

WESLEY COSTA FERREIRA

**EQUAÇÕES PARA VOLUME, BIOMASSA E ESTUDO DE VARIÁVEIS
CLIMÁTICAS NO CRESCIMENTO EM ÁREA TRANSVERSAL PARA *Calophyllum
brasiliense* Cambess, IGARASSU-PE, BRASIL**

RECIFE
Pernambuco – Brasil
Janeiro – 2023

WESLEY COSTA FERREIRA

**EQUAÇÕES PARA VOLUME, BIOMASSA E ESTUDO DE VARIÁVEIS
CLIMÁTICAS NO CRESCIMENTO EM ÁREA TRANSVERSAL PARA *Calophyllum
brasiliense* Cambess, IGARASSU-PE, BRASIL**

Dissertação apresentada ao Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais da Universidade Federal Rural de Pernambuco para obtenção do título de Mestre em Ciências Florestais.

Orientador: Prof. Dr. Rodrigo Eiji Hakamada

RECIFE
Pernambuco – Brasil
Janeiro – 2023

Dados Internacionais de Catalogação na Publicação
Universidade Federal Rural de Pernambuco
Sistema Integrado de Bibliotecas
Gerada automaticamente, mediante os dados fornecidos pelo(a) autor(a)

F383e Ferreira, Wesley Costa
EQUAÇÕES PARA VOLUME, BIOMASSA E ESTUDO DE VARIÁVEIS CLIMÁTICAS NO CRESCIMENTO EM
ÁREA TRANSVERSAL PARA *Calophyllum brasiliense* Cambess, IGARASSU-PE, BRASIL / Wesley Costa Ferreira. -
2022.
65 f. : il.

Orientador: Rodrigo Eiji Hakamada.
Inclui referências.

Dissertação (Mestrado) - Universidade Federal Rural de Pernambuco, Programa de Pós-Graduação em Ciências
Florestais, Recife, 2023.

1. Cubagem rigorosa. 2. Análise de regressão. 3. Sazonalidade climática. I. Hakamada, Rodrigo Eiji, orient. II.
Título

CDD 634.9

WESLEY COSTA FERREIRA

**EQUAÇÕES PARA VOLUME, BIOMASSA E ESTUDO DE VARIÁVEIS
CLIMÁTICAS NO CRESCIMENTO EM ÁREA TRANSVERSAL PARA *Calophyllum
brasiliense* Cambess, IGARASSU-PE, BRASIL**

APROVADA em 27/10/2022

Banca Examinadora:

Prof.^a Dr.^a Rute Berger
(DCFL/UFRPE)

Prof. Dr. Rinaldo Luiz Caraciolo Ferreira
(DCFL/UFRPE)

Orientador:

Prof. Dr. Rodrigo Eiji Hakamada
(DCFL/UFRPE)

**RECIFE-PE
Janeiro/2023**

DEDICATÓRIA

Dedico este trabalho aos meus pais Maria Bernadete e José Neto por jamais me permitirem desistir dos meus sonhos. Dedico também, em nome das professoras Olga Maria de Menezes Macêdo e Terezinha Ferreira de Oliveira (In memoriam), a todos os professores que fizeram parte da minha trajetória, pelo incentivo e por me mostrarem que o melhor caminho é o da educação.

AGRADECIMENTOS

Agradeço primeiramente a Deus pelo dom da vida, que em sua infinita bondade conduziu meus passos até este momento, nunca me desamparando e me dando coragem para enfrentar os obstáculos.

À Universidade Federal Rural de Pernambuco e ao Programa de Pós-Graduação em Ciência Florestal pela oportunidade de ingressar na instituição e desenvolver a pesquisa. E a todos os professores do PPGCF por todos os conhecimentos repassados.

À Coordenação de Aperfeiçoamento de Pessoal de Nível Superior (CAPES) pela bolsa concedida, que me permitiu a realização da pesquisa.

Aos meus amados pais, José Neto e Maria Bernadete, e aos meus irmãos, Felicidade, Yasmim, Wellington, Wendel e Wallisson por todo amor e dedicação, por terem me apoiado toda a minha vida.

Ao meu orientador Prof. Dr. Rodrigo Eiji Hakamada pela paciência, apoio na construção deste trabalho e ensinamentos passados.

Aos meus amigos Beatriz, Paulo, Marcelo, Renata e Iara por todo o apoio em Recife e aos demais amigos e colegas de turma.

À toda a equipe de campo que me ajudaram nas coletas de dados, em especial Lorena, Jonatas, Maria Clara e Igor.

