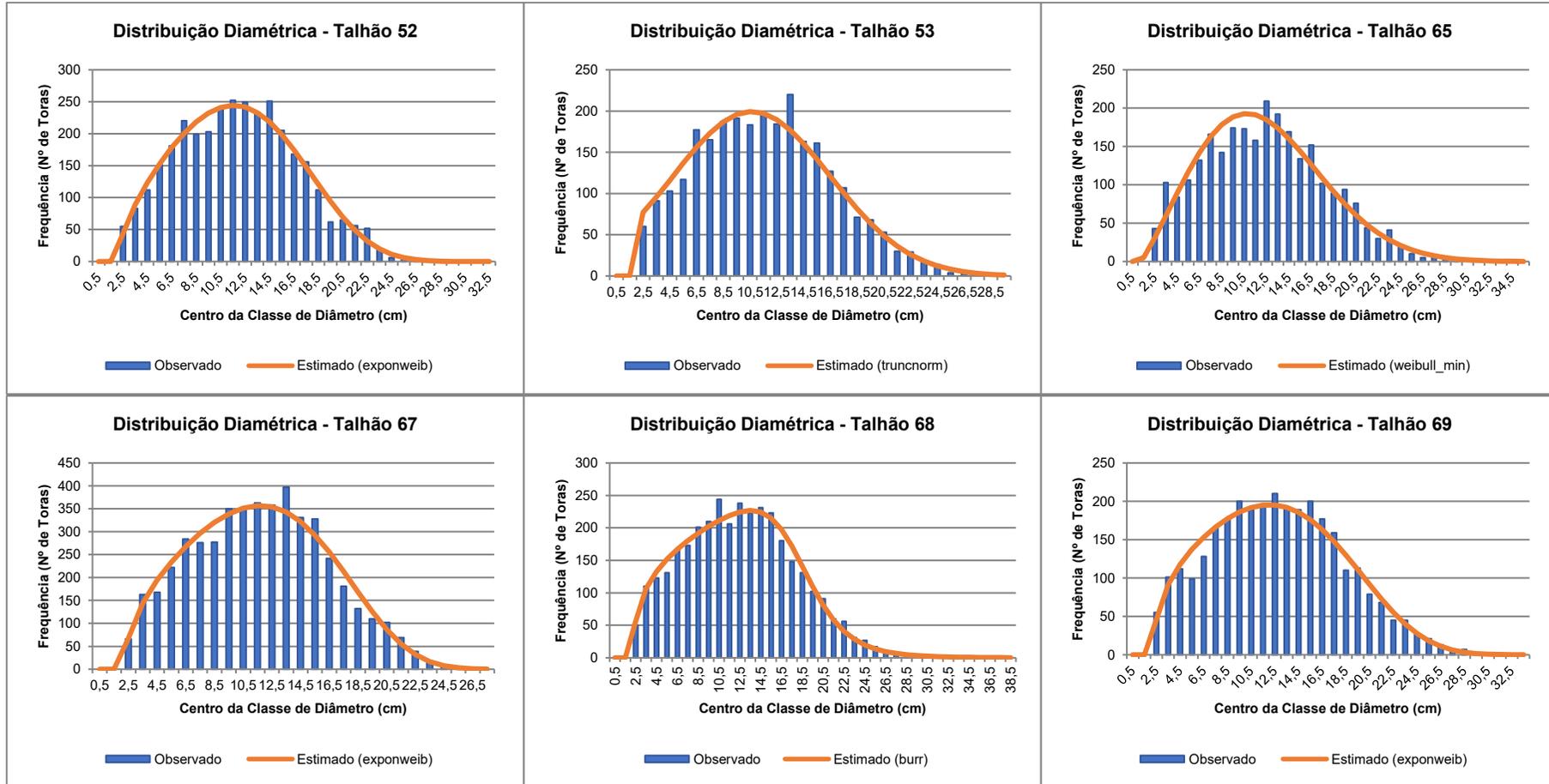
2022 – C

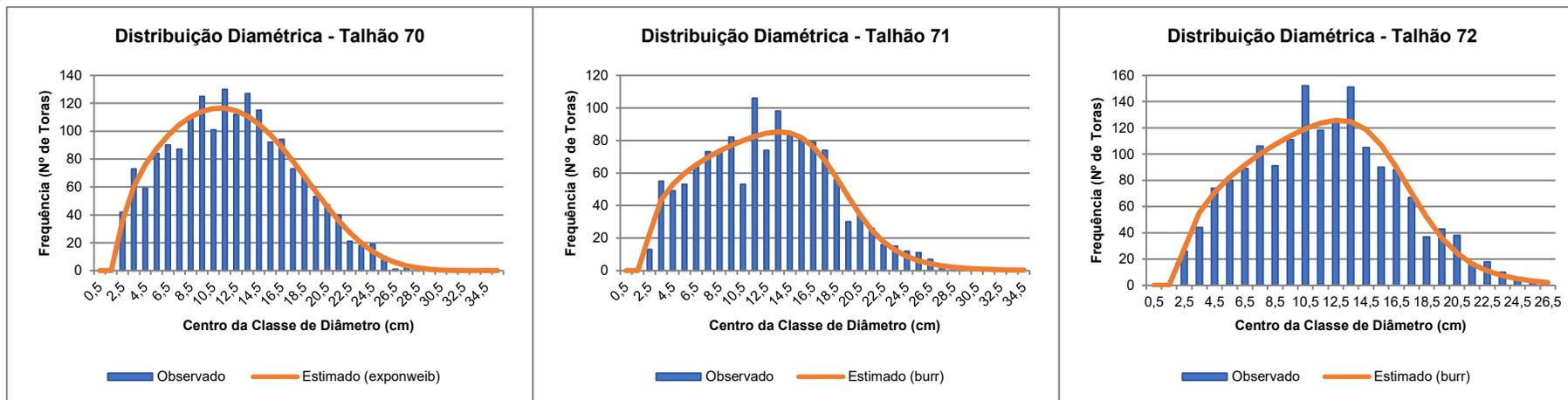




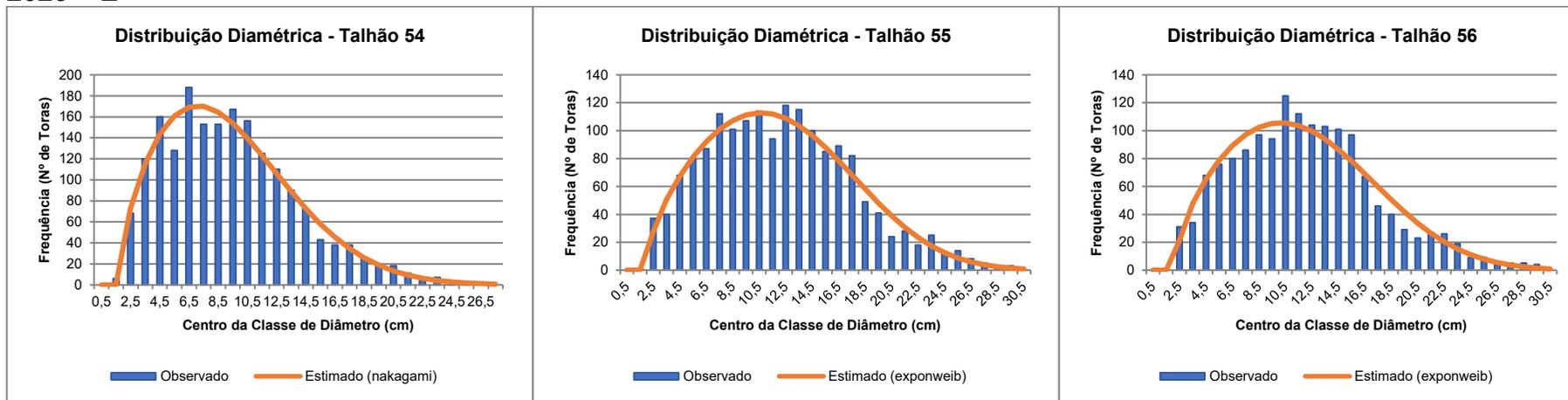
2023 – D

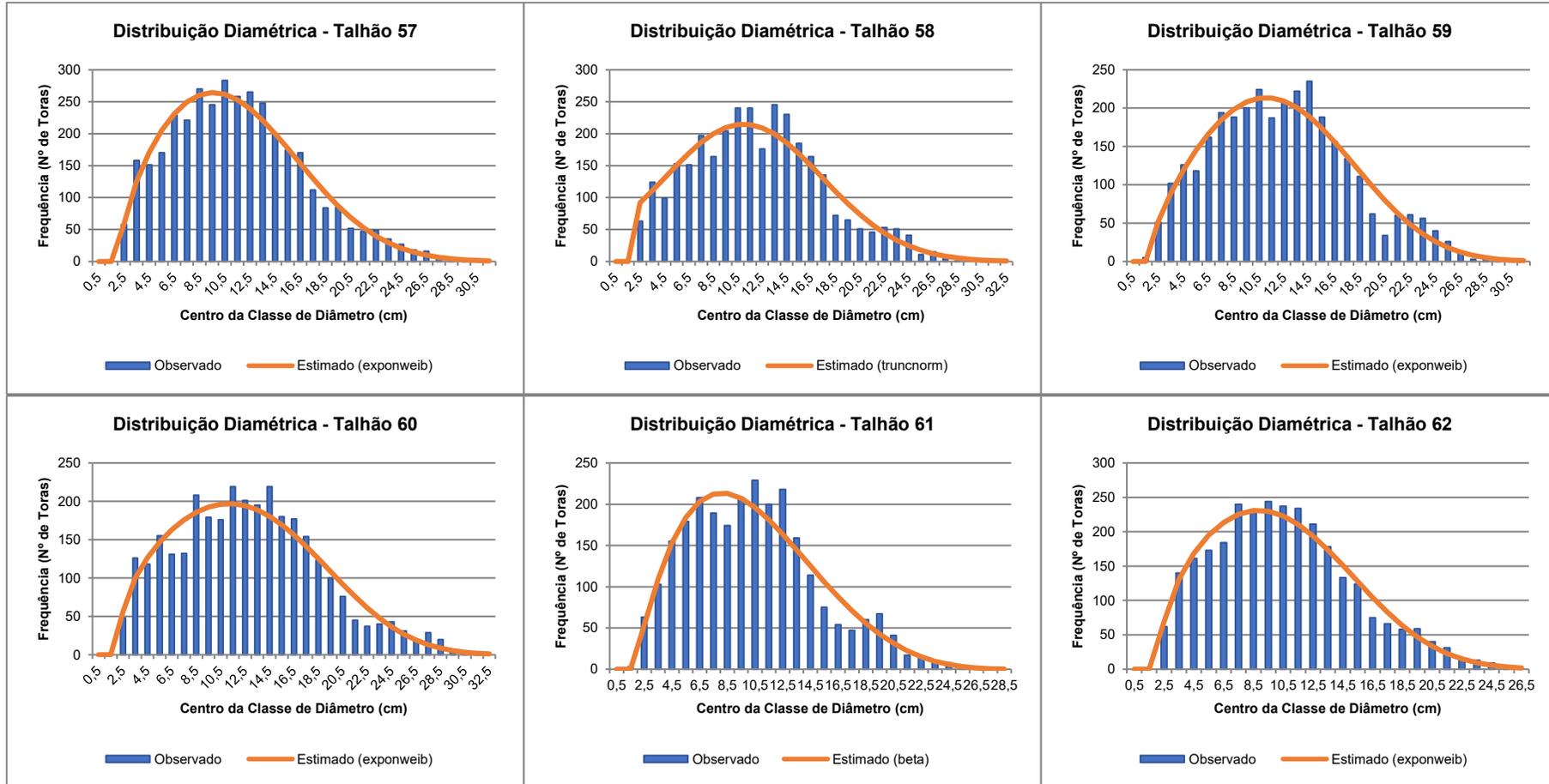


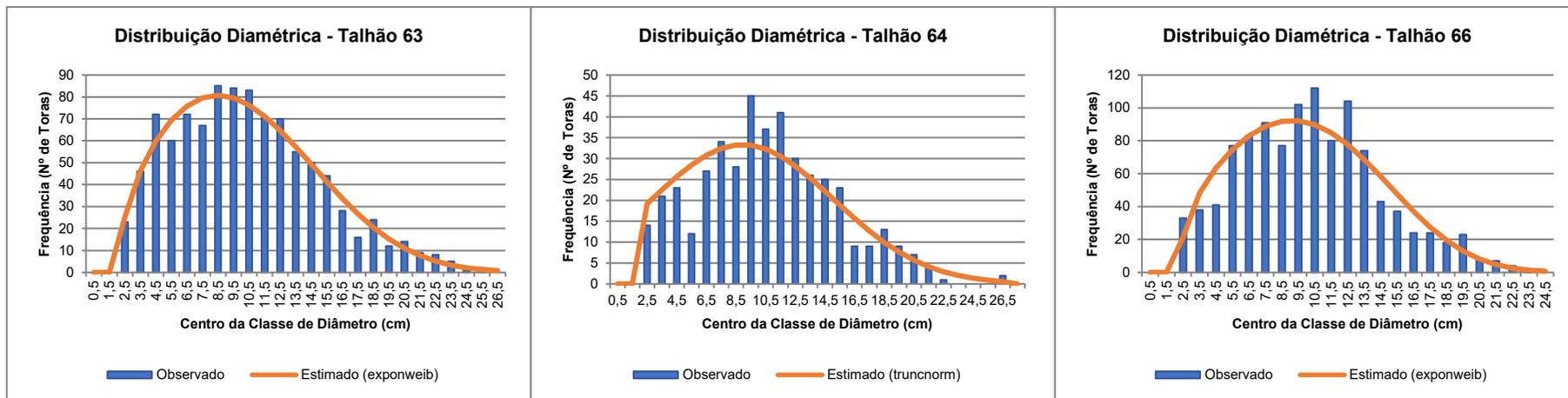




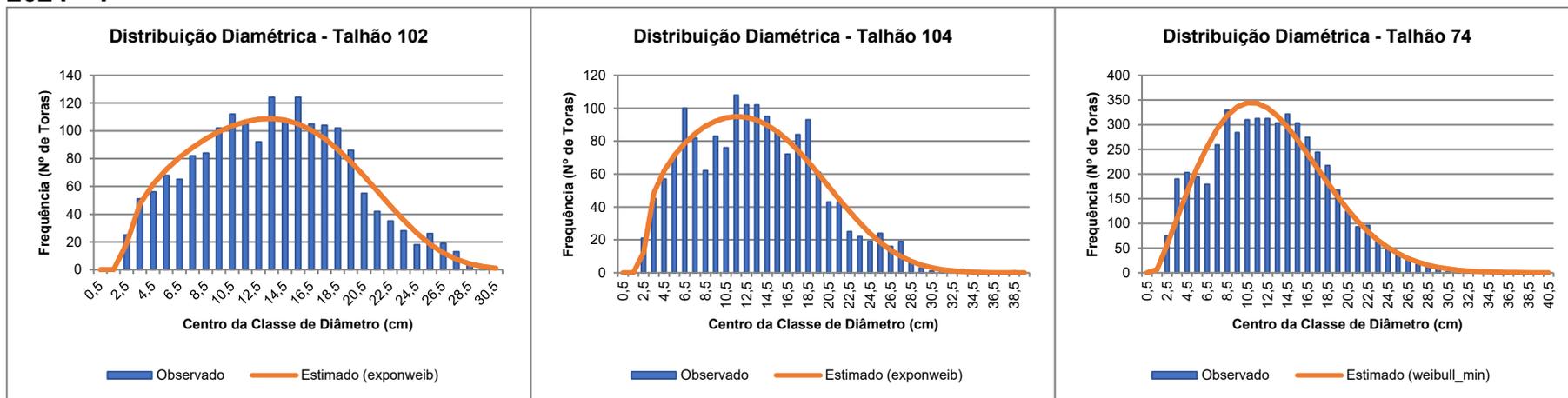
2023 – E