A Mozart, o proprietário do plantio, por disponibilizar a área de estudo e aos seus funcionários Josias e Welington por todo o apoio para a realização da pesquisa.

A todos que, embora não foram citados, contribuíram de forma direta ou indiretamente para a realização deste trabalho.

Meu muito obrigado.

FERREIRA, W. C. **Equações para volume, biomassa e estudo de variáveis climáticas no crescimento em área transversal para *Calophyllum brasiliense* Cambess, Igarassu-PE, Brasil.** 2023. Orientador: Rodrigo Eiji Hakamada.

RESUMO

Diversas espécies nativas de regiões tropicais surgem como potenciais alternativas para os cultivos já consolidados de gêneros como *Eucalyptus* e *Pinus*. No entanto, são raros os estudos que buscam compreender a influência de variáveis climáticas na produção de biomassa. Os objetivos deste trabalho foram ajustar equações alométricas para estimar o volume e a biomassa de floresta equiânea de Guanandi (*Calophyllum brasiliense* Cambess) na zona da mata nordestina, município de Igarassu, Pernambuco, Brasil e avaliar a influência da sazonalidade meteorológica no seu crescimento. Em um povoamento de 2,5 hectares e 8,7 anos foram instaladas oito parcelas permanentes de 400 m², que foram mensuradas mensalmente por 12 meses e foi realizada uma amostragem destrutiva ao final do período para estimativa de volume e estoque de biomassa acima do solo. Para isso, foram selecionadas na área um total de 53 árvores para realização da cubagem rigorosa e 12 árvores para quantificação da biomassa. Na cubagem rigorosa, foi empregado o método analítico por meio do procedimento de Smalian. Com os dados referentes ao volume real, da biomassa total e dos diferentes compartimentos das árvores (folhas, galhos e fuste), foi feito o ajuste de equações por meio da análise de regressão, em que foram testados 6 modelos. Para analisar o crescimento das árvores em função das variáveis meteorológicas, foi calculada a área seccional (cm² árvore⁻¹). Com os dados climáticos e de incremento em área seccional, calculado subtraindo a medição do mês considerado e seu anterior, foi aplicada a análise de regressão linear múltipla para estimar a taxa de crescimento das árvores em função da sazonalidade meteorológica. O modelo volumétrico de melhor ajuste foi o de Schumacher-Hall, com bons indicadores de ajuste ($R^2_{aj} = 0,89$ e $S_{yx} \% = 9,74$), além de distribuição gráfica dos resíduos sem tendência nas estimativas, sendo válido para estimativa do volume individual para o povoamento de *C. brasiliense*. Tanto para a estimativa da biomassa total como para os compartimentos da planta (folhas, galhos e fuste), o modelo de melhor ajuste foi o de Meyer. O volume total obtido foi de 100 m³ ha⁻¹ e um incremento médio anual para o povoamento de 10,3 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ aos 9,8 anos de idade. Foi observado que o crescimento das árvores de *C. brasiliense* foi influenciado pela sazonalidade meteorológica, sendo que a variação no seu crescimento foi melhor correlacionado com o subconjunto com as variáveis temperatura máxima e mínima, evapotranspiração potencial, evapotranspiração real e déficit hídrico. Do ponto de vista prático, o estudo apresenta equações para serem utilizadas em florestas plantadas na estimativa de volume e biomassa de *C. brasiliense*, bem como evidencia que futuras mudanças no clima devem afetar o seu crescimento e sua produção.

Palavras-chave: Cubagem rigorosa, análise de regressão, sazonalidade climática.

FERREIRA, W. C. **Equations for volume, biomass and study of climatic variables in the growth in cross-sectional area for *Calophyllum Brasiliense* Cambess, Igarassu-PE, Brazil.** 2023. Adviser: Rodrigo Eiji Hakamada.

ABSTRACT

Several species native to tropical regions appear as potential alternatives for the already consolidated crops of genera such as *Eucalyptus* and *Pinus*. However, studies that seek to understand the influence of climatic variables on biomass production are rare. The objectives of this work were to adjust allometric equations to estimate the volume and biomass of Guanandis even-aged forest (*Calophyllum brasiliense* Cambess) in the Northeastern Forest Zone, the city of Igarassu, Pernambuco, Brazil and to evaluate the influence of meteorological seasonality on its growth. In a stand of 2.5 hectares and 8.7 years old, eight permanent plots of 400 m² were installed, which were measured monthly for 12 months and a destructive sampling was carried out at the end of the period to estimate the volume and aboveground biomass stock. For this, a total of 53 trees were selected in the area to carry out the rigorous cubage and 12 trees to quantify the biomass. In rigorous cubage, the analytical method was used through the Smalian procedure. With the data referring to the real volume, the total biomass, and the different compartments of the trees (leaves, branches, and stems), the equations were adjusted through regression analysis, in which 6 models were tested. To analyze tree growth as a function of meteorological variables, the sectional area was calculated (cm² tree⁻¹). With the climatic data and the increment in sectional area, calculated by subtracting the current measurement from the previous one, the multiple linear regression analysis was applied to estimate the growth rate of trees as a function of meteorological seasonality. The volumetric model with the best fit was the Schumacher-Hall model, with good fit indicators (R²_{aj} = 0.89 and Syx % = 9.74), in addition to a graphic distribution of residuals with no trend in the estimates, being valid for estimating the volume individually for the *C. brasiliense* population. Both for the estimation of total biomass and the plant compartments (leaves, branches, and stems), the best fit model was the Meyer model. The total volume obtained was 100 m³ ha⁻¹ and a mean annual increment for the stand of 10.3 m³ ha⁻¹ year⁻¹ at 9.8 years of age. It was observed that the growth of *C. brasiliense* trees was influenced by meteorological seasonality, and the variation in its growth was better correlated with the subset with the variables maximum and minimum temperature, potential evapotranspiration, actual evapotranspiration and water deficit. From a practical point of view, the study presents equations to be used in planted forests to estimate the volume and biomass of *C. brasiliense*, as well as evidence that future climate changes should affect its growth and production.

Keywords: rigorous cubing; regression analysis; climatic seasonality.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	12
2. REVISÃO DE LITERATURA.....	14
2.1 Características gerais da <i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess.....	14
2.2 Importância dos plantios florestais	15
2.3 Crescimento, incremento e produção florestal	17
2.4 Cubagem rigorosa.....	19
2.5 Biomassa florestal.....	20
2.6 Influência das variáveis climáticas no crescimento de plantas.....	22
3. MATERIAL E MÉTODOS	25
3.1 Caracterização da área de estudo.....	25
3.2 Obtenção de medidas dendrométricas	27
3.3 Seleção das árvores amostras	28
3.4 Coleta de dados da cubagem rigorosa e biomassa.....	28
3.5 Ajuste das equações de volume e biomassa	30
3.6 Incremento médio anual	32
3.7 Obtenção das variáveis meteorológicas.....	32
3.7.1 Déficit de pressão de vapor	33
3.7.2 Evapotranspiração Potencial.....	34
3.7.3 Balanço hídrico climatológico sequencial.....	35
3.7.4 Excesso e déficit hídrico.....	36
3.8 Análises estatísticas	37
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO.....	39
4.1 Equações volumétricas	39
4.2 Análise da biomassa	42
4.2.1 Estoque de Biomassa acima do solo.....	42
4.2.2 Equações de Biomassa.....	44

4.3 Produtividade da <i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess.	47
4.4 Influência das variáveis climáticas no crescimento da <i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess.....	49
5. CONCLUSÕES.....	55
6. REFERÊNCIAS.....	56

LISTA DE FIGURAS

Figura 1 – Plantio comercial de <i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess. aos 8,7 anos de idade, num espaçamento de 3 x 2 m no município de Igarassu, Pernambuco, Brasil.....	25
Figura 2 – Mapa de localização da área de estudo, município de Igarassu, Pernambuco, Brasil.	26
Figura 3 – Etapas de alguns dos processos para realização da cubagem rigorosa e obtenção da biomassa da <i>C. brasiliense</i> . A – Mensuração do fuste nas diferentes secções ao longo da árvore; B – Coleta e pesagem das folhas em campo; C – Pesagem dos galhos no campo; D – Pesagem do fuste no campo; E – Discos de aproximadamente 3 cm de espessura coletados nas diferentes alturas da árvore; F – Material na estufa para secagem.....	30
Figura 4 – Distribuição gráfica dos resíduos dos modelos testados para as estimativas do volume individual da <i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess.....	40
Figura 5 – Equação de melhor ajuste (Schumacher-Hall) com os valores observados e estimados para a <i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess em floresta plantada em Igarassu (PE)..	41
Figura 6 – Distribuição relativa da biomassa seca acima do solo entre os compartimentos em árvores de <i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess em floresta plantada no município de Igarassu – PE.....	43
Figura 7 – Distribuição gráfica dos resíduos dos modelos de melhor ajuste para estimar a biomassa seca total e dos diferentes compartimentos de <i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess em floresta plantada em Igarassu-PE.	46
Figura 8 – Crescimento da área da seção transversal do fuste acumulado (A) e atual (B) de <i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess, balanço hídrico sequencial (C), temperatura e déficit de pressão de vapor (D) e precipitação e evapotranspiração (E) (de cima para baixo) em Igarassu – PE.....	50
Figura 9 – Distribuição gráfica dos resíduos dos melhores subconjuntos para estimar a variação do Incremento da Área Secção Transversal do Tronco (IASTT) mensal de <i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess em floresta plantada em Igarassu-PE.....	52