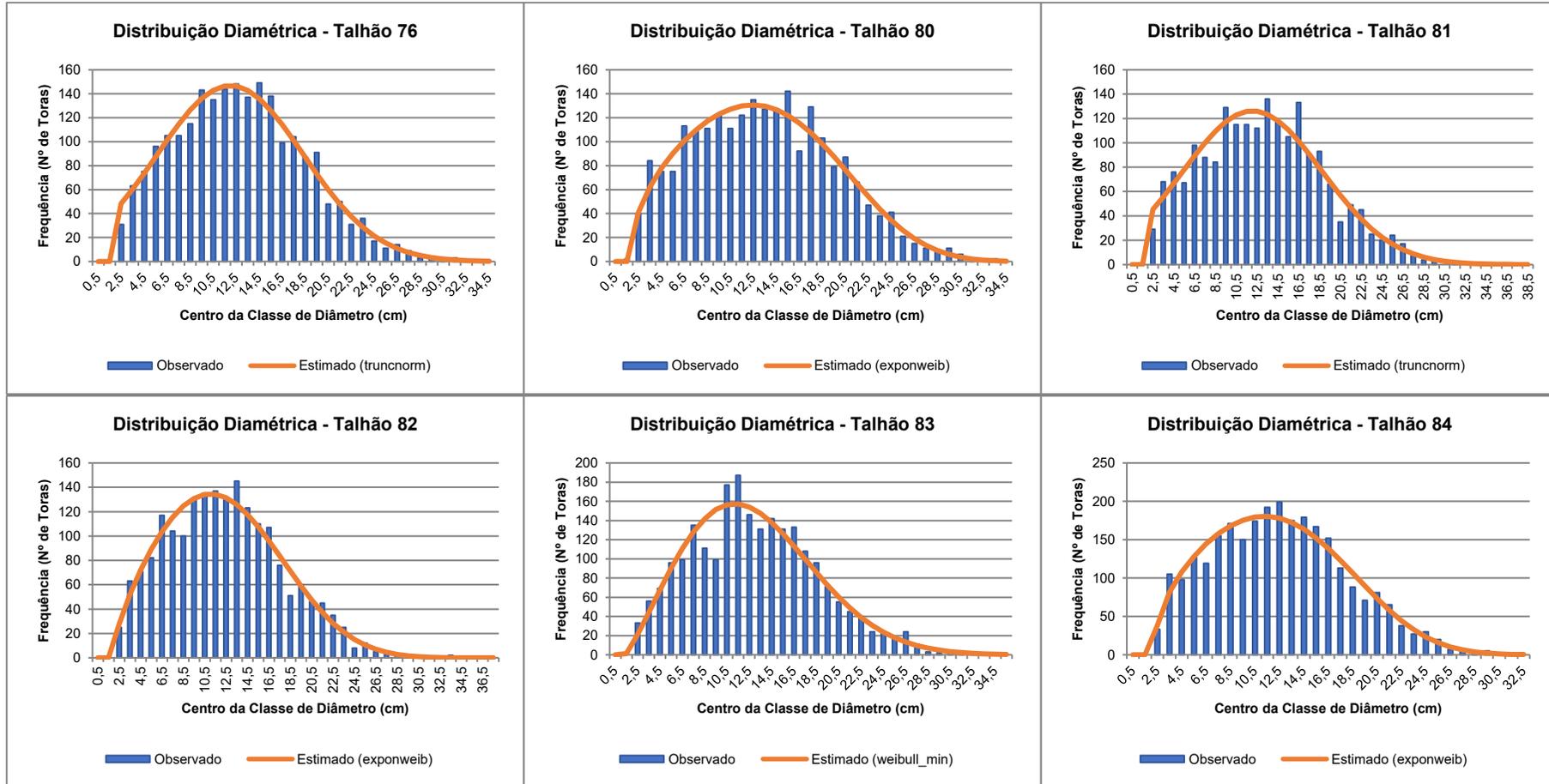


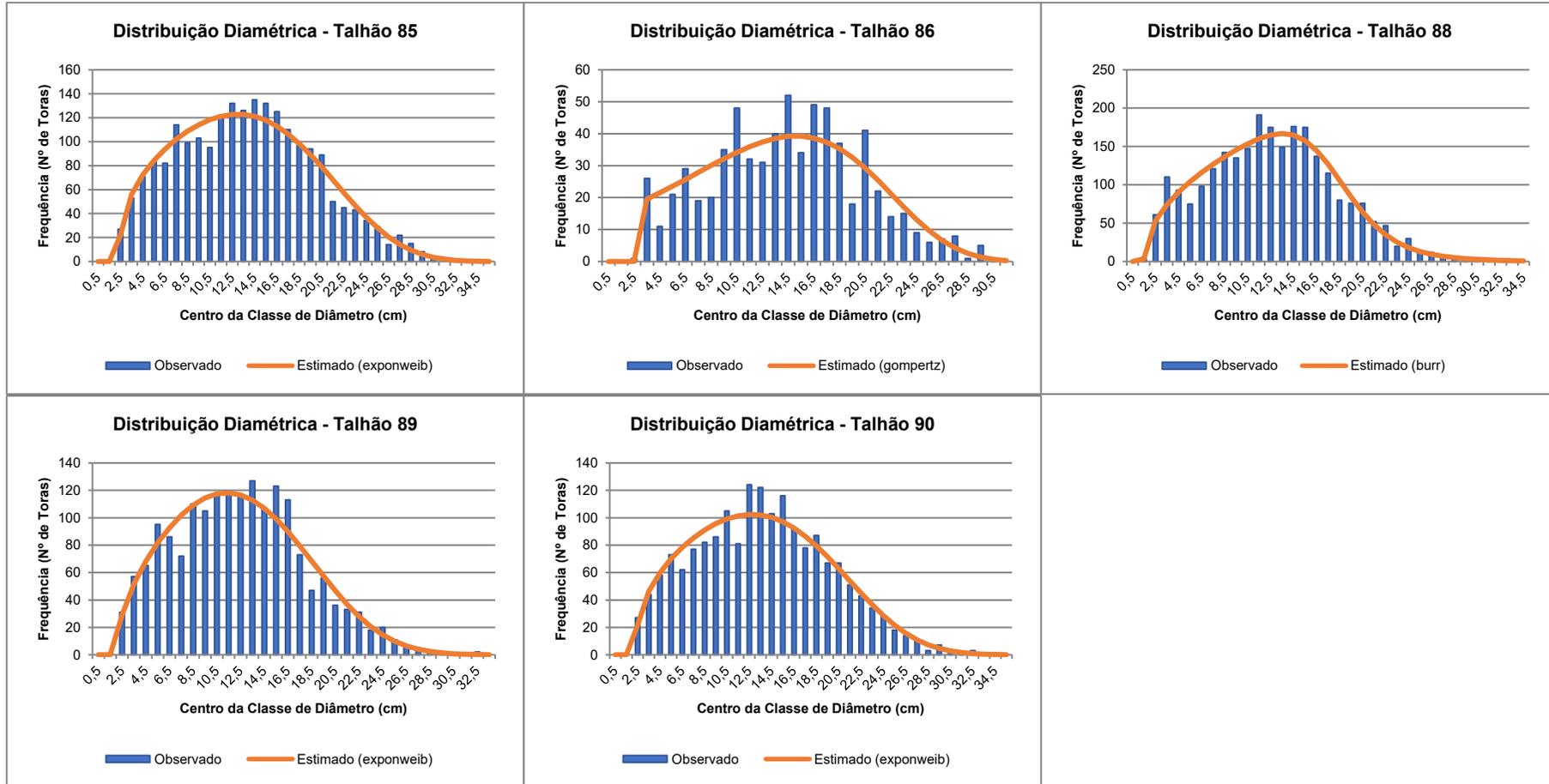




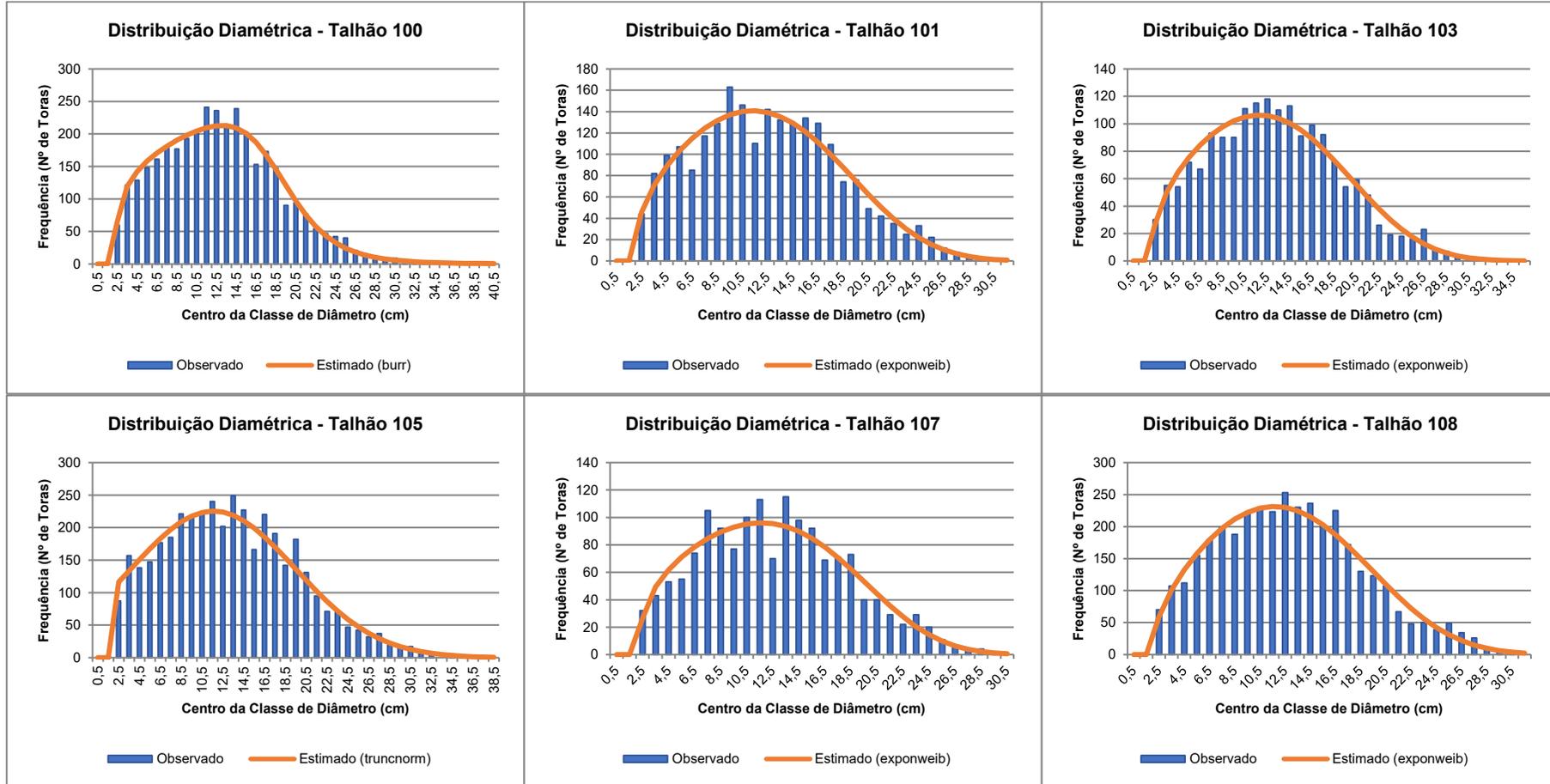
2024 – F

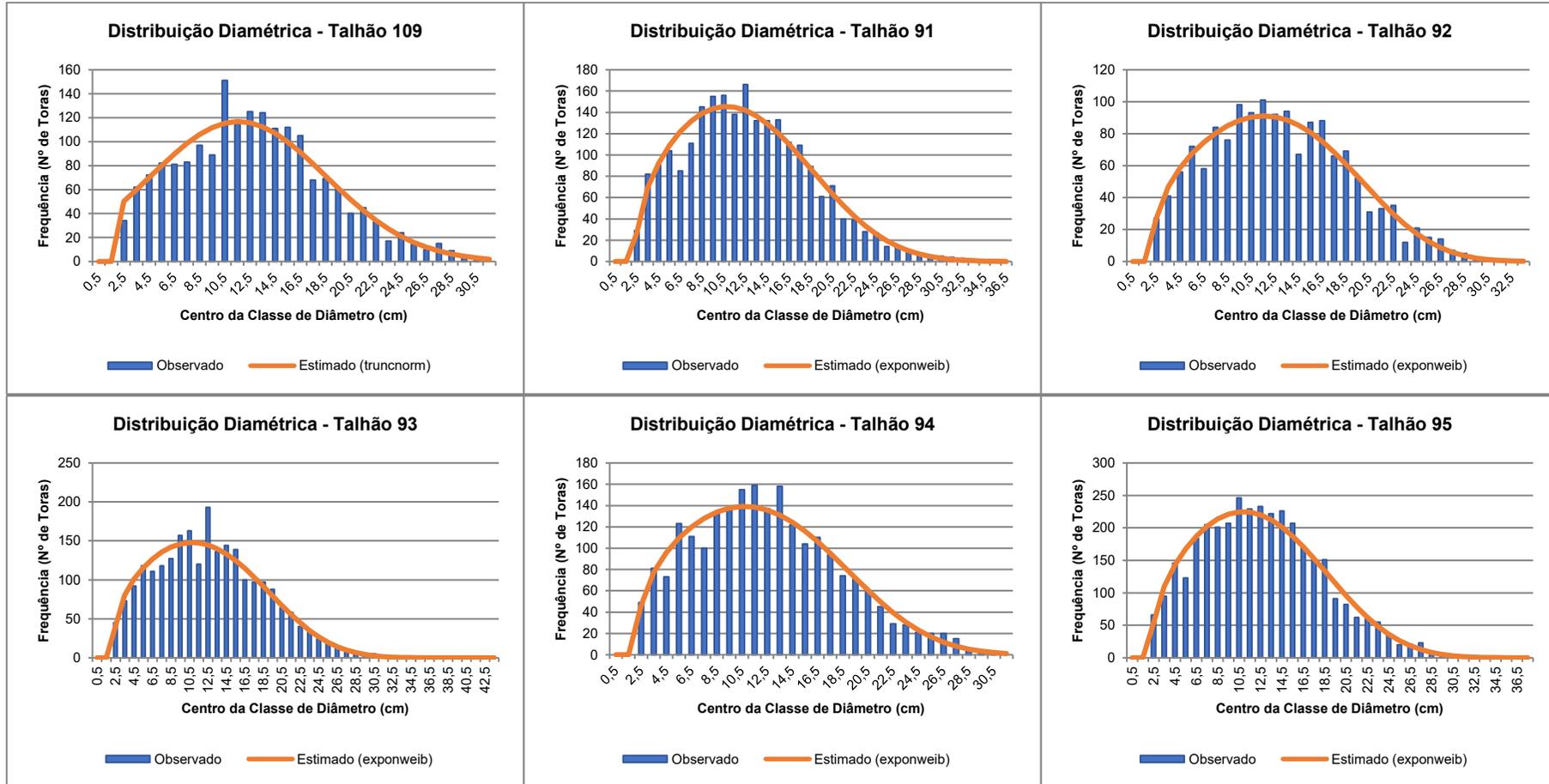


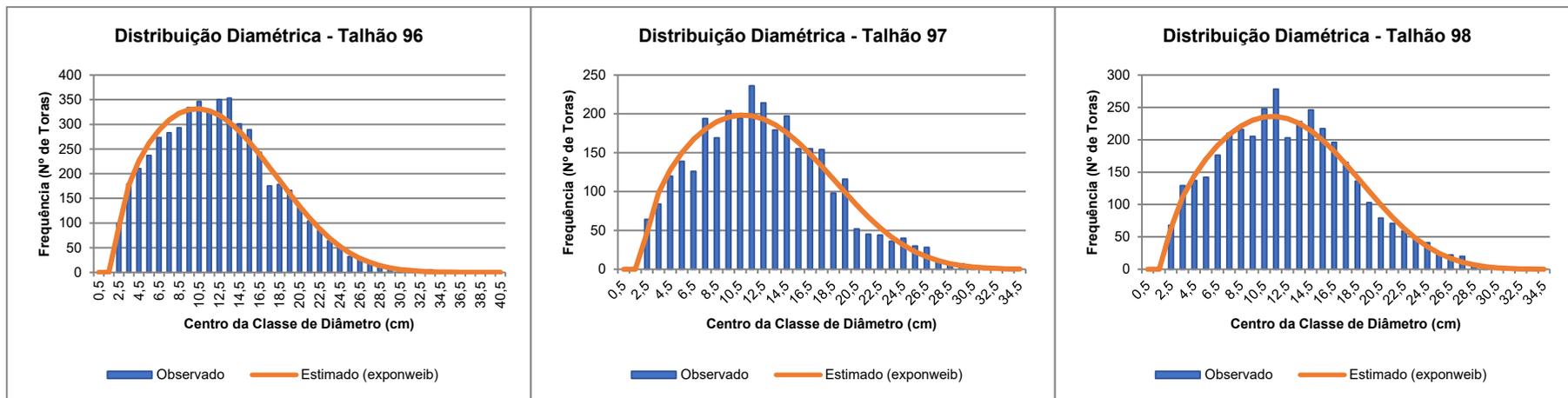




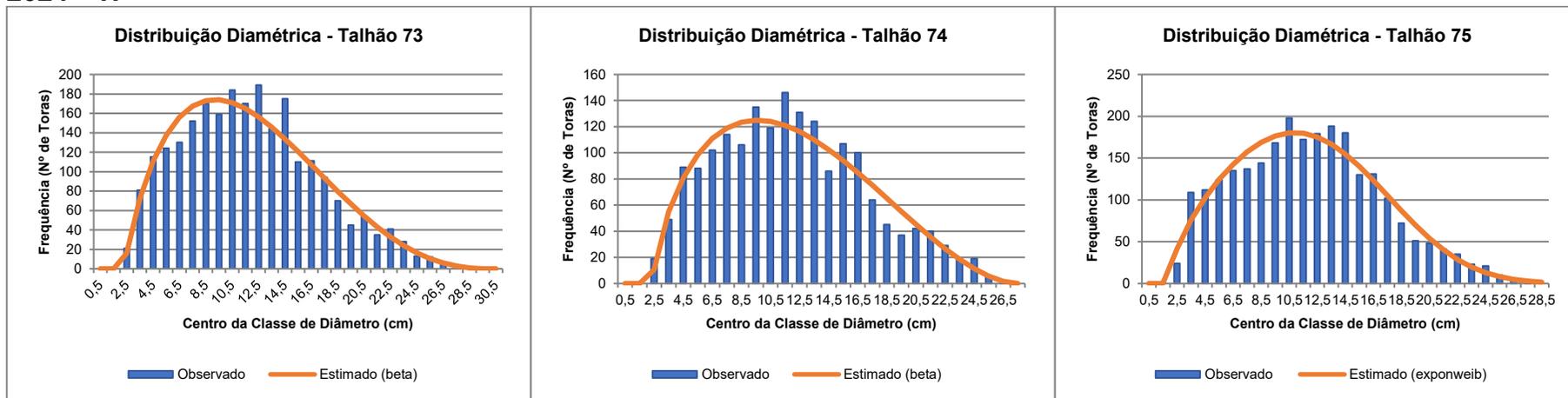
2024 – G

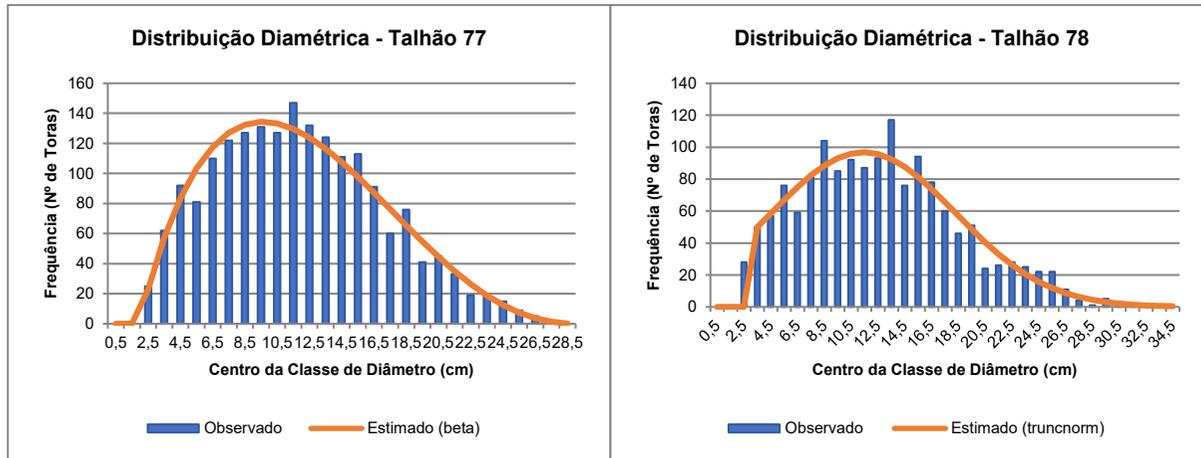