LISTA DE TABELAS

Tabela 1 – Caracterização dos atributos químicos do solo na camada de 0-20 cm da área de estudo.....	27
Tabela 2 – Determinação do número de árvores para a realização da cubagem rigorosa e biomassa em floresta plantada de <i>C. brasiliense</i> em Igarassu, Pernambuco.....	28
Tabela 3 – Modelos matemáticos para estimativa do volume individual e da biomassa seca da <i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess em plantio homogêneo em Igarassu-PE.....	31
Tabela 4 – Estimativas dos parâmetros das equações testadas para estimar o volume individual da <i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess em floresta plantada em Igarassu-PE.	39
Tabela 5 – Valores médios de biomassa seca total e nos diferentes compartimentos (Folhas, Galhos e Fuste), seguido do desvio padrão, coeficiente de variação (CV%), peso Máximo e Mínimo em árvores de <i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess em floresta plantada em Igarassu – PE.....	43
Tabela 6 – Estimativas dos parâmetros das equações testadas para estimar a biomassa total e dos diferentes compartimentos (Folhas, Galhos e Fuste) em árvores de <i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess em floresta plantada em Igarassu-PE.	44
Tabela 7 – Estatística descritiva das variáveis dendrométricas DAP (cm), H (m) e Volume (m ³) do plantio comercial de <i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess em Igarassu (PE) aos 9,8 anos de idade.....	48
Tabela 8 – Estimativas dos parâmetros de regressão múltipla entre o crescimento da área da seção transversal do tronco versus dados climáticos e índices estatísticos da <i>Calophyllum brasiliense</i> Cambess em floresta plantada no município de Igarassu (PE).	51

1. INTRODUÇÃO

A seleção de espécies é uma das decisões-chave na formação de povoamentos puros equiâneos (Nyland, 2003). No Brasil, os gêneros *Eucalyptus* e *Pinus* predominam com 94% da área plantada de 10 milhões de hectares. Outros gêneros têm surgido como alternativas principalmente para a produção de madeira sólida e para a produção de móveis como as espécies dos gêneros *Tectona*, *Khaya*, *Toona* e o *Schizolobium*.

A *Calophyllum brasiliense* Cambess., também vem sendo apontada como alternativa para formação de povoamentos puros. Ela é uma espécie arbórea da família Clusiaceae (antiga Guttiferae), conhecida popularmente como Guanandi ou Landi, apresenta ocorrência natural desde a América Central (18° N) até a América do Sul (28° 10' S). No Brasil, é encontrada na Amazônia, no Cerrado e na Mata Atlântica (SILVA et al., 2018). Essa espécie é considerada economicamente promissora em florestas plantadas principalmente pela sua madeira altamente resistente e durável, muito utilizada na construção civil, marcenaria (móveis finos) e construção naval (DUFFECKY; FOSSATI, 2009). No Brasil, aparece como alternativa à Teca e outras espécies como madeira nobre para a indústria moveleira (URZEDO et al., 2013).

No entanto, a *Calophyllum brasiliense* tem sido estudada na fase de mudas (HOLL et al., 1998, PEREIRA et al., 2017) ou em relação às suas características bioquímicas pelo fato de ter características antioxidantes (CISNEROS-TORRES et al., 2020) e até mesmo compostos farmacológicos relacionados ao vírus HIV (GOMEZ-VERJAN et al., 2019), mas com raros trabalhos reportando aspectos quanto ao seu estoque de crescimento em biomassa e a influência de variáveis climáticas em povoamentos puros equiâneos desta espécie.

A estimativa de volume e estoque de biomassa e carbono de árvores e do povoamento consiste nas etapas fundamentais no planejamento do manejo de florestas plantadas, sendo de grande importância a aplicação de metodologias que possam gerar estimativas precisas e confiáveis dessas variáveis dendrométricas. Indiretamente, o volume e a biomassa podem ser obtidos a partir de equações alométricas, derivadas de análises de regressão. Esses modelos matemáticos surgem como uma alternativa prática e de baixo custo para obter estimativas precisas dessas variáveis.