2024 – H

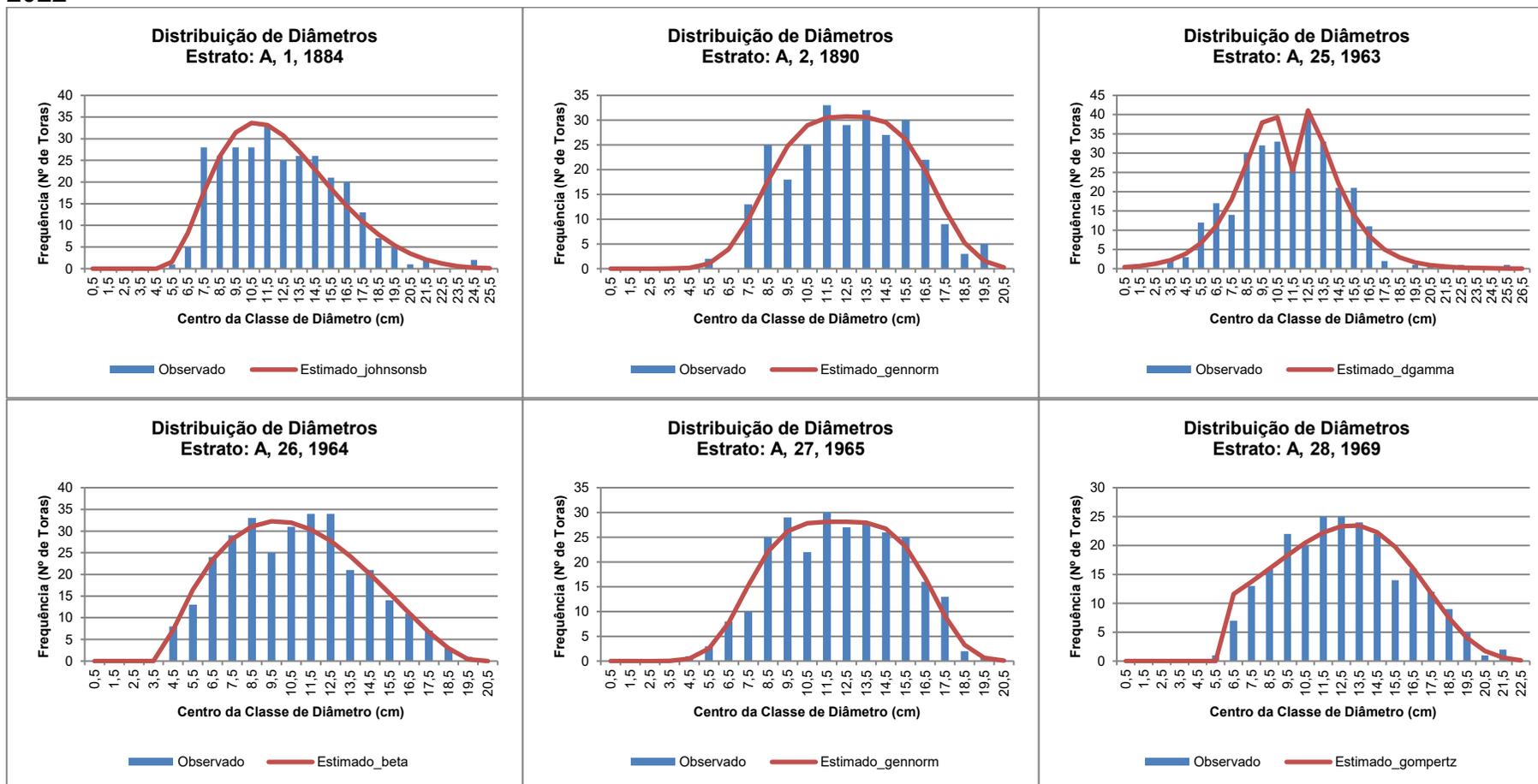


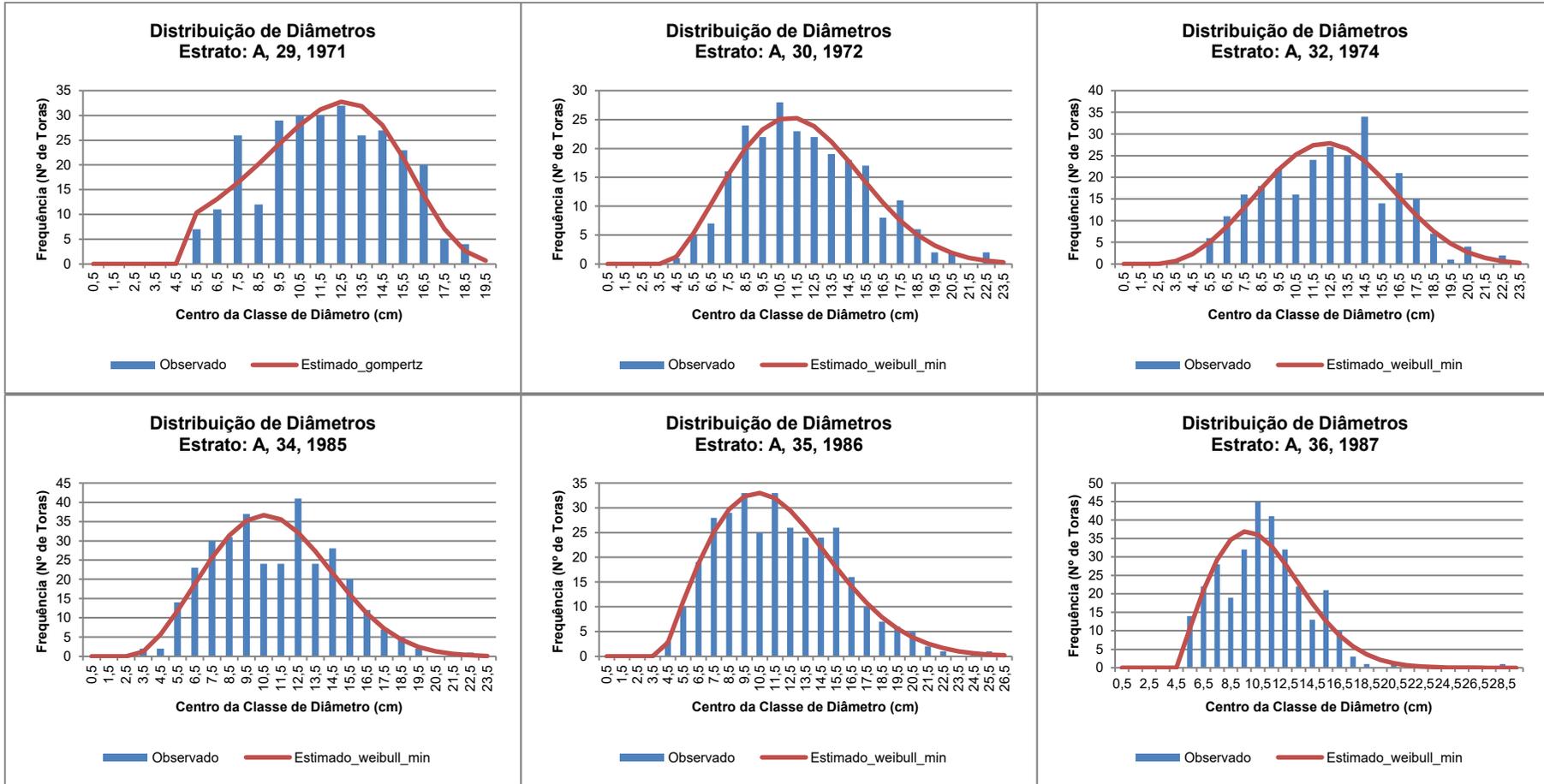


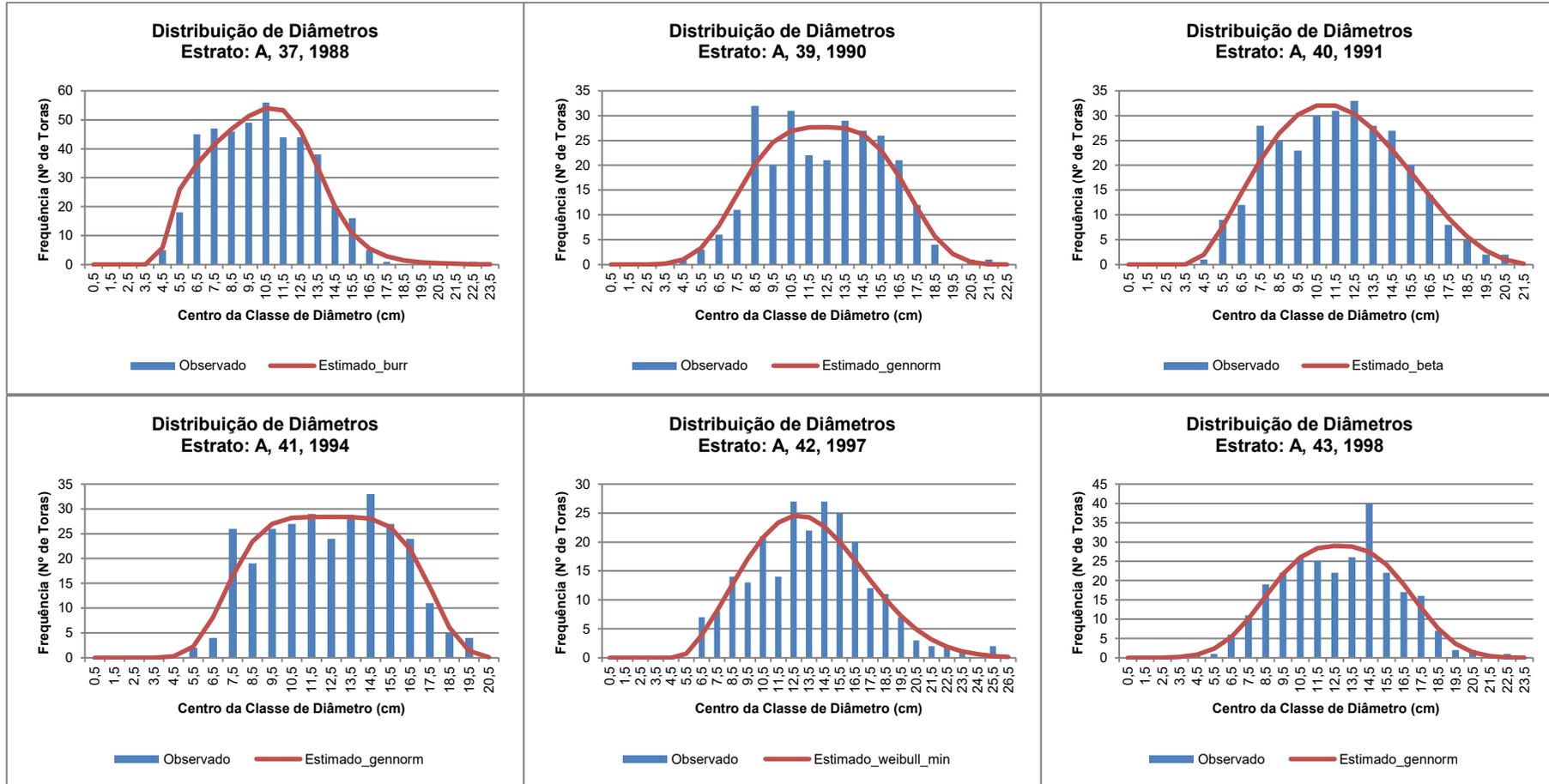
APÊNDICE E

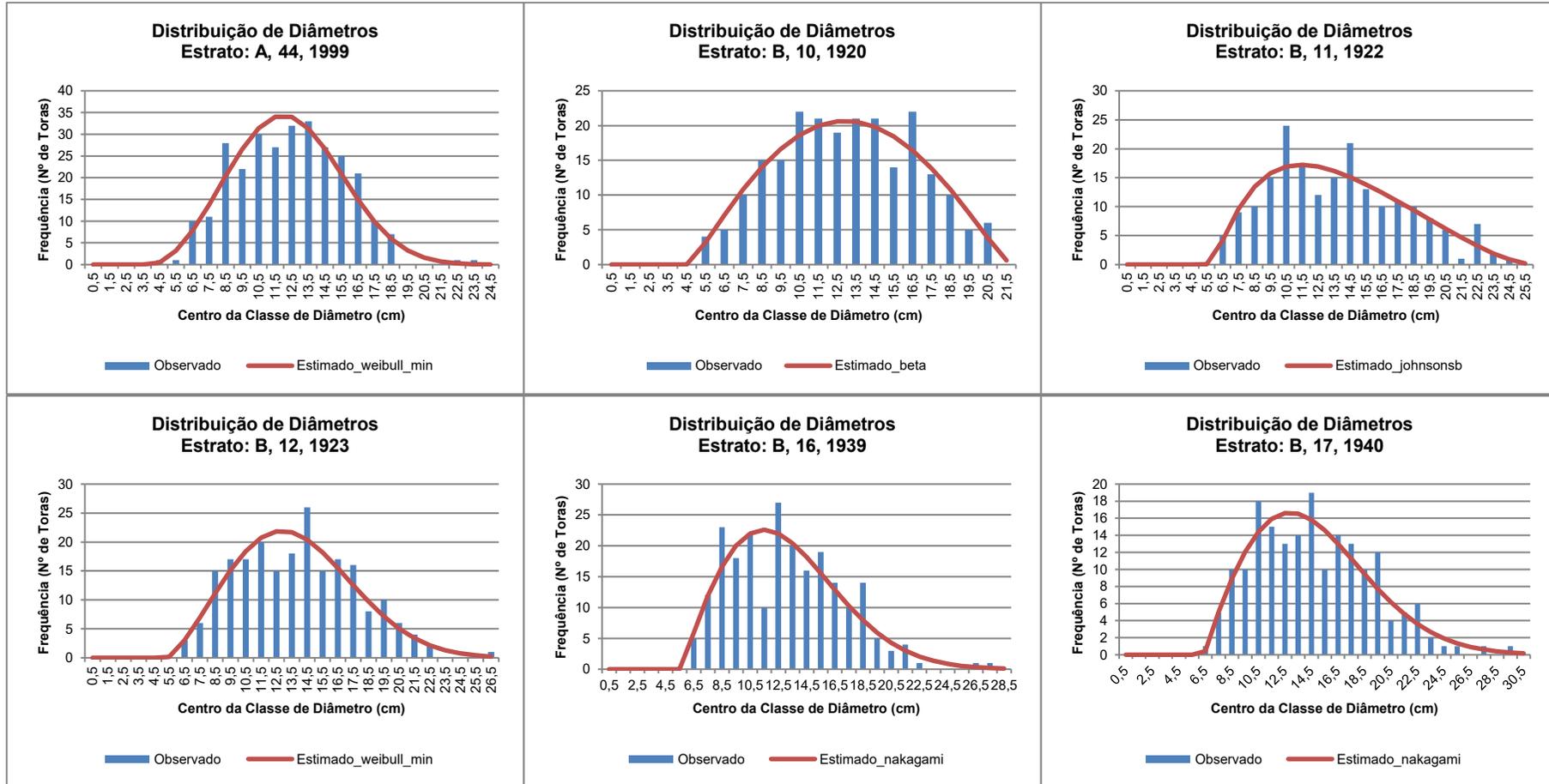
Histograma de frequência dos diâmetros mensurados em campo e curva de densidade da distribuição ajustada em cada caso.

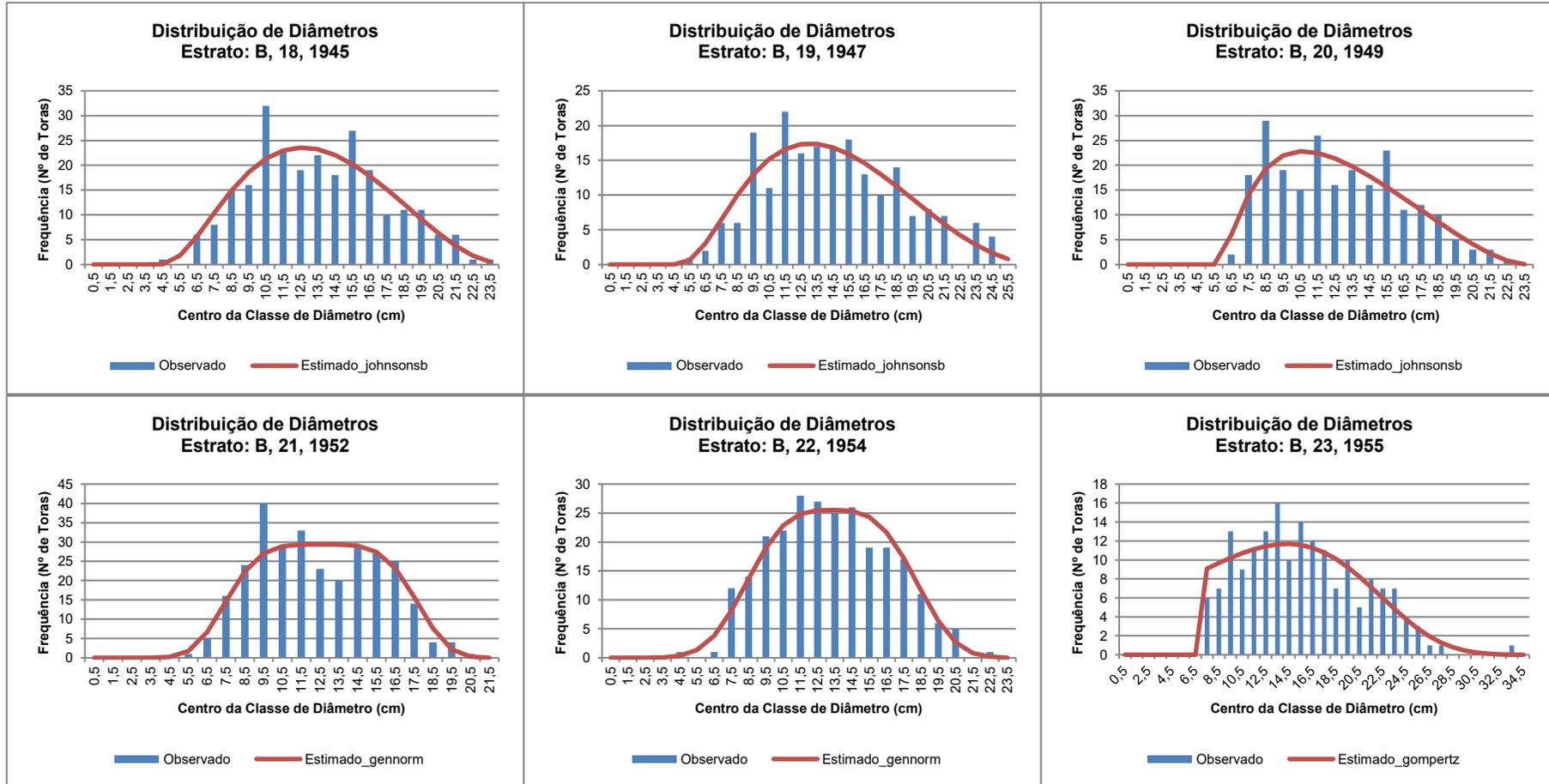
2022

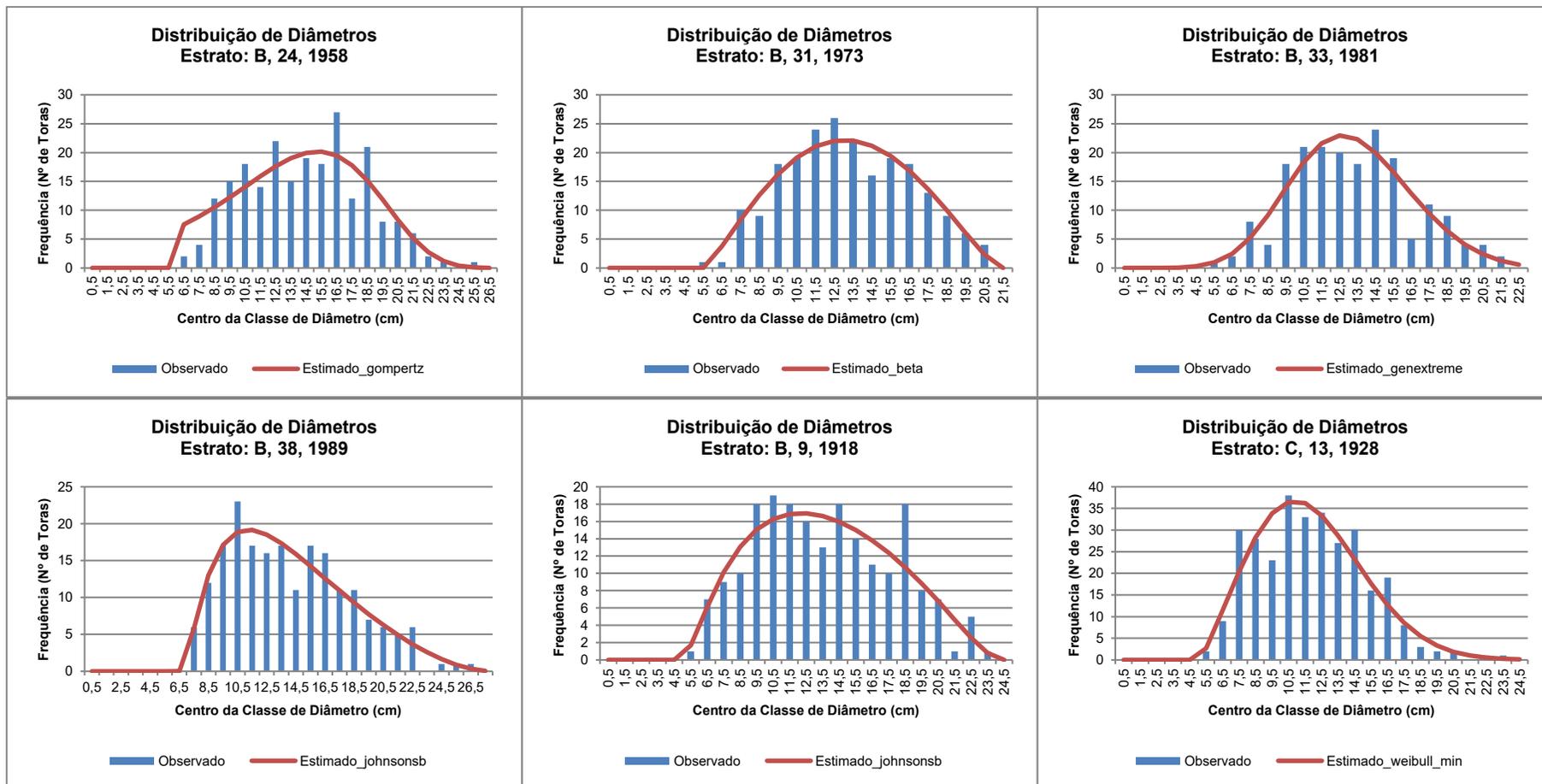


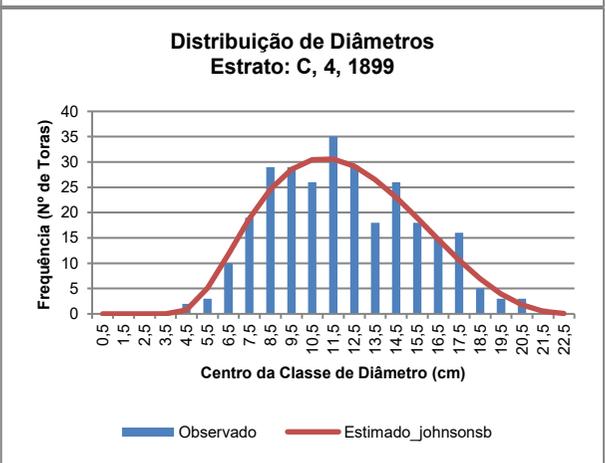
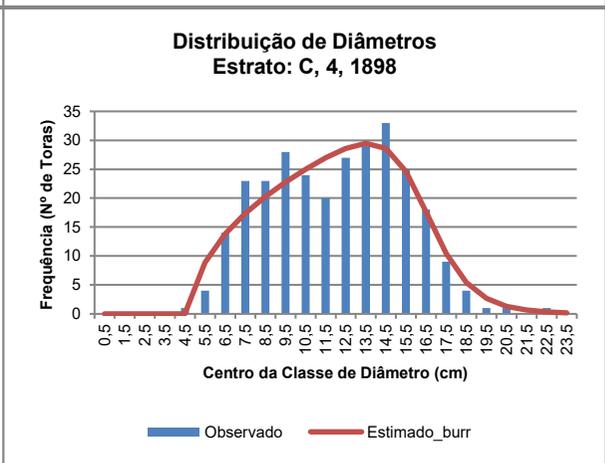
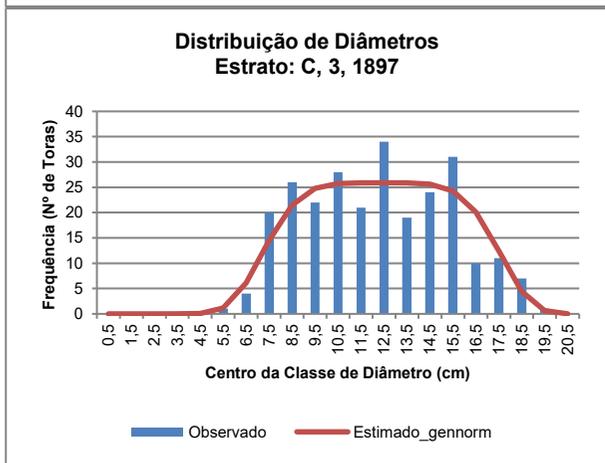
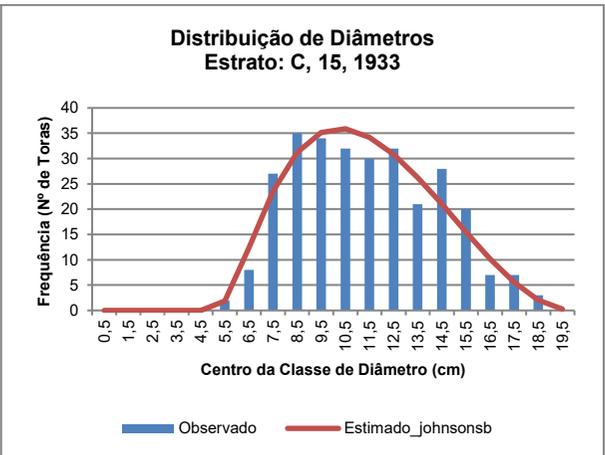
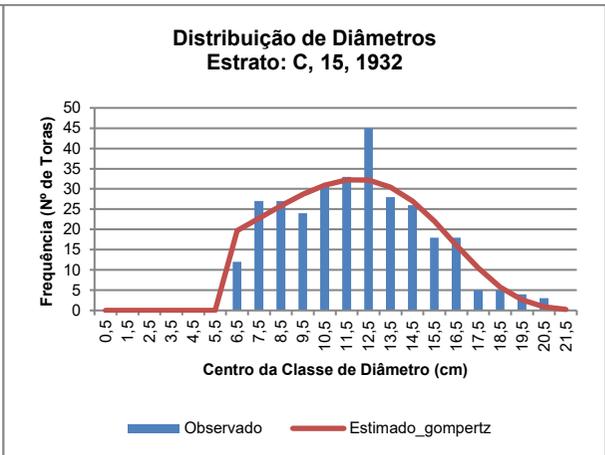
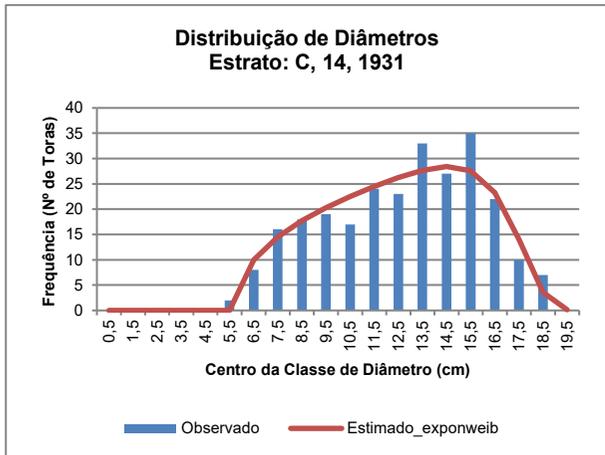


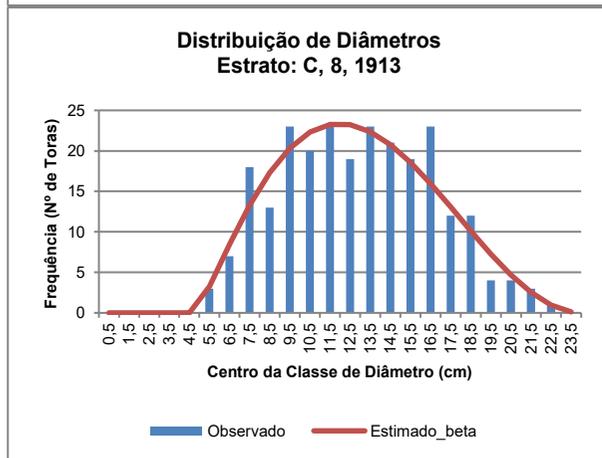
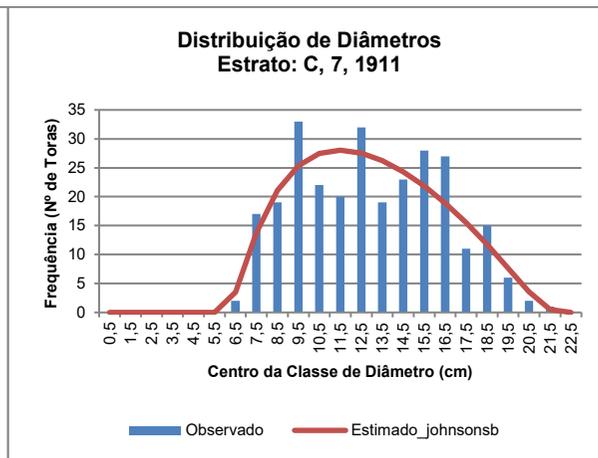
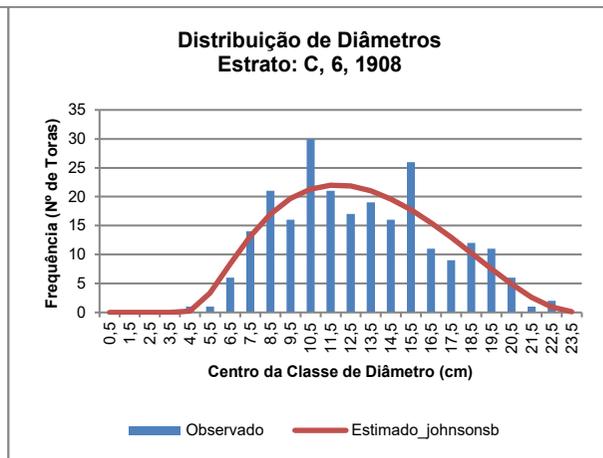
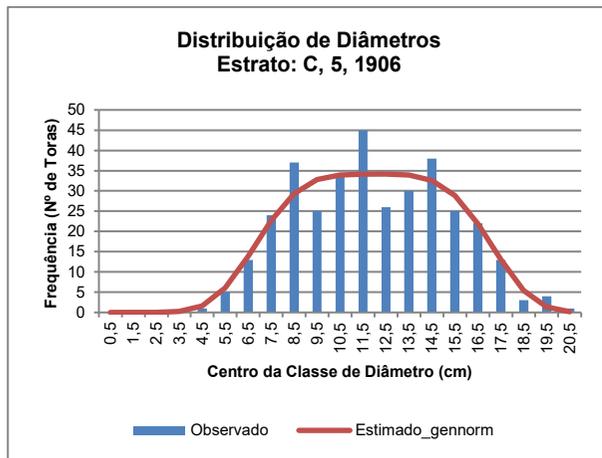