É importante destacar, que entre as principais responsáveis pelas variações de produção em povoamentos florestais durante o ciclo de corte estão as variáveis climáticas (precipitação, temperatura do ar, umidade, radiação solar, fotoperíodo e vento) (BINKLEY et al., 2020), que além de ter uma influência direta no crescimento e produtividade futura dos plantios, podem levar à ocorrência de pragas e doenças (CORDEIRO; SCHWARTZ; BARROS, 2020). A

temperatura do ar e a precipitação são as variáveis climáticas que apresentam maior influência no crescimento diamétrico de várias espécies de clima temperado e subtropical, além de clima tropical (MARTINKOSKI; VOGEL; JADOSKI, 2015). Assim, entender a interação desses fatores naturais com o crescimento da *C. brasiliense* em florestas plantadas é fundamental para o sucesso de seu plantio.

Não há registro de estudos que abordem os efeitos dos elementos climáticos em condições de plantio da *C. brasiliense*, em especial na região Nordeste do Brasil, sendo estes fundamentais para o melhor entendimento de como essa espécie se desenvolve em função das condições do meio à qual está inserida, como também são importantes para auxiliar no planejamento das atividades silviculturais de futuros plantios nesta região.

Diante do exposto, o presente estudo tem como objetivos ajustar equações alométricas para estimar o volume e a biomassa da *Calophyllum brasiliense* Cambess (Guanandi), além de avaliar a produtividade e a influência da sazonalidade meteorológica no seu crescimento em floresta plantada em Igarassu, Pernambuco, Brasil. E como hipótese se considerou: a variação no crescimento da *Calophyllum brasiliense* corresponderá a sazonalidade das variáveis meteorológicas e será influenciada principalmente pelas variáveis precipitação e temperatura.

2. REVISÃO DE LITERATURA

2.1 Características gerais da *Calophyllum brasiliense* Cambess.

A *Calophyllum brasiliense* Cambess é uma espécie arbórea da família Clusiaceae (antiga Guttiferae) conhecido popularmente como guanandi ou landi, apresenta ocorrência natural generalizada e padrões de variação genética adaptativa (PATREZE et al., 2012), ocorrendo desde a América Central (18° N) até a América do Sul (28° 10' S). No Brasil, é encontrada na Amazônia, no Cerrado e na Mata Atlântica (SILVA et al, 2018).

A espécie ocorre naturalmente em locais com precipitação, variando de 1.400 mm a 3.500 mm, altitude de até 1.500m e temperaturas entre 20° e 28°C (CIDRÃO, 2012). Em geral, os indivíduos de *C. brasiliense* se desenvolvem bem em solos aluviais com baixa drenagem, úmidos, periodicamente inundáveis e ácidos (pH 4,5 a 6,0) (CARVALHO, 2003; SOUZA et al., 2007).

A *C. brasiliense* apresenta crescimento monopodial, o que proporciona fustes bem definidos para suas plantas. Em plantios comerciais, seus indivíduos podem alcançar 40 metros de altura e diâmetro de até 60 cm, o ponto de corte em geral para a espécie é atingido com cerca de 18 anos (CARVALHO 1994; CIDRÃO, 2012). É considerada uma espécie heliófila com grande agressividade sobre a vegetação brejosa mais esparsa. No entanto, durante sua fase juvenil, necessita de sombreamento moderado, apresentando regeneração natural abundante na sombra (CARVALHO, 2003).

Conforme os padrões de comportamento supracitados se pode inferir que a espécie pertence ao grupo sucessional das secundárias tardias ou clímax, podendo se comportar como pioneira de influência fluvial em algumas regiões. Assim, teoricamente pode-se afirmar que ela apresenta condições propícias de se regenerar e se desenvolver sob o dossel florestal, mesmo que lentamente (CARVALHO, 2003; CIRIELLO, 2010).

A importância da *C. brasiliense* para o Brasil é notória desde o período regencial, em 1810, o Governo Federal do Brasil reservou para o estado o corte exclusivo da espécie para construção de mastros e vergas de navios das frotas portuguesa e inglesa. Em 1835, um novo decreto visando regulamentar o corte das matas nativas, classificou esta árvore como uma das primeiras “madeiras de lei” do país (LORENZI, 1992; CARVALHO, 2003).