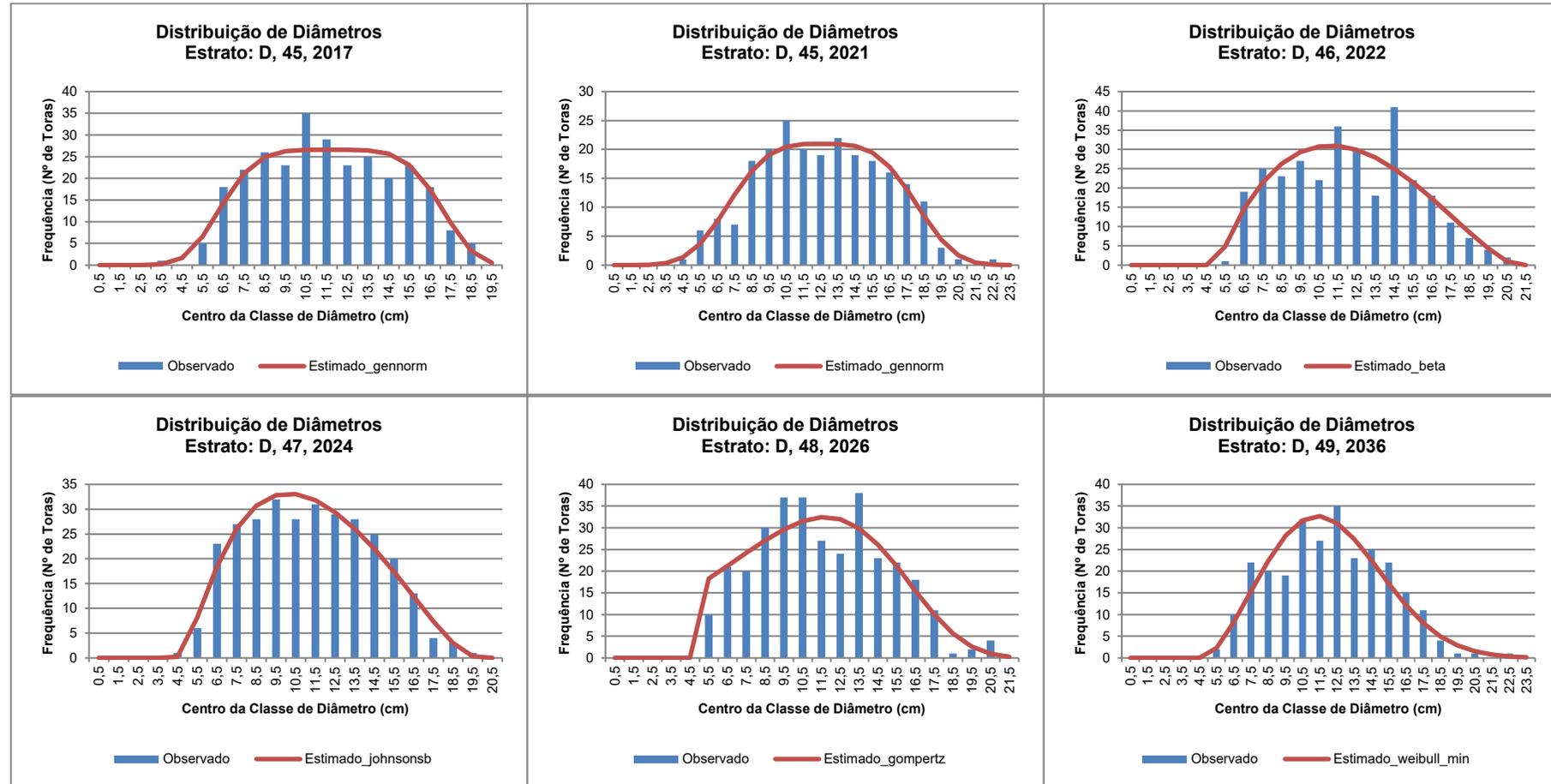


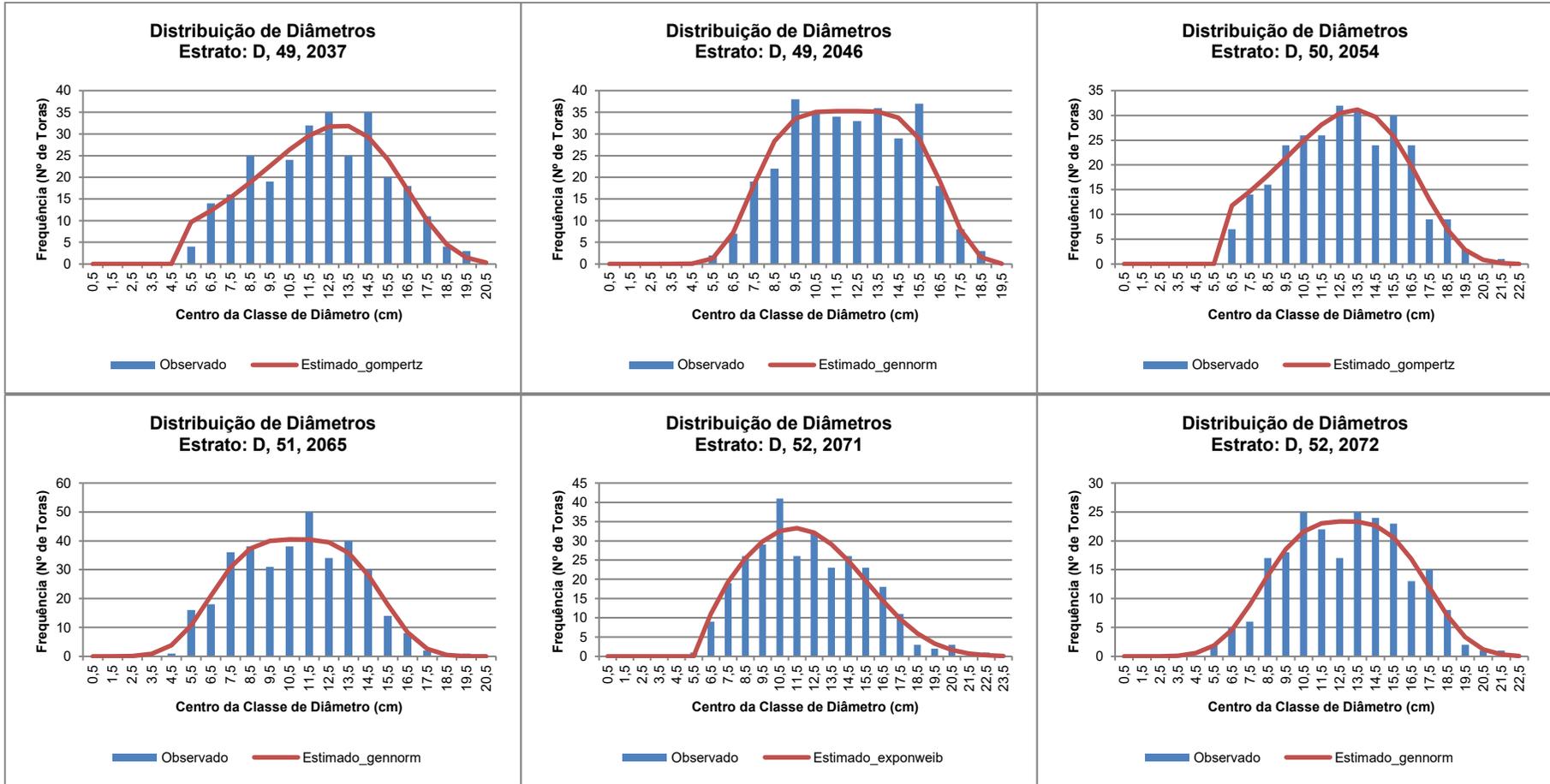


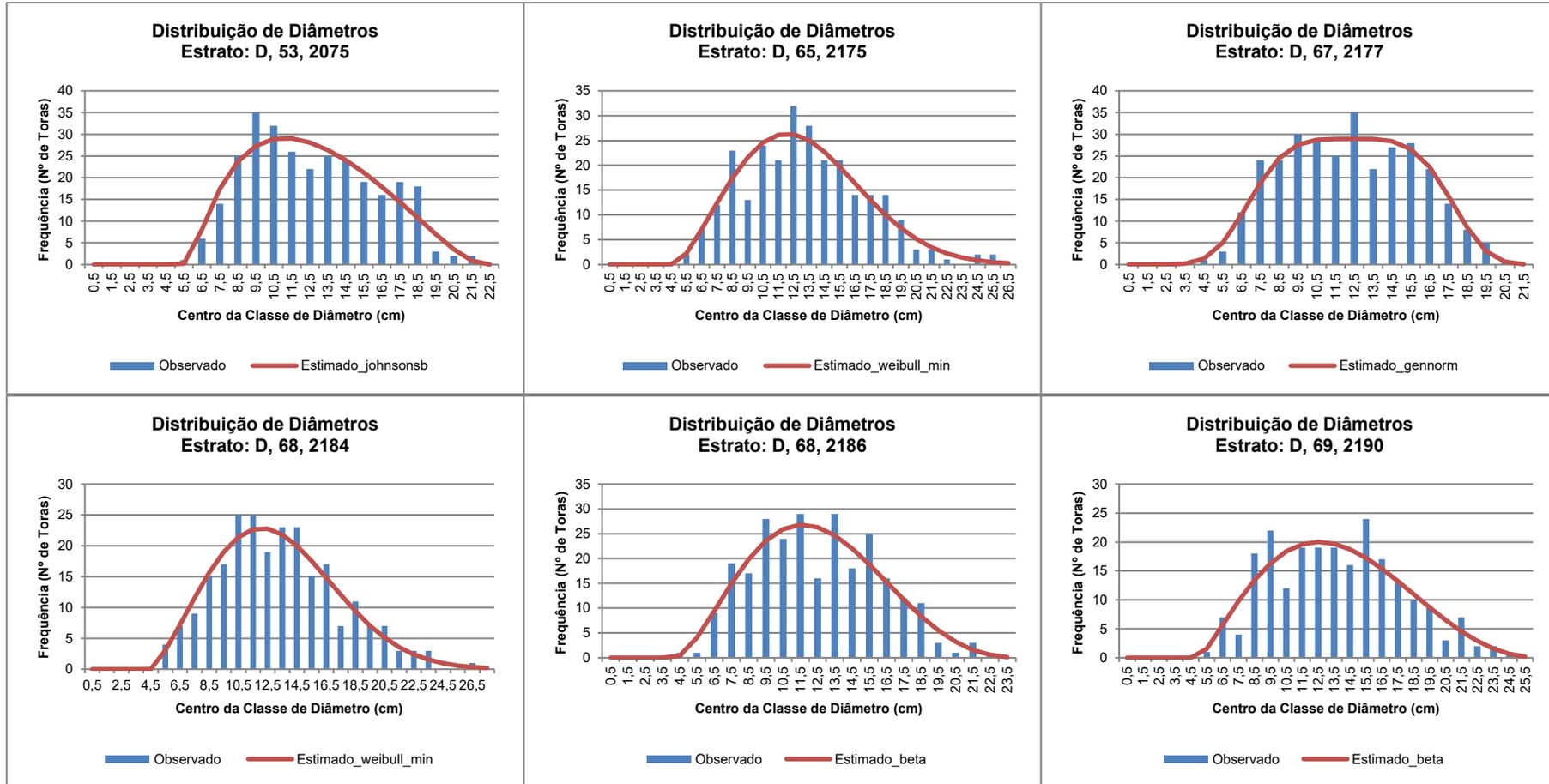


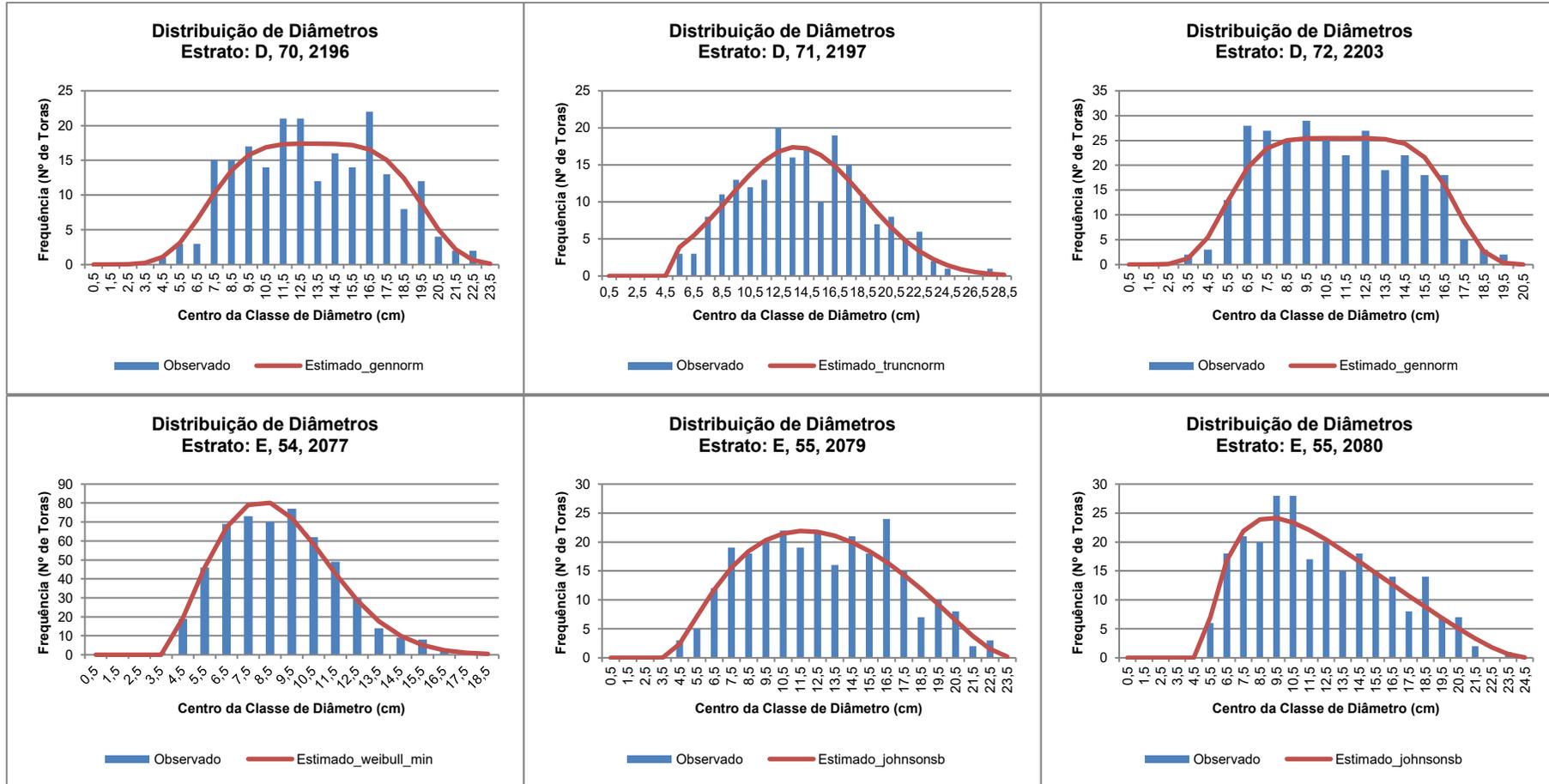


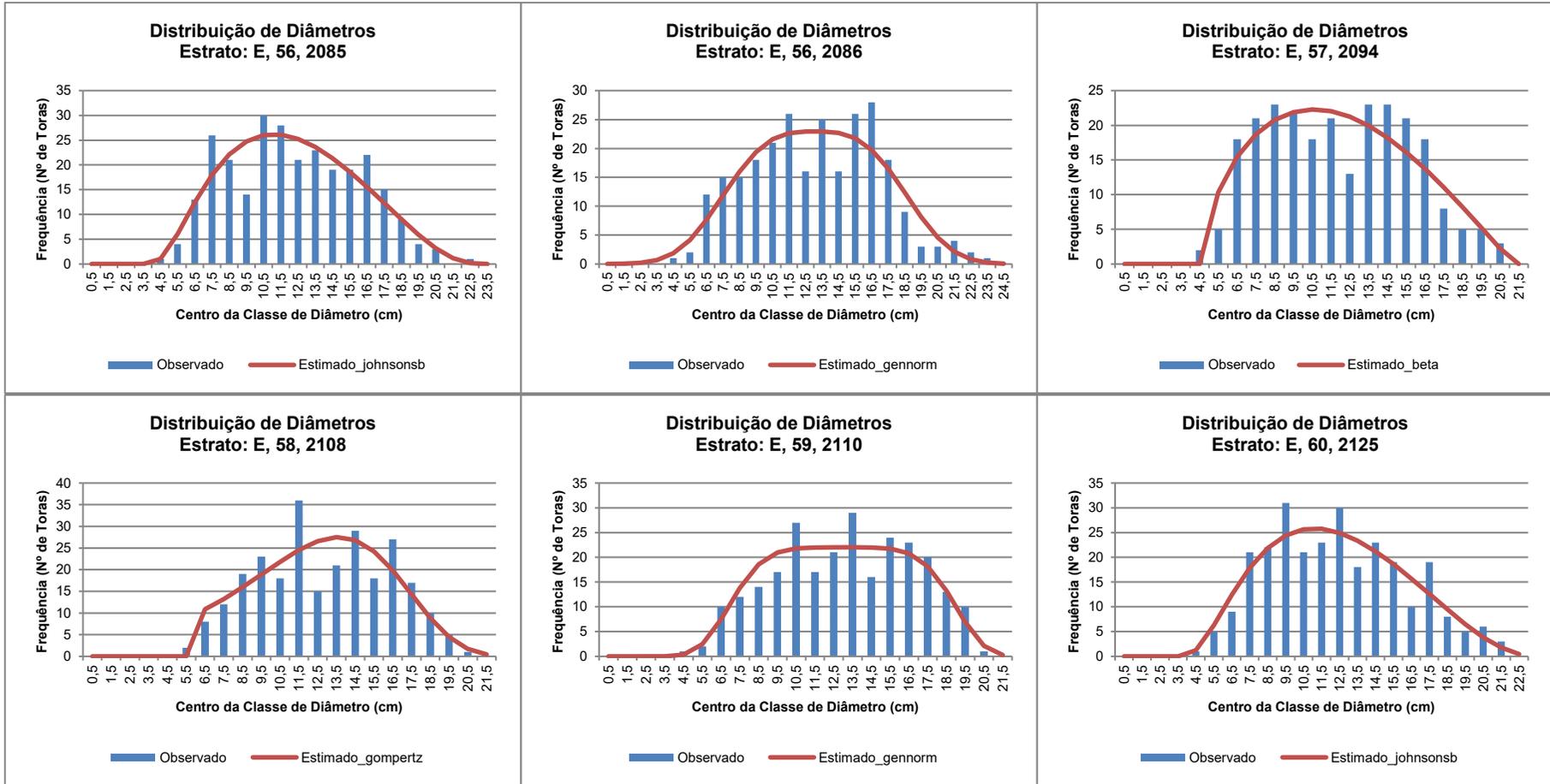
2023

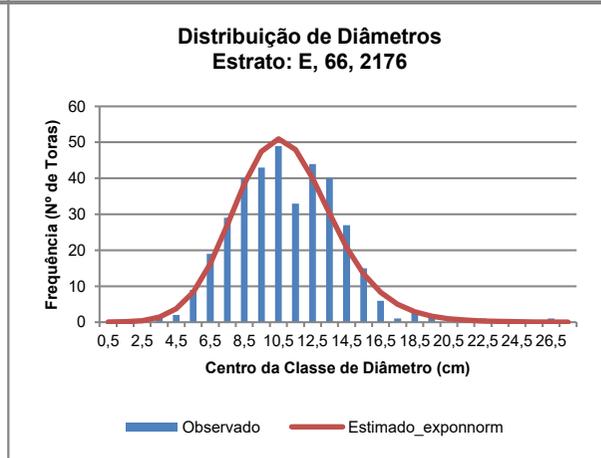
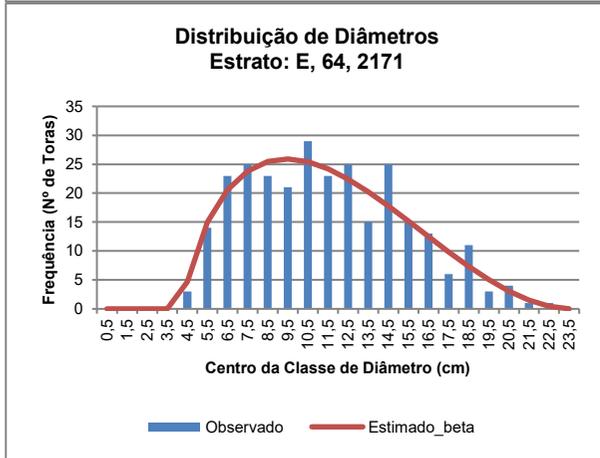
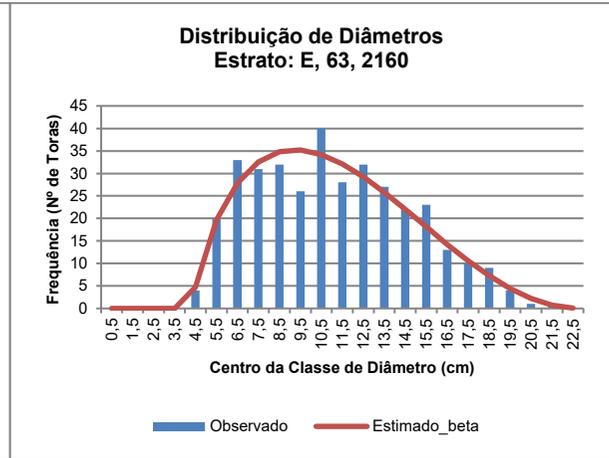
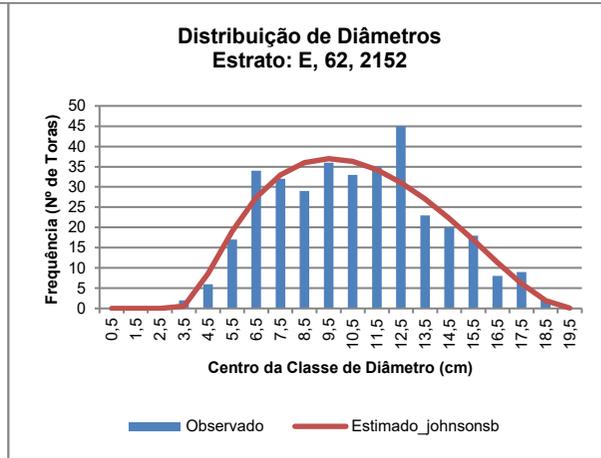
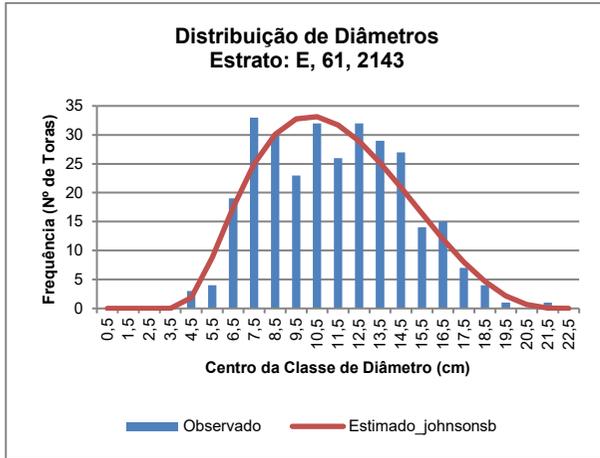




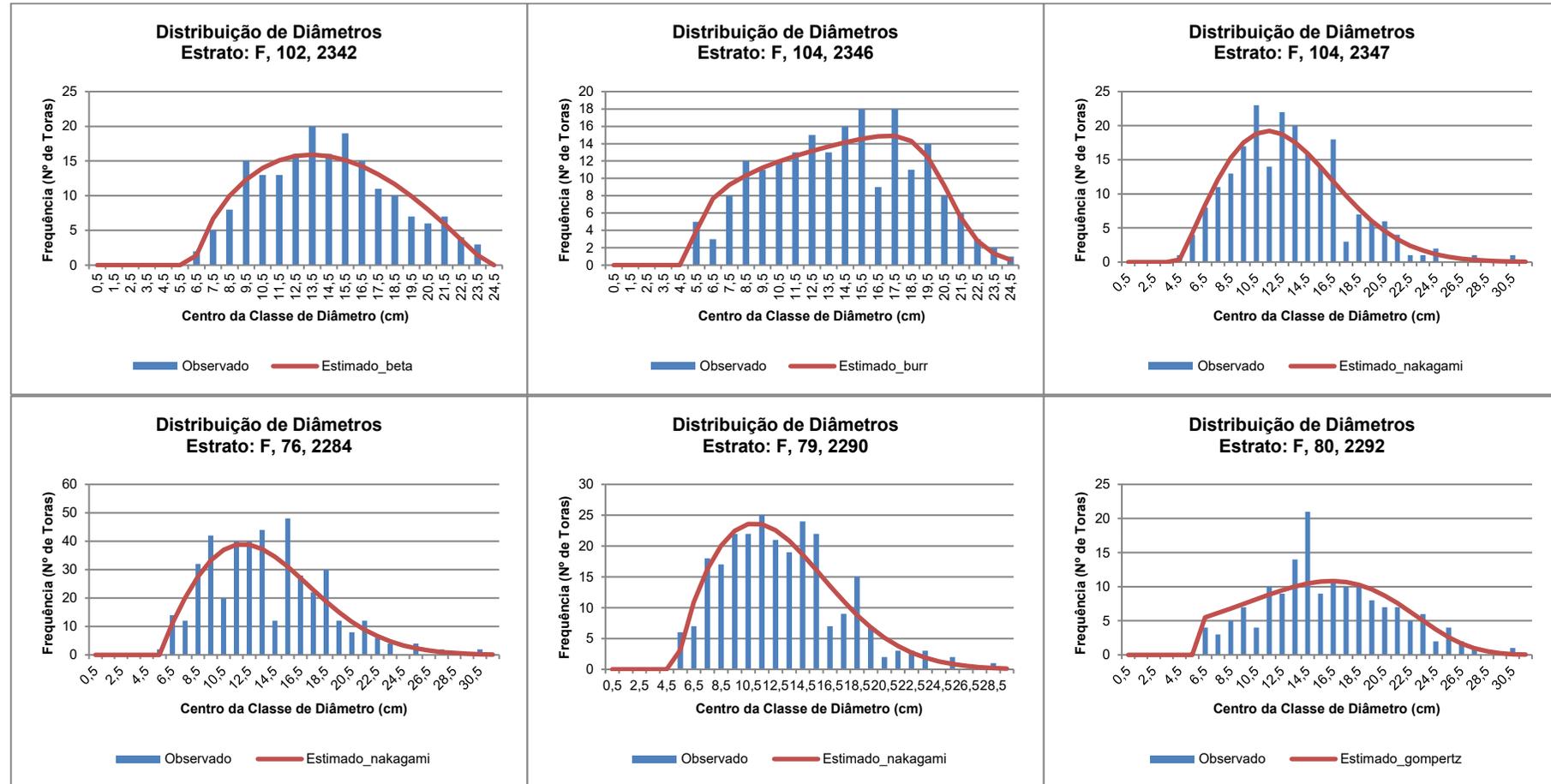


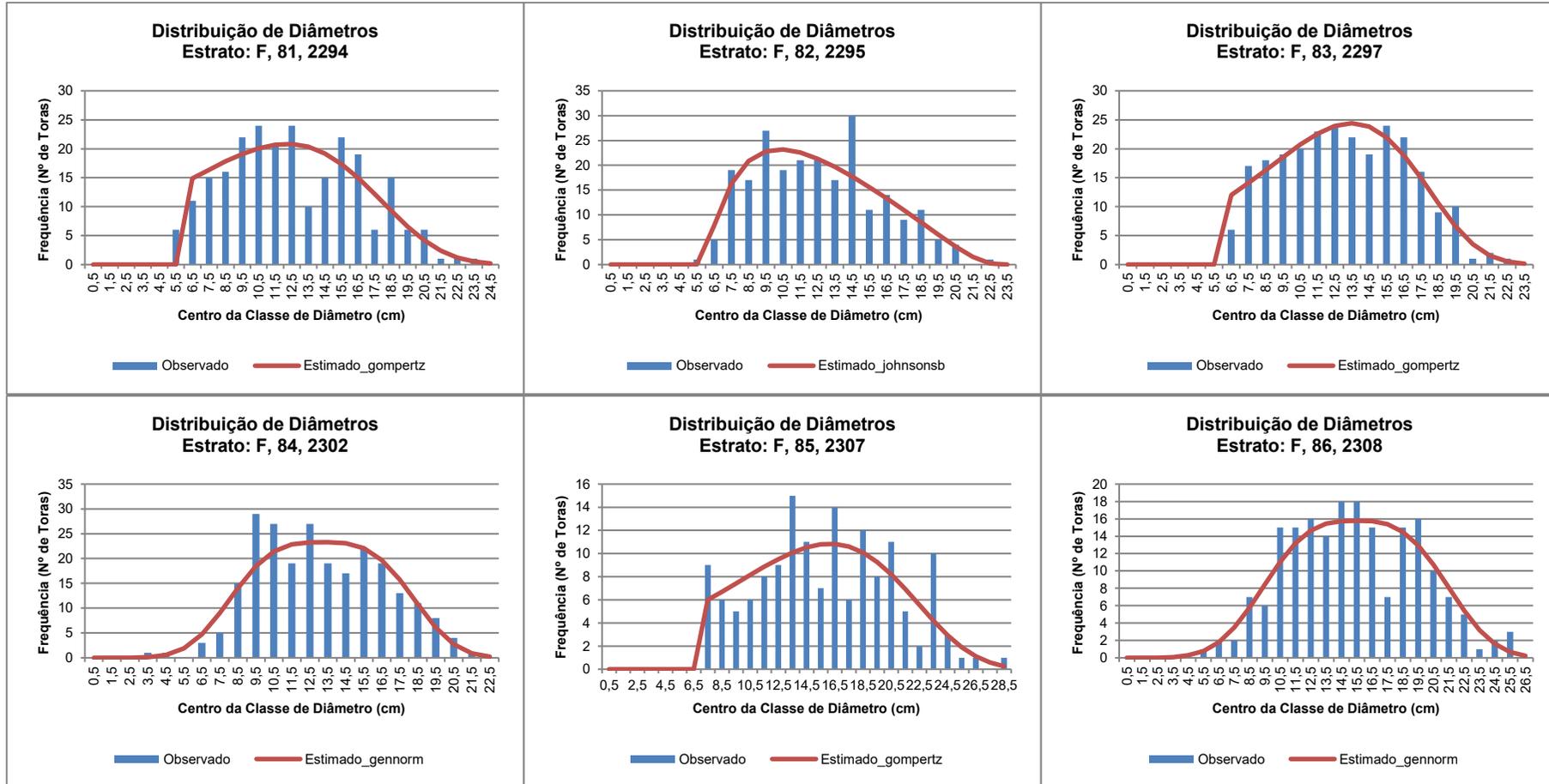


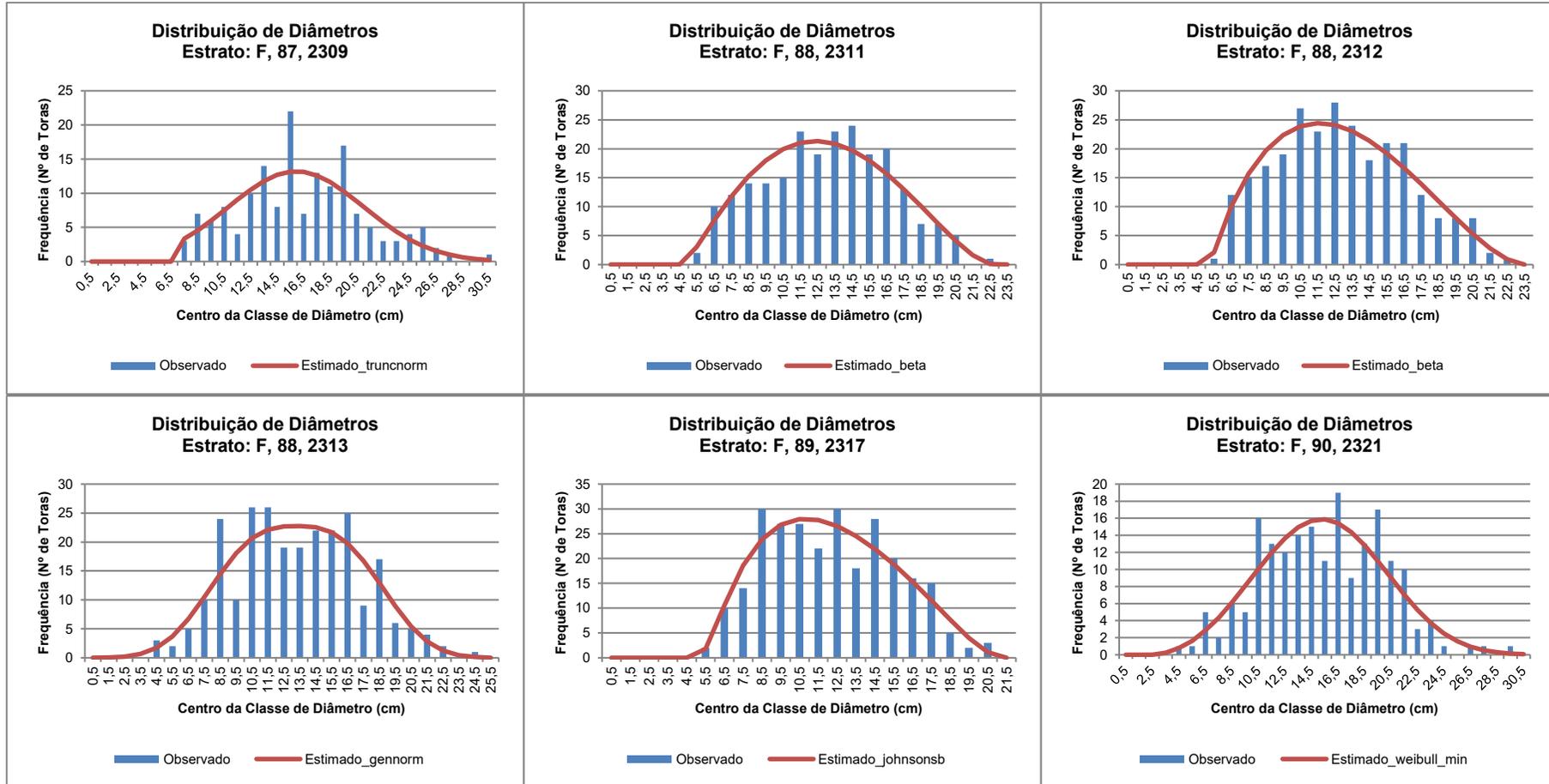


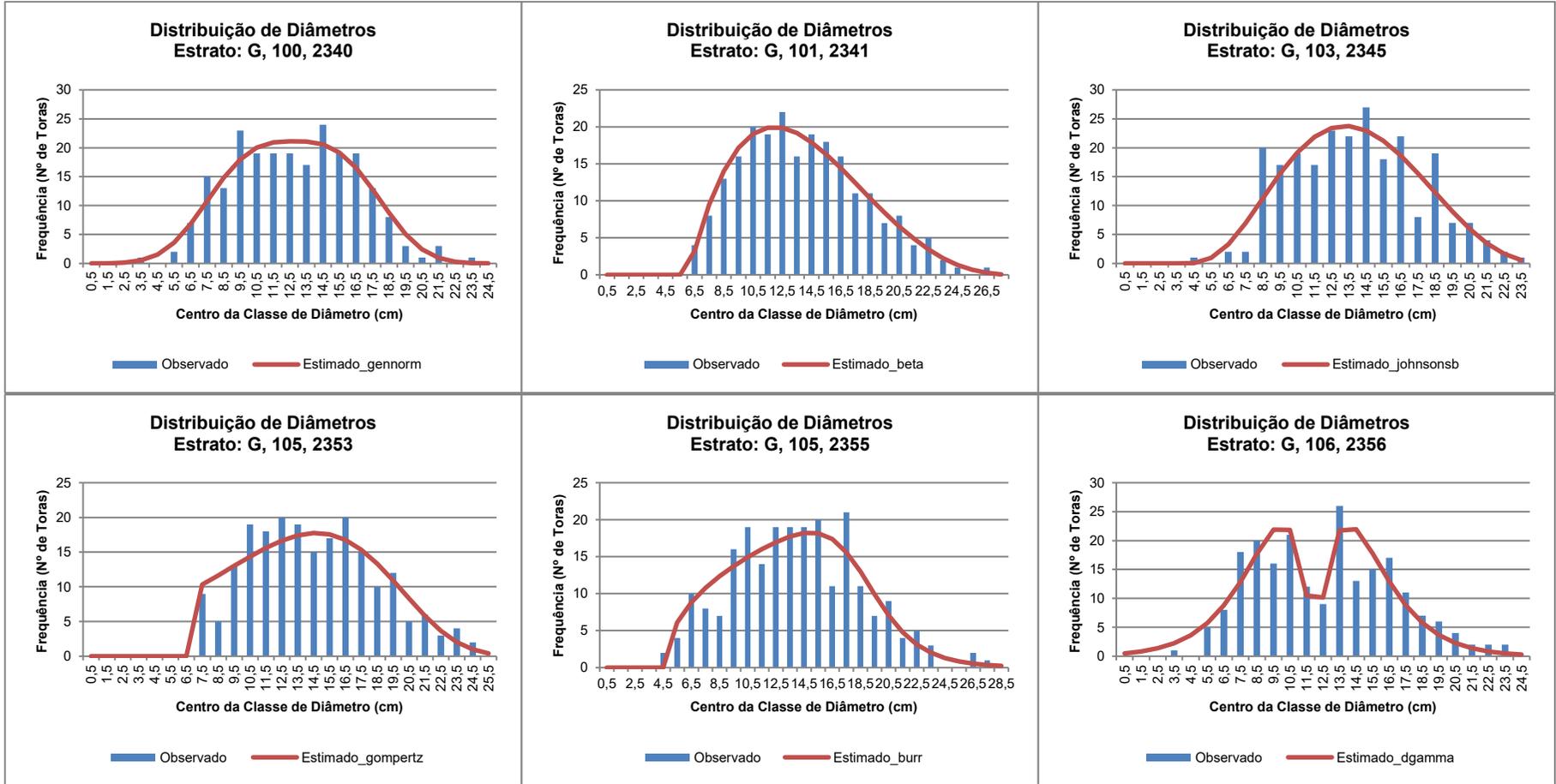


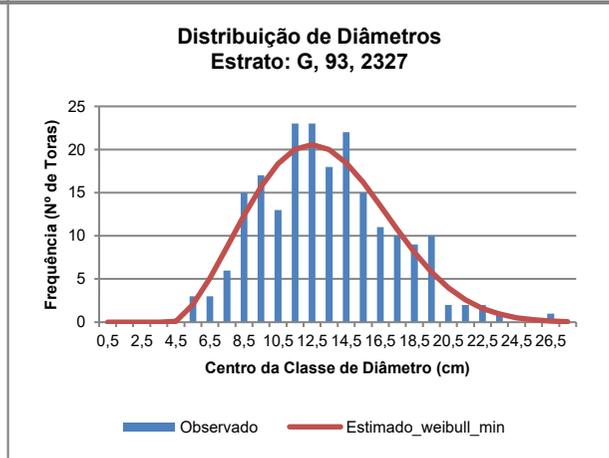
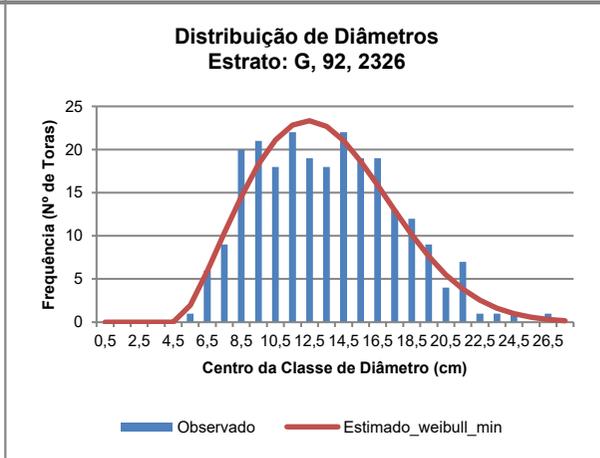
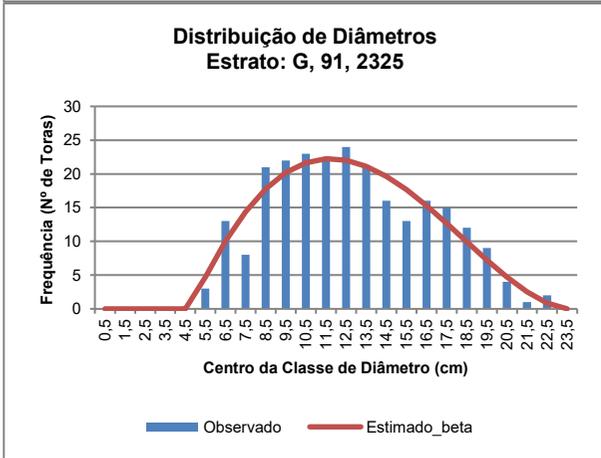
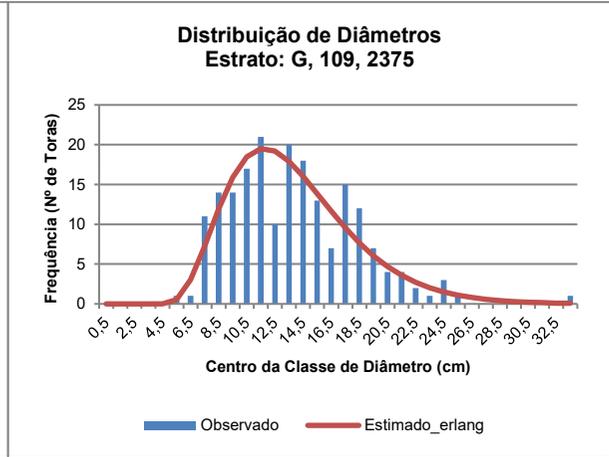
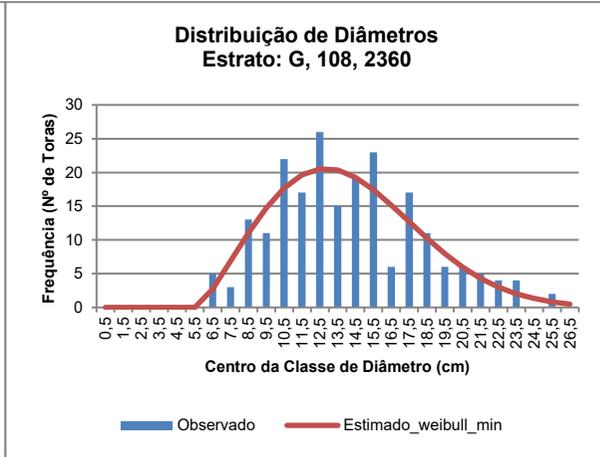
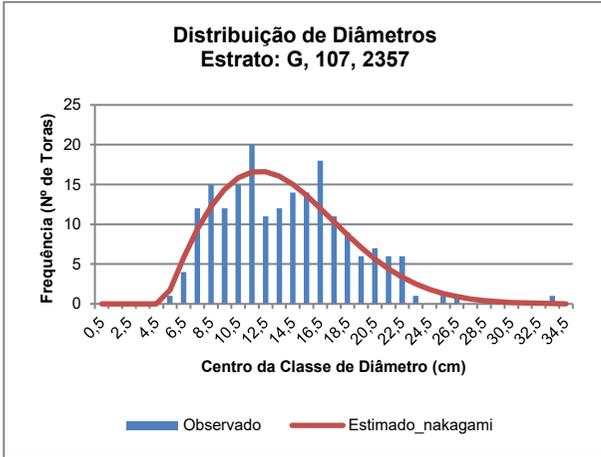
2024

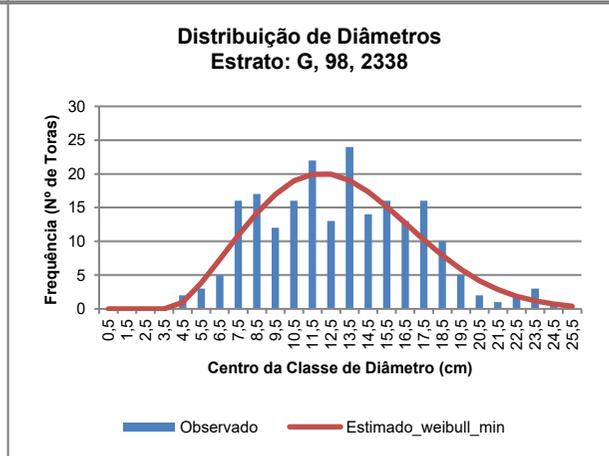
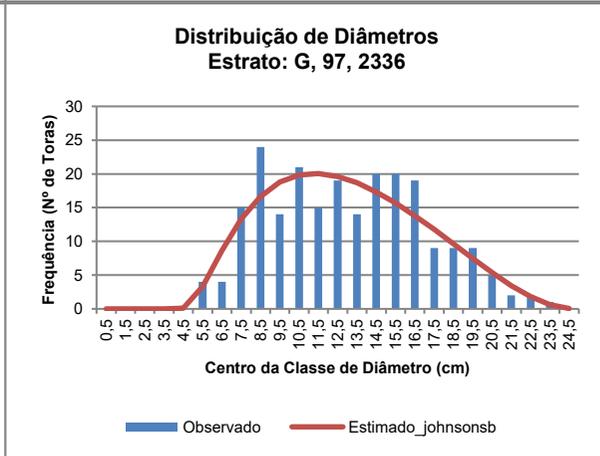
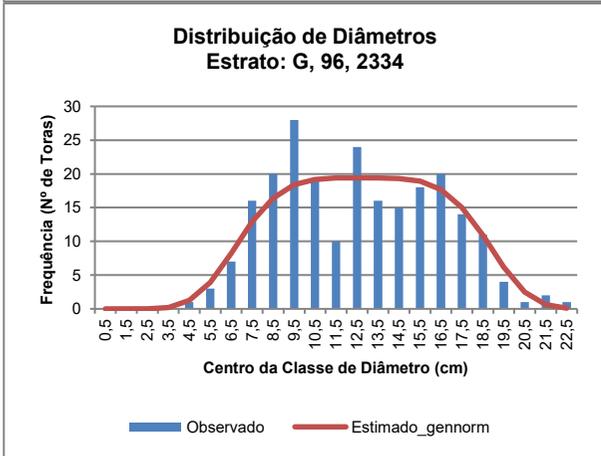
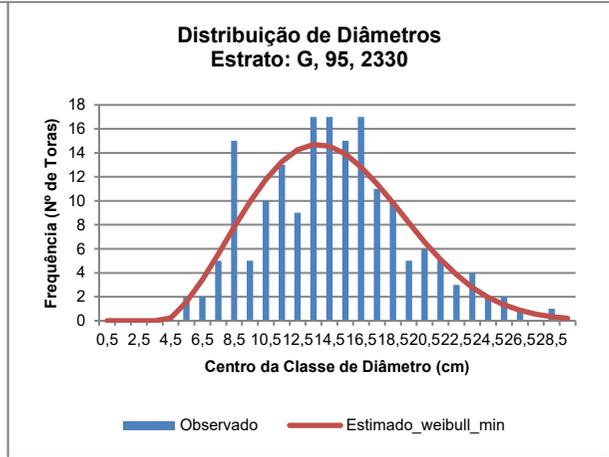
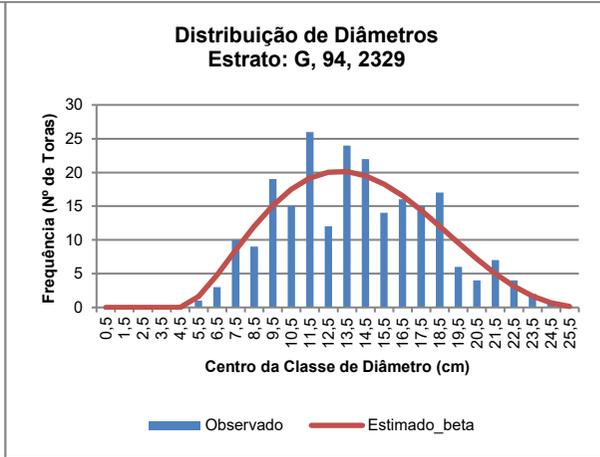
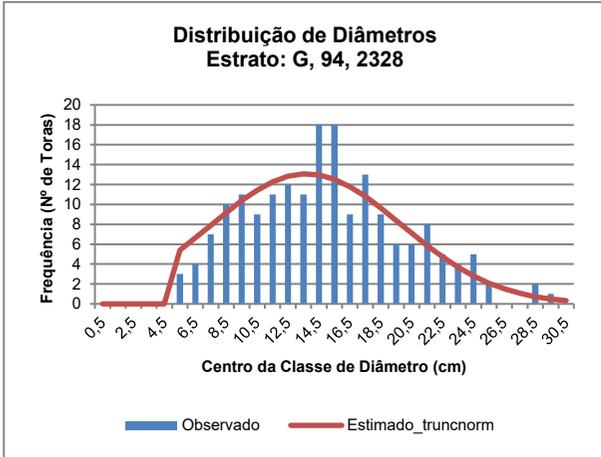