É importante destacar que essa espécie é considerada economicamente promissora para o setor florestal brasileiro, principalmente pela sua madeira altamente resistente e durável, muito utilizada na construção civil, marcenaria (móveis finos) e construção naval

(DUFFECKY; FOSSATI, 2009). Além disso, a madeira da *C. brasiliense* apresenta características que se assemelham a do cedro e do mogno, substituindo comercialmente tais espécies em alguns países da América Latina e Central (CIDRÃO, 2012). No Brasil, aparece como alternativa à Teca como madeira nobre para a indústria moveleira (URZEDO et al., 2013).

Considerando o alto potencial econômico da *C. brasiliense*, a espécie já é cultivada em plantios comerciais puros em diferentes países, principalmente na América Latina. Navarro (2007), discutindo sobre as condições de crescimento e produtividade das plantações experimentais da *C. brasiliense* na Costa Rica, observou manutenção das taxas iniciais de crescimento em plantios com 7 anos de idade, apresentando incremento médio em diâmetro de 1,82 cm.ano⁻¹ e em altura de 1,4 m.ano⁻¹.

No Brasil, em 2003 plantios estabelecidos no município de Fernão, São Paulo, pela empresa Flora Reflorestadora Ltda. avaliados aos 5 anos, apresentaram indivíduos com fuste eretos, florescimento e frutificação precoce, e médias de 6 e 7 m de altura e 8 e 9 cm de diâmetro a 1,30 m do solo (DAP) (CIRIELLO, 2010). Já Silva et al. (2019), estudando um plantio de *C. brasiliense* com 7 anos, de propriedade da empresa JAMP Agropecuária e Reflorestadora Ltda., situada no município de Dueré, estado do Tocantins, observaram DAP com casca e altura variando de 3,50 a 12,10 cm e 2,87 m a 8,20 m, respectivamente. Os autores ainda destacaram incremento em diâmetro de 1,27 cm.ano⁻¹ e em altura de 0,88 m.ano⁻¹.

De acordo com Brenes e Montagnini (2006) a espécie apresenta melhor crescimento em povoamentos puros quando comparada a povoamentos mistos. No entanto, em sistema silvipastoril, na região Centro-Oeste do Brasil, a *C. brasiliense* apresentou boa sobrevivência e desenvolvimento inicial em campo (GASPAROTTO et al, 2005), inferindo que existe potencial para seu uso em consórcios para a produção de produtos madeireiros (CIDRÃO, 2012). Já Lorenzi (1992) afirma que ela pode ser utilizada na recuperação de áreas degradadas, principalmente em matas ciliares devido à sua tolerância ao alagamento. Além disso, a espécie tem despertado grande interesse da indústria farmacêutica devido à sua composição química, apresentando, dentre outras, propriedades analgésicas, antiviral e anticancerígena (ISAÍAS et al., 2004; BERNABÉ-ANTONIO et al., 2010; GÓMEZ-VERJAN et al., 2019).

2.2 Importância dos plantios florestais

Cerca de 31% da área mundial (4,06 bilhões de hectares) é coberta por florestas, das quais estima-se que 93% sejam nativas e os outros 7% plantadas (FAO, 2020). Os produtos madeireiros extraídos das florestas estão presentes na rotina da humanidade desde os

primórdios, sendo empregada na construção civil, peças estruturais, extração da celulose e ainda, no aproveitamento do seu potencial energético (BRITO, 2007). Além dos produtos madeireiros, as florestas são responsáveis por disponibilizar diversos serviços para a sociedade, por exemplo: regulação do clima, sequestro de carbono, conservação do solo e conservação dos recursos hídricos (SFB, 2019).

De acordo com o relatório da Food and Agriculture Organization of the United Nations (FAO), mais de 1,6 milhões de pessoas, ou seja, cerca de 25% da população mundial dependem dos recursos florestais para sobrevivência (FAO, 2015). Considerando toda a população mundial, o consumo de madeira no mundo é de 3,5 bilhões de $m^3 \cdot ano^{-1}$, o que equivale a 875.000 km^2 de floresta plantada. Nesse contexto de crescente evolução na demanda por produtos florestais, assim como a necessidade de conservação e preservação, as florestas plantadas são consideradas a principal fonte sustentável de matéria-prima florestal e uma das mais promissoras soluções mitigadoras no enfrentamento à degradação ambiental (GUIMARÃES, 2013).

Para Bastin et al. (2019) cerca de 0,9 bilhões de hectares no mundo não utilizados estão aptos para plantio florestal, apenas no Brasil, os autores destacaram a existência de 49,7 milhões de hectares, o que coloca o país em quinto lugar no mundo com maior potencial de reflorestamento. A reinserção dessas áreas ao processo produtivo pode ser uma solução viável e eficaz para proporcionar ar e água limpos, sustentar meios de subsistência, conservar a biodiversidade e regular o clima (FAO, 2018).