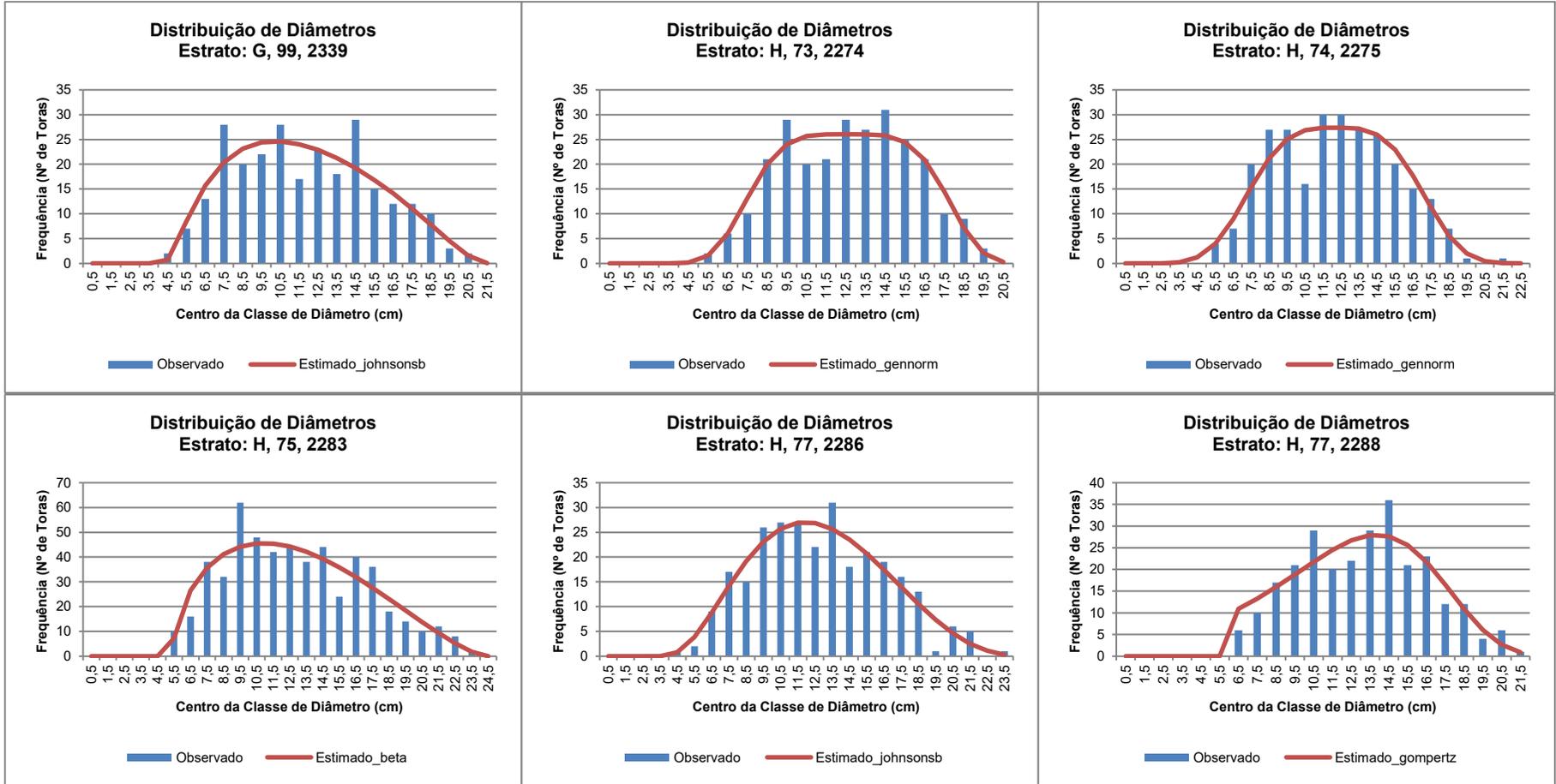


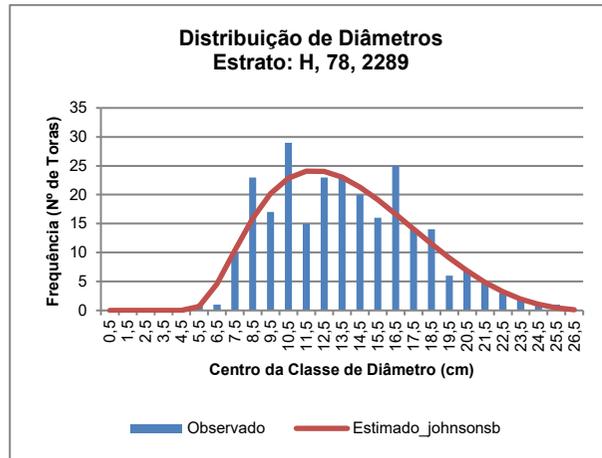












APÊNDICE F

Detalhamento dos volumes (m³) quantificados e as comparações dos Cenário I (Distribuição Empírica) e II (Distribuição Teórica) para o Banco de Dados 1.

2022 - A

Talhão	Nº de Árvores	Dap Médio (cm)	Ht Média (m)	Nº Total Toras	Volume Total Huber Int. (m ³)	Volume Total Smalian (m ³)	Volume Total Huber (m ³)	Volume Dist. Empírica (m ³)	Volume Dist. Estimada (m ³)	Distribuição Usada	Dist. Empírica vs Huber Int. (%)	Dist. Estimada vs Huber Int. (%)	Vol. Empírica vs Estimado (%)
1	918	17,75	29,82	4739	329,1547	334,8115	334,4328	335,8706	335,16	beta	2,04	1,82	0,21
2	977	17,94	31,81	5426	381,9242	387,526	390,8335	392,0415	391,3717	exponweib	2,65	2,47	0,17
22	542	17,93	28,69	2683	187,8526	191,4071	191,6278	192,4609	192,2679	beta	2,45	2,35	0,10
23	474	17,96	29,27	2409	168,4565	171,476	171,7141	172,3382	170,8185	exponweib	2,30	1,40	0,89
25	1022	16,53	26,80	4899	277,2671	282,65	279,841	281,4087	281,649	gompertz	1,49	1,58	-0,09
26	616	16,24	25,59	2760	164,4295	168,0217	166,3028	166,9866	166,8564	exponweib	1,56	1,48	0,08
27	638	18,18	30,35	3377	238,3764	242,3085	241,8007	242,5308	241,9073	exponweib	1,74	1,48	0,26
28	185	18,08	29,88	975	69,6129	70,7378	71,8317	72,0657	71,65	exponweib	3,52	2,93	0,58
29	348	18,75	30,40	1858	140,1091	142,3424	140,4163	140,9064	140,2491	exponweib	0,57	0,10	0,47
30	705	18,08	28,56	3514	251,1916	255,8198	257,9516	259,0254	257,4985	exponweib	3,12	2,51	0,59
32	731	18,44	30,35	3904	279,8788	284,4752	283,8237	284,7664	282,1258	exponweib	1,75	0,80	0,94
34	361	15,52	23,75	1498	78,3442	80,3832	80,9395	81,5353	81,3488	beta	4,07	3,84	0,23
35	186	17,75	27,72	916	59,0979	60,2038	60,2695	60,676	60,4705	exponweib	2,67	2,32	0,34
36	46	15,57	21,44	184	8,6616	8,8887	8,8099	8,8891	8,9589	beta	2,63	3,43	-0,78
37	1087	16,46	27,22	5200	302,2205	308,0658	307,3902	309,1338	308,0549	exponweib	2,29	1,93	0,35
4	743	17,60	28,53	3631	242,4405	247,1326	248,7335	249,335	249,5585	johnsonsb	2,84	2,94	-0,09
42	548	18,49	30,23	2866	207,204	210,8212	209,8249	210,5419	208,5265	exponweib	1,61	0,64	0,97
43	906	18,75	30,72	4895	362,5158	368,3411	368,8118	369,8948	368,972	exponweib	2,04	1,78	0,25
5	634	17,75	29,15	3175	218,0281	222,1026	222,3226	222,9537	222,8319	exponweib	2,26	2,20	0,05

2022-B

Talhão	Nº de Árvores	Dap Médio (cm)	Ht Média (m)	Nº Total Toras	Volume Total Huber Int. (m³)	Volume Total Smalian (m³)	Volume Total Huber (m³)	Volume Dist. Empírica (m³)	Volume Dist. Estimada (m³)	Distribuição Usada	Dist. Empírica vs Huber Int. (%)	Dist. Estimada vs Huber Int. (%)	Vol. Empírica vs Estimado (%)
10	225	18,49	28,51	1118	84,8964	86,3732	85,8925	86,583	84,3327	burr	1,99	-0,66	2,67
11	257	17,40	26,17	1166	77,5092	79,1679	77,7358	77,8873	77,9906	exponweib	0,49	0,62	-0,13
12	733	18,68	28,62	3676	272,4344	277,3232	274,817	276,0642	275,294	exponweib	1,33	1,05	0,28
16	575	18,25	27,82	2783	196,1398	199,942	201,2065	202,2154	201,3274	exponweib	3,10	2,64	0,44
17	745	18,68	28,66	3723	276,8419	281,9581	283,1208	284,8912	283,5994	exponweib	2,91	2,44	0,46
18	621	19,82	30,21	3242	273,5462	278,088	276,1375	276,5526	276,5691	exponweib	1,10	1,11	-0,01
19	370	19,70	29,80	1907	163,0549	165,7756	167,8356	168,1372	168,0422	exponweib	3,12	3,06	0,06
20	475	17,45	24,85	2050	137,0727	140,339	141,8405	142,6281	140,7128	burr	4,05	2,66	1,36
21	1150	18,83	29,40	5861	433,9876	441,7424	438,9296	440,0694	439,2493	exponweib	1,40	1,21	0,19
22	685	19,19	29,62	3531	279,2993	284,0043	286,8266	287,7689	286,6015	exponweib	3,03	2,61	0,41
23	479	19,09	29,32	2444	188,8486	192,1234	190,3843	191,0684	190,31	exponweib	1,18	0,77	0,40
24	495	19,34	30,24	2594	201,0688	204,503	202,0532	203,2637	201,9781	exponweib	1,09	0,45	0,64
31	845	19,60	30,46	4491	350,5061	356,3885	354,7119	356,1866	354,1386	exponweib	1,62	1,04	0,58
33	880	18,23	27,52	4200	294,5617	300,4959	299,5976	300,3013	299,9102	exponweib	1,95	1,82	0,13
38	896	18,94	29,09	4533	356,6527	362,7767	361,3865	362,4165	362,2058	exponweib	1,62	1,56	0,06
9	313	19,03	28,92	1565	119,2042	121,4196	122,1714	122,5427	122,1428	exponweib	2,80	2,47	0,33

2022 - C

Talhão	Nº de Árvores	Dap Médio (cm)	Ht Média (m)	Nº Total Toras	Volume Total Huber Int. (m³)	Volume Total Smalian (m³)	Volume Total Huber (m³)	Volume Dist. Empírica (m³)	Volume Dist. Estimada (m³)	Distribuição Usada	Dist. Empírica vs Huber Int. (%)	Dist. Estimada vs Huber Int. (%)	Vol. Empírica vs Estimado (%)
1	451	17,16	27,21	2125	140,5956	143,2275	143,3779	143,6564	143,8314	beta	2,18	2,30	-0,12
13	481	16,93	26,84	2229	139,8005	142,552	140,997	141,6787	141,5872	exponweib	1,34	1,28	0,06
14	326	17,46	27,79	1564	101,0982	103,0031	103,567	103,9921	103,8478	exponweib	2,86	2,72	0,14
15	347	16,75	26,42	1596	96,1763	98,0964	97,3064	97,511	97,4207	exponweib	1,39	1,29	0,09
3	166	17,67	27,96	807	51,2929	52,2627	52,0483	52,3068	52,2059	exponweib	1,98	1,78	0,19

4	397	17,53	27,98	1926	123,128	125,4472	125,1489	125,655	125,2294	exponweib	2,05	1,71	0,34
5	382	17,65	28,38	1889	119,5723	121,7773	120,0725	120,3939	120,6513	gompertz	0,69	0,90	-0,21
6	643	16,81	26,12	2914	193,6706	197,4175	199,3336	199,7635	201,6038	burr	3,15	4,10	-0,91
8	378	16,47	26,29	1725	105,557	107,6309	107,7332	108,2909	108,0997	exponweib	2,59	2,41	0,18

2023 - D

Talhão	Nº de Árvores	Dap Médio (cm)	Ht Média (m)	Nº Total Toras	Volume Total Huber Int. (m³)	Volume Total Smalian (m³)	Volume Total Huber (m³)	Volume Dist. Empírica (m³)	Volume Dist. Estimada (m³)	Distribuição Usada	Dist. Empírica vs Huber Int. (%)	Dist. Estimada vs Huber Int. (%)	Vol. Empírica vs Estimado (%)
45	541	16,34	26,08	2485	135,726	138,5716	138,1717	138,8885	138,9169	gompertz	2,33	2,35	-0,02
46	548	16,54	26,08	2493	148,3998	151,4291	150,1021	150,9405	150,2659	exponweib	1,71	1,26	0,45
47	1144	16,92	26,59	5289	328,5788	335,1796	334,3706	335,8375	335,3414	exponweib	2,21	2,06	0,15
48	993	17,45	27,63	4765	302,2751	308,1259	306,9739	308,3018	307,4318	exponweib	1,99	1,71	0,28
49	1097	17,07	26,70	5120	310,0121	316,2885	318,4242	320,4419	318,985	exponweib	3,36	2,89	0,46
51	1046	17,19	27,00	4963	300,9366	306,7928	306,4442	307,8813	307,3612	exponweib	2,31	2,13	0,17
52	775	17,90	27,83	3723	257,8409	262,7316	263,3701	264,1375	263,929	exponweib	2,44	2,36	0,08
53	654	17,16	26,74	3045	198,5234	202,377	204,8891	205,3835	203,1536	truncnorm	3,46	2,33	1,10
65	621	18,56	27,41	2973	224,3956	228,5915	227,9362	228,8985	228,2613	weibull_min	2,01	1,72	0,28
67	1115	17,80	27,97	5425	358,5402	365,3034	363,5478	364,7962	364,0132	exponweib	1,74	1,53	0,22
68	770	18,72	28,19	3788	291,6913	296,8262	293,7449	294,8686	296,3997	burr	1,09	1,61	-0,52
69	668	19,03	29,46	3432	275,0915	279,5232	279,2329	280,3198	278,9806	exponweib	1,90	1,41	0,48
70	407	18,19	28,02	2000	151,0913	153,6371	152,1471	152,485	152,2607	exponweib	0,92	0,77	0,15
71	295	18,88	28,51	1467	116,0096	117,9836	117,5897	118,1644	117,6107	burr	1,86	1,38	0,47
72	420	17,76	25,65	1887	124,9521	127,6992	126,518	127,4012	125,7303	burr	1,96	0,62	1,33

2023 - E

Talhão	Nº de Árvores	Dap Médio (cm)	Ht Média (m)	Nº Total Toras	Volume Total Huber Int. (m³)	Volume Total Smalian (m³)	Volume Total Huber (m³)	Volume Dist. Empírica (m³)	Volume Dist. Estimada (m³)	Distribuição Usada	Dist. Empírica vs Huber Int. (%)	Dist. Estimada vs Huber Int. (%)	Vol. Empírica vs Estimado (%)
54	639	13,02	19,77	2221	91,7685	94,9416	96,0681	96,7655	96,3142	nakagami	5,45	4,95	0,47

55	385	18,22	27,55	1833	134,3091	137,2113	138,0557	138,5784	138,1221	exponweib	3,18	2,84	0,33
56	365	18,01	27,27	1726	121,8703	124,5633	124,3548	124,5881	124,0087	exponweib	2,23	1,75	0,47
57	923	17,11	25,68	4115	272,8368	279,3074	276,4865	277,4745	275,996	exponweib	1,70	1,16	0,54
58	737	18,30	27,90	3543	255,0149	260,6033	263,324	264,4959	266,438	truncnorm	3,72	4,48	-0,73
59	741	18,32	27,67	3540	263,3563	269,0045	273,2372	274,3145	273,6038	exponweib	4,16	3,89	0,26
60	691	19,70	29,31	3524	292,29	298,016	296,5828	297,5644	296,347	exponweib	1,80	1,39	0,41
61	791	15,09	21,62	2993	154,4013	159,288	158,4554	159,3361	159,606	beta	3,20	3,37	-0,17
62	806	15,63	23,86	3339	175,9115	180,8794	181,3762	182,3367	181,4861	exponweib	3,65	3,17	0,47
63	299	14,96	22,31	1162	58,7358	60,5474	60,6092	60,8625	60,5961	exponweib	3,62	3,17	0,44
64	117	16,32	24,74	502	27,5189	28,2863	27,8968	28,1801	27,9372	truncnorm	2,40	1,52	0,87
66	362	15,11	20,71	1309	63,1911	65,6026	63,5429	63,9873	63,8049	exponweib	1,26	0,97	0,29

2024 - F

Talhão	Nº de Árvores	Dap Médio (cm)	Ht Média (m)	Nº Total Toras	Volume Total Huber Int. (m³)	Volume Total Smalian (m³)	Volume Total Huber (m³)	Volume Dist. Empírica (m³)	Volume Dist. Estimada (m³)	Distribuição Usada	Dist. Empírica vs Huber Int. (%)	Dist. Estimada vs Huber Int. (%)	Vol. Empírica vs Estimado (%)
102	392	21,16	30,24	2049	186,4847	189,6721	189,1409	189,695	188,4432	exponweib	1,72	1,05	0,66
104	380	20,26	27,48	1810	161,7768	164,8774	165,1773	165,6265	165,4311	exponweib	2,38	2,26	0,12
74	1220	19,50	26,30	5606	452,684	462,1559	462,4445	464,503	463,7824	weibull_min	2,61	2,45	0,16
76	514	19,66	27,52	2454	198,2504	202,1603	201,6092	202,4254	202,561	truncnorm	2,11	2,17	-0,07
80	499	20,47	28,76	2492	229,9842	233,946	231,8389	232,6796	232,5671	exponweib	1,17	1,12	0,05
81	451	19,86	27,82	2185	184,5447	187,9746	188,494	189,232	189,1654	truncnorm	2,54	2,50	0,04
82	495	18,53	25,46	2193	160,3063	163,8715	166,8258	167,6303	167,429	exponweib	4,57	4,44	0,12
83	543	19,61	27,14	2546	209,3728	213,5701	213,2911	213,8952	213,411	weibull_min	2,16	1,93	0,23
84	705	18,89	25,06	3085	232,0052	237,4515	240,3135	241,4316	240,9899	exponweib	4,06	3,87	0,18
85	456	21,46	30,39	2393	230,0724	233,892	232,4375	233,3568	232,6335	exponweib	1,43	1,11	0,31
86	135	22,48	32,37	753	76,6822	77,8967	77,6428	78,0004	77,6538	gompertz	1,72	1,27	0,45
88	574	19,54	28,17	2807	221,0673	225,2919	227,4019	228,5697	227,5776	burr	3,39	2,94	0,44
89	465	18,89	24,84	2023	152,9722	156,575	154,8188	155,7306	155,3156	exponweib	1,80	1,53	0,27
90	395	21,14	28,75	1963	184,1325	187,5937	187,2419	188,0565	187,3021	exponweib	2,13	1,72	0,40

2024 - G

Talhão	Nº de Árvores	Dap Médio (cm)	Ht Média (m)	Nº Total Toras	Volume Total Huber Int. (m³)	Volume Total Smalian (m³)	Volume Total Huber (m³)	Volume Dist. Empírica (m³)	Volume Dist. Estimada (m³)	Distribuição Usada	Dist. Empírica vs Huber Int. (%)	Dist. Estimada vs Huber Int. (%)	Vol. Empírica vs Estimado (%)
100	792	19,82	28,29	3902	325,2399	331,7146	331,2332	331,8965	331,1042	burr	2,05	1,80	0,24
101	495	19,33	28,72	2485	192,4561	196,1699	199,4733	200,5792	200,1591	exponweib	4,22	4,00	0,21
103	371	20,48	30,34	1956	171,1259	174,1779	173,0705	173,5093	173,1407	exponweib	1,39	1,18	0,21
105	844	20,26	29,90	4401	401,0767	407,8689	405,6284	407,7555	407,928	truncnorm	1,67	1,71	-0,04
107	359	19,57	27,68	1725	136,9605	139,9461	137,7125	138,4566	137,7321	exponweib	1,09	0,56	0,53
108	790	19,81	29,94	4102	337,7728	343,9519	349,3473	350,0074	348,7826	exponweib	3,62	3,26	0,35
109	421	19,54	28,44	2077	170,3929	173,7143	173,3969	173,7903	173,4815	truncnorm	1,99	1,81	0,18
91	539	19,75	27,48	2588	209,9256	214,3989	213,5477	214,3747	213,9395	exponweib	2,12	1,91	0,20
92	322	19,84	29,63	1661	137,1535	139,6667	139,6944	141,022	140,4205	exponweib	2,82	2,38	0,43
93	594	19,45	25,96	2694	216,7372	221,8836	219,7309	221,5075	220,4292	exponweib	2,20	1,70	0,49
94	491	19,32	28,85	2472	196,3574	200,0326	199,266	199,804	199,0328	exponweib	1,76	1,36	0,39
95	827	19,40	27,39	3940	314,9379	321,642	319,0049	320,6305	319,3363	exponweib	1,81	1,40	0,41
96	1228	19,16	27,02	5802	450,5659	460,2699	460,6244	462,3664	461,4988	exponweib	2,62	2,43	0,19
97	731	19,23	27,41	3476	271,9014	277,6676	277,4562	278,4906	277,6622	exponweib	2,42	2,12	0,30
98	828	19,50	28,27	4074	320,9525	327,455	327,2518	327,8848	327,9043	exponweib	2,16	2,17	-0,01

2024 - H

Talhão	Nº de Árvores	Dap Médio (cm)	Ht Média (m)	Nº Total Toras	Volume Total Huber Int. (m³)	Volume Total Smalian (m³)	Volume Total Huber (m³)	Volume Dist. Empírica (m³)	Volume Dist. Estimada (m³)	Distribuição Usada	Dist. Empírica vs Huber Int. (%)	Dist. Estimada vs Huber Int. (%)	Vol. Empírica vs Estimado (%)
73	772	17,30	20,67	2825	185,8694	191,9976	189,7997	191,8004	191,8256	beta	3,19	3,20	-0,01
74	531	17,83	22,44	2095	137,0251	141,1946	144,4879	145,448	145,7299	beta	6,15	6,35	-0,19
75	758	17,39	21,75	2918	195,8386	201,6521	199,6911	201,5921	200,7961	exponweib	2,94	2,53	0,40
77	573	17,47	21,85	2209	146,2963	150,708	151,2323	152,3259	152,1981	beta	4,12	4,03	0,08
78	435	18,16	22,42	1730	133,9655	137,4695	137,565	138,9375	138,6315	truncnorm	3,71	3,48	0,22

APÊNDICE G

Detalhamento dos volumes (m³) quantificados e as comparações dos Cenário III (Distribuição Empírica) e IV (Distribuição Teórica) para o Banco de Dados 2.

2022

Projeto	Talhão	Pilha	Comprimento Médio da Tora (m)	Volume Total Smalian (m ³)	Volume Total Huber Int. (m ³)	Nº Total Toras	Volume Dist. Empírica (m ³)	Volume Dist. Estimada (m ³)	Distribuição Usada	Dist. Empírica vs Huber Int. (%)	Dist. Estimada vs Huber Int. (%)	Vol. Empírica vs Estimado (%)
A	1	1884	5,68	22,9437	22,9235	297	23,1370	22,9598	johnsonsb	0,93	0,16	0,77
A	2	1890	5,95	21,9300	21,9146	273	21,8015	21,6419	gennorm	-0,52	-1,24	0,74
A	25	1963	5,73	18,6677	18,6452	301	19,4976	19,6148	dgamma	4,57	5,20	-0,60
A	26	1964	5,46	17,4934	17,4566	309	18,4816	18,3025	beta	5,87	4,85	0,98
A	27	1965	5,73	19,0224	19,0051	266	19,8036	19,5232	gennorm	4,20	2,73	1,44
A	28	1969	5,61	17,9608	17,9453	234	19,0081	18,7427	gompertz	5,92	4,44	1,42
A	29	1971	5,64	18,6629	18,6420	282	19,8790	19,6707	gompertz	6,64	5,52	1,06
A	30	1972	5,49	15,7930	15,7723	233	17,0580	16,8199	weibull_min	8,15	6,64	1,42
A	32	1974	5,82	20,9863	20,9630	264	21,1351	20,8585	weibull_min	0,82	-0,50	1,33
A	34	1985	5,98	21,4882	21,4586	327	20,9267	20,7722	weibull_min	-2,48	-3,20	0,74
A	35	1986	5,55	23,2909	23,2656	329	24,2887	23,9565	weibull_min	4,40	2,97	1,39
A	36	1987	5,56	17,4864	17,4521	306	18,8677	18,6851	weibull_min	8,11	7,07	0,98
A	37	1988	5,68	22,6084	22,5587	437	23,4655	23,3524	burr	4,02	3,52	0,48
A	39	1990	5,65	19,8519	19,8324	268	20,5276	20,4071	gennorm	3,51	2,90	0,59
A	40	1991	5,49	19,6418	19,6222	298	20,7244	20,5697	beta	5,62	4,83	0,75
A	41	1994	5,65	21,5024	21,4787	289	22,4481	22,2194	gennorm	4,51	3,45	1,03
A	42	1997	5,67	21,5897	21,5739	238	22,4336	22,1540	weibull_min	3,98	2,69	1,26
A	43	1998	5,90	21,7423	21,7223	266	21,8450	21,7010	gennorm	0,56	-0,10	0,66
A	44	1999	5,74	21,5812	21,5584	287	22,1057	21,7895	weibull_min	2,54	1,07	1,45
B	10	1920	5,87	19,5951	19,5873	223	19,2858	19,2988	beta	-1,54	-1,47	-0,07
B	11	1922	5,08	17,7004	17,6930	197	19,1433	19,0440	johnsonsb	8,20	7,64	0,52

B	12	1923	5,67	20,2064	20,1974	216	20,9466	20,7152	weibull_min	3,71	2,56	1,12
B	16	1939	5,35	18,6948	18,6814	225	19,9590	19,7740	nakagami	6,84	5,85	0,94
B	17	1940	5,68	19,8205	19,8094	185	20,5867	20,3760	nakagami	3,92	2,86	1,03
B	18	1945	5,67	22,8053	22,7892	252	23,3767	23,2274	johnsonsb	2,58	1,92	0,64
B	19	1947	5,46	20,5031	20,4898	204	21,9536	21,6981	johnsonsb	7,14	5,90	1,18
B	20	1949	5,53	18,0453	18,0294	228	18,8491	18,8213	johnsonsb	4,55	4,39	0,15
B	21	1952	5,65	21,8713	21,8570	295	22,7485	23,3811	gennorm	4,08	6,97	-2,71
B	22	1954	5,66	21,6016	21,5824	255	22,4365	22,6766	gennorm	3,96	5,07	-1,06
B	23	1955	5,69	21,3910	21,3610	176	22,5497	22,3834	gompertz	5,56	4,79	0,74
B	24	1958	5,96	23,8412	23,8233	225	23,7798	23,6820	gompertz	-0,18	-0,59	0,41
B	31	1973	5,82	18,2932	18,2773	215	18,8984	18,8259	beta	3,40	3,00	0,39
B	33	1981	5,70	16,3441	16,3264	191	16,7402	16,5228	genextreme	2,53	1,20	1,32
B	38	1989	5,77	20,4276	20,4074	201	20,4952	20,3751	johnsonsb	0,43	-0,16	0,59
B	9	1918	5,63	19,1721	19,1638	204	19,5182	19,3819	johnsonsb	1,85	1,14	0,70
C	13	1928	5,64	21,0387	21,0212	306	21,9006	21,7315	weibull_min	4,18	3,38	0,78
C	14	1931	5,88	21,0222	21,0056	261	20,9717	20,6000	exponweib	-0,16	-1,93	1,80
C	15	1932	5,68	21,4672	21,4518	306	22,0420	22,0797	gompertz	2,75	2,93	-0,17
C	15	1933	5,57	17,6969	17,6860	286	18,6637	18,3082	johnsonsb	5,53	3,52	1,94
C	3	1897	5,75	19,2661	19,2482	259	19,4097	19,8745	gennorm	0,84	3,25	-2,34
C	4	1898	5,44	19,8527	19,8393	285	20,8699	21,3783	burr	5,19	7,76	-2,38
C	4	1899	5,56	20,4148	20,4021	287	21,2019	20,9471	johnsonsb	3,92	2,67	1,22
C	5	1906	5,63	24,2837	24,2675	346	25,0532	25,0292	gennorm	3,24	3,14	0,10
C	6	1908	5,78	20,5161	20,5041	240	20,6893	20,4700	johnsonsb	0,90	-0,17	1,07
C	7	1911	5,76	23,3949	23,3830	277	23,5267	23,3287	johnsonsb	0,61	-0,23	0,85
C	8	1913	5,63	20,9928	20,9828	248	21,1775	21,0516	beta	0,93	0,33	0,60

2023

Projeto	Talhão	Pilha	Comprimento Médio da Tora (m)	Volume Total Smalian (m³)	Volume Total Huber Int. (m³)	Nº Total Toras	Volume Dist. Empírica (m³)	Volume Dist. Estimada (m³)	Distribuição Usada	Dist. Empírica vs Huber Int. (%)	Dist. Estimada vs Huber Int. (%)	Vol. Empírica vs Estimado (%)
---------	--------	-------	-------------------------------	---------------------------	------------------------------	----------------	----------------------------	----------------------------	--------------------	----------------------------------	----------------------------------	-------------------------------

D	45	2017	5,64	18,7665	18,7457	281	19,2040	19,6019	gennorm	2,45	4,57	-2,03
D	45	2021	5,60	17,8299	17,8151	229	18,4788	18,5399	gennorm	3,73	4,07	-0,33
D	46	2022	5,55	21,4744	21,4551	306	22,8195	22,5539	beta	6,36	5,12	1,18
D	47	2024	5,53	18,2781	18,2646	299	19,1590	19,0390	johnsonsb	4,90	4,24	0,63
D	48	2026	5,55	21,2500	21,2297	325	22,2996	22,1186	gompertz	5,04	4,19	0,82
D	49	2036	5,57	18,9254	18,9081	270	19,9379	19,7052	weibull_min	5,45	4,22	1,18
D	49	2037	5,58	20,0477	20,0309	285	21,1960	21,0046	gompertz	5,82	4,86	0,91
D	49	2046	5,70	22,7505	22,7299	321	23,5055	23,1686	gennorm	3,41	1,93	1,45
D	50	2054	5,84	22,4764	22,4564	276	22,4248	22,2198	gompertz	-0,14	-1,05	0,92
D	51	2065	5,52	20,8622	20,8388	358	21,4044	21,3315	gennorm	2,71	2,36	0,34
D	52	2071	5,42	21,0511	21,0266	293	21,6493	21,5266	exponweib	2,96	2,38	0,57
D	52	2072	5,41	17,7390	17,7220	224	18,5791	18,4357	gennorm	4,84	4,03	0,78
D	53	2075	5,55	23,1067	23,0823	289	23,4904	23,2709	johnsonsb	1,77	0,82	0,94
D	65	2175	5,72	23,4170	23,3882	266	23,9486	23,5583	weibull_min	2,40	0,73	1,66
D	67	2177	5,35	22,1876	22,1601	310	23,6239	23,7923	gennorm	6,61	7,37	-0,71
D	68	2184	5,75	21,9495	21,9226	241	21,9636	21,6825	weibull_min	0,19	-1,10	1,30
D	68	2186	5,68	20,8405	20,8155	263	20,9992	20,8473	beta	0,88	0,15	0,73
D	69	2190	5,58	20,9849	20,9687	225	21,6309	21,5428	beta	3,16	2,74	0,41
D	70	2196	5,70	19,2212	19,2047	215	19,3706	19,5357	gennorm	0,86	1,72	-0,84
D	71	2197	5,92	21,7055	21,6827	201	21,2341	20,9408	truncnorm	-2,07	-3,42	1,40
D	72	2203	5,62	17,6070	17,5799	288	17,9636	18,7844	gennorm	2,18	6,85	-4,37
E	54	2077	5,40	20,5667	20,5319	530	21,6942	21,4643	weibull_min	5,66	4,54	1,07
E	55	2079	5,70	22,4279	22,4091	264	22,6459	22,4878	johnsonsb	1,06	0,35	0,70
E	55	2080	5,57	19,8727	19,8439	259	20,1741	20,0041	johnsonsb	1,66	0,81	0,85
E	56	2085	6,10	22,5093	22,4827	273	21,1719	20,9652	johnsonsb	-5,83	-6,75	0,99
E	56	2086	6,19	24,6664	24,6385	261	22,8981	22,8438	gennorm	-7,06	-7,28	0,24
E	57	2094	5,70	18,5788	18,5438	249	18,3172	18,1114	beta	-1,22	-2,33	1,14
E	58	2108	6,03	23,2134	23,1934	261	21,7530	21,5717	gompertz	-6,21	-6,99	0,84
E	59	2110	5,89	22,9598	22,9389	257	22,4801	21,9089	gennorm	-2,00	-4,49	2,61
E	60	2125	6,01	22,9731	22,9425	274	21,6461	21,3914	johnsonsb	-5,65	-6,76	1,19

E	61	2143	5,75	19,1579	19,1221	300	19,7049	19,4988	johnsonsb	3,05	1,97	1,06
E	62	2152	5,47	18,1283	18,0958	349	20,2064	19,9880	johnsonsb	11,66	10,46	1,09
E	63	2160	5,53	20,5356	20,4929	356	22,9743	22,7762	beta	12,11	11,14	0,87
E	64	2171	5,49	18,1567	18,1326	280	19,3632	19,1332	beta	6,79	5,52	1,20
E	66	2176	5,58	21,8615	21,8291	367	22,6910	22,3746	exponnorm	3,95	2,50	1,41

2024

Projeto	Talhão	Pilha	Comprimento Médio da Tora (m)	Volume Total Smalian (m³)	Volume Total Huber Int. (m³)	Nº Total Toras	Volume Dist. Empírica (m³)	Volume Dist. Estimada (m³)	Distribuição Usada	Dist. Empírica vs Huber Int. (%)	Dist. Estimada vs Huber Int. (%)	Vol. Empírica vs Estimado (%)
F	102	2342	5,57	19,3497	19,3361	190	20,0274	20,0514	beta	3,58	3,70	-0,12
F	104	2346	5,49	20,1221	20,0985	198	20,9426	20,6782	burr	4,20	2,88	1,28
F	104	2347	5,55	18,8292	18,8089	213	19,1235	18,9584	nakagami	1,67	0,80	0,87
F	76	2284	5,87	44,5554	44,5084	436	43,6221	43,1230	nakagami	-1,99	-3,11	1,16
F	79	2290	5,62	22,5667	22,5398	255	22,3762	22,1624	nakagami	-0,73	-1,67	0,96
F	80	2292	6,04	22,4744	22,4543	160	21,2369	21,2407	gompertz	-5,42	-5,40	-0,02
F	81	2294	6,01	20,7712	20,7496	241	20,0438	19,8190	gompertz	-3,40	-4,48	1,13
F	82	2295	5,60	18,2084	18,1891	232	18,6601	18,5125	johnsonsb	2,59	1,78	0,80
F	83	2297	5,74	21,9889	21,9657	253	21,9669	21,8300	gompertz	0,01	-0,62	0,63
F	84	2302	5,64	20,1631	20,1353	241	20,8647	21,0787	gennorm	3,62	4,69	-1,02
F	85	2307	5,83	19,6547	19,6394	150	19,5458	19,3452	gompertz	-0,48	-1,50	1,04
F	86	2308	5,81	22,8165	22,7883	195	23,1806	23,4855	gennorm	1,72	3,06	-1,30
F	87	2309	5,96	22,3471	22,3259	161	22,1465	22,0130	truncnorm	-0,80	-1,40	0,61
F	88	2311	5,87	20,0182	19,9986	228	19,7878	19,4353	beta	-1,05	-2,82	1,81
F	88	2312	5,94	23,1257	23,0996	265	22,5659	22,3771	beta	-2,31	-3,13	0,84
F	88	2313	5,84	23,1857	23,1628	257	23,2812	23,2902	gennorm	0,51	0,55	-0,04
F	89	2317	5,77	20,3178	20,2849	269	20,3119	20,0632	johnsonsb	0,13	-1,09	1,24
F	90	2321	5,87	23,4211	23,4006	191	23,4252	23,1934	weibull_min	0,10	-0,89	1,00
G	100	2340	5,91	19,0684	19,0457	226	18,8046	18,7433	gennorm	-1,27	-1,59	0,33
G	101	2341	5,97	22,2129	22,1932	221	22,0037	21,7964	beta	-0,85	-1,79	0,95

G	103	2345	5,77	22,7755	22,7582	238	23,1395	22,8631	johnsonsb	1,68	0,46	1,21
G	105	2353	5,95	23,2871	23,2592	212	22,6991	22,5924	gompertz	-2,41	-2,87	0,47
G	105	2355	5,59	22,8737	22,8557	231	23,5590	23,0630	burr	3,08	0,91	2,15
G	106	2356	5,41	17,6721	17,6498	215	17,9937	16,4564	dgamma	1,95	-6,76	9,34
G	107	2357	5,40	18,5076	18,4788	197	20,2460	20,0723	nakagami	9,56	8,62	0,87
G	108	2360	5,98	22,3876	22,3708	215	21,9389	21,5467	weibull_min	-1,93	-3,68	1,82
G	109	2375	5,74	19,4112	19,3898	197	19,6362	19,4959	erlang	1,27	0,55	0,72
G	91	2325	5,66	20,0864	20,0630	245	20,6107	20,4098	beta	2,73	1,73	0,98
G	92	2326	5,82	22,6737	22,6551	243	22,8196	22,5750	weibull_min	0,73	-0,35	1,08
G	93	2327	5,68	18,3658	18,3470	206	18,7193	18,4639	weibull_min	2,03	0,64	1,38
G	94	2328	5,78	21,8019	21,7827	184	21,8438	21,1326	truncnorm	0,28	-2,98	3,37
G	94	2329	6,01	23,5341	23,5145	227	22,6717	22,4940	beta	-3,58	-4,34	0,79
G	95	2330	5,56	19,8032	19,7826	177	19,9627	19,7468	weibull_min	0,91	-0,18	1,09
G	96	2334	5,77	19,2038	19,1758	230	18,7127	19,2255	gennorm	-2,42	0,26	-2,67
G	97	2336	5,58	19,2806	19,2542	226	19,7838	19,5449	johnsonsb	2,75	1,51	1,22
G	98	2338	5,67	18,7677	18,7417	213	18,7342	18,4441	weibull_min	-0,04	-1,59	1,57
G	99	2339	5,80	18,8178	18,7961	261	18,8794	18,7158	johnsonsb	0,44	-0,43	0,87
H	73	2274	5,93	21,5186	21,4928	264	21,1916	20,9941	gennorm	-1,40	-2,32	0,94
H	74	2275	5,80	20,0840	20,0624	271	20,1896	20,3539	gennorm	0,63	1,45	-0,81
H	75	2283	5,77	47,0691	47,0211	538	46,6482	46,4783	beta	-0,79	-1,15	0,37
H	77	2286	5,57	23,1241	23,0964	277	23,3731	23,1919	johnsonsb	1,20	0,41	0,78
H	77	2288	5,66	23,4484	23,4271	269	23,4051	23,3120	gompertz	-0,09	-0,49	0,40
H	78	2289	5,78	24,9939	24,9709	256	24,5704	24,3070	johnsonsb	-1,60	-2,66	1,08