Em 2020, a área total de árvores plantadas no país foi de 9,55 milhões de hectares. Entre as espécies, 78% da área é composta pelo cultivo de espécies do gênero *Eucalyptus* (7,47 milhões de hectares) e 18% do *Pinus* (1,7 milhão de hectares). Além desses cultivos, o setor conta com cerca de 382 mil hectares plantados de outras espécies, entre elas a seringueira (*Hevea brasiliensis*), teca (*Tectona grandis*) e paricá (*Schizolobium amazonicum*) (IBÁ, 2021).

O setor florestal no Brasil é responsável por uma parcela significativa da sua economia, principalmente em função da geração de impostos, fornecimento de produtos para consumo direto ou exportação, geração de novos empregos e também na preservação e conservação de recursos naturais (RIBASKI, 2018). Com uma vasta área de reflorestamento, o setor brasileiro de árvores plantadas está intimamente relacionado com o fortalecimento da economia nacional com um Produto Interno Bruto (PIB) de R\$ 97,4 bilhões, o equivalente a 1,2% do PIB nacional registrado em 2019 (IBÁ, 2020).

A crescente expansão dos plantios florestais torna essencial o emprego de uma gestão adequada para quantificar e prognosticar o seu estoque, visando garantir o fluxo contínuo de

produtos e serviços para suprir a demanda da indústria. Assim, a estimação do crescimento e da produção são ferramentas essenciais para fornecer informações que subsidiam a tomada de decisões para diversas atividades relacionadas ao setor, como por exemplo, definir a necessidade e o momento de desbastes, a rotação econômica ótima, o regime de manejo ideal para cada sítio, planejamento de colheitas, sempre direcionadas para elevar a quantidade, qualidade e valorização do produto almejado (ROMANIUK, 2015).

2.3 Crescimento, incremento e produção florestal

O crescimento de uma árvore consiste no alongamento e engrossamento das raízes, troncos e galhos, influenciando seu peso, volume e forma, produzido pela atividade fisiológica da planta (meristema primário e secundário ou cambial) (SCOLFORO, 1994).

Os termos crescimento, incremento e produção florestal descrevem vários aspectos da dinâmica de desenvolvimento de uma árvore ou floresta. Crescimento refere-se à mudança dimensional na variável de interesse (altura, diâmetro, volume, biomassa, carbono) da árvore. As diferenças numéricas entre essas medidas representam o crescimento (KOEHLER, 2009). O incremento refere-se ao quanto uma árvore cresce em um determinado período de tempo. Dessa forma, são necessárias medidas sucessivas a fim de se obter tal valor, considerando a mudança de tamanho no início e no fim do (s) período (s) analisado (s). Já a produção de uma floresta é o resultado do crescimento da árvore em tamanho, relativo à variável de interesse, acumulada até uma determinada idade ou período (KOEHLER, 2009).

Estudos florestais geralmente consideram o crescimento do tronco, avaliando-se, muitas vezes em conjunto, o crescimento primário (altura) e o crescimento secundário (diâmetro) (CARAGLIO; BARTHELEMY, 2003). O crescimento em altura produz-se pela atividade da gema apical ou terminal da planta, por meio da divisão celular (ENCINAS; SILVA; PINTO, 2005). Já o crescimento em diâmetro se refere ao aumento do diâmetro de uma árvore em um determinado período de tempo. Em geral, primeiro a árvore cresce mais em altura e depois em diâmetro (ENCINAS; ENCINAS, 2008).

Além do crescimento em altura e em diâmetro, é importante destacar uma das principais variáveis para o conhecimento do potencial florestal disponível em uma região, o volume (SOUZA; SOARES, 2013). De acordo com Schneider e Schneider (2006), o volume é o resultado do incremento acumulado em um determinado período de tempo, cuja quantidade depende da espécie, sítio, idade, rotação e do sistema de manejo empregado.

As estimativas volumétricas dos troncos das árvores muitas vezes podem acarretar erros, como consequência da grande variação das formas dos troncos entre espécies e até dentro de uma mesma espécie (SANQUETTA et al., 2009). No entanto, visando reduzir tais erros, foram desenvolvidos métodos (diretos e indiretos) para a estimação de volume.

Os métodos diretos consistem em medir o volume real da árvore em campo. Dentre os principais métodos diretos, destacam-se: o princípio do xilômetro, volume de Francon (ou 4º reduzido) e a cubagem rigorosa (CAMPOS; LEITE, 2013). Com relação aos métodos indiretos, basicamente existem três (3) metodologias para estimar o volume comercial de árvores individuais de forma indireta, que são: os fatores de forma, função de afilamento e os modelos volumétricos (SCHRÖDER et al., 2013; MIRANDA et al., 2015).

A principal metodologia para estimar o volume de árvores em pé indiretamente são as equações volumétricas, derivadas de análises de regressão (CORDEIRO et al., 2015; MIRANDA et al., 2015). Os modelos matemáticos baseados em dados biométricos surgem como uma alternativa prática e de baixo custo para obter estimativas de volume (TASHI et al., 2017).

Em geral, estes modelos relacionam variáveis obtidas no inventário florestal (diâmetro e altura da árvore) (LIMA et al., 2017) com o volume ou biomassa (PETROKOFISKY et al., 2012; MBOW et al., 2014). Dentro os mais variados modelos para estimar volume de madeira em função de variáveis dendrométricas, o de Schumacher e Hall é um dos mais utilizados na área florestal, pois as suas propriedades estatísticas no geral proporcionam resultados quase sempre não tendenciosos (LEITE et al., 2002; CAMPOS et al., 2013).

Com relação ao incremento, Burger (1980) o descreve como o acréscimo de um elemento (diâmetro, altura, peso) dentro de um determinado intervalo de tempo. De acordo com o autor, esta variável pode ter diferentes abordagens:

- ICA – incremento corrente anual, ou seja, o incremento no intervalo de um ano qualquer;
- IP – incremento periódico, ou seja, o incremento em determinado período;
- IPA – incremento periódico anual, ou seja, o incremento médio durante um determinado período de anos;
- IMA – incremento médio anual, isto é, incremento médio anual a partir da idade 0 (zero) até uma determinada idade.

Já a rotação de máxima produção volumétrica é o ponto de cruzamento entre as curvas de IMA (obtido por meio da divisão do valor de produção pela idade do plantio) e ICA (obtido por meio da subtração da produção atual pela produção passada) (SOUZA; SOARES, 2013).

Nesse sentido, o conhecimento do crescimento e da produção de uma floresta é fundamental para subsidiar as decisões relacionadas ao manejo florestal, além de permitir a comparação da produtividade em diferentes sítios.

Na literatura são encontrados inúmeros modelos de crescimento e produção, variando desde expressões simples que simulam a produção por unidade de área em função da idade, sítio e densidade do povoamento, até complexos sistemas de equações que expressam o crescimento individual das árvores de um povoamento, em função de suas próprias características e de árvores vizinhas, inclusive considerando a distância entre estas (CLUTTER et al., 1983). É válido destacar que a estimação dessas variáveis representa uma condição essencial para determinar a utilização adequada da matéria-prima advinda da floresta, e fornecer informações que subsidiam a tomada de decisão para grande parte das atividades ligadas ao manejo florestal (ABREU, 2000).

2.4 Cubagem rigorosa

A cubagem rigorosa consiste na determinação do volume de sucessivas seções ao longo do fuste de uma árvore e é o método direto mais seguro utilizado na rotina de inventário florestal para estimar o volume de árvores do povoamento (CABACINHA et al., 2013). A cubagem rigorosa pode ser empregada para ajuste de equações volumétricas, cálculo do fator de forma, ajuste de funções de afilamento para estimar volume, sortimento e fatores de conversão para o mercado de trabalho, como por exemplo: o peso da madeira (BELCHIOR, 1996).

Na cubagem rigorosa, a árvore é dividida em seções de comprimento igual ou não, o volume para cada seção é calculado através de fórmulas geométricas, posteriormente por meio da adição destas partes, o volume da árvore é obtido (FAO, 1981). É importante destacar a necessidade de cubicar um número mínimo de árvores para caracterizar a variância dentro de cada classe diamétrica (SOARES et al., 2006). Além disso, as medições diamétricas podem ser feitas a 0,30; 1,30; 3,30; 5,30 e assim sucessivamente, de 2 em 2 metros, no entanto, tais distâncias podem ser alteradas em função da forma e da rigorosidade do processo de cubagem (GOMES, 1957).

Em trabalho com aplicação de cubagem rigorosa para *Eucalyptus* e *Pinus*, Scolforo (1998) comenta que o comprimento da seção deve ser definido a fim de controlar ao máximo o efeito da conicidade, e recomenda para os gêneros estudados os pontos de medições de diâmetros na tora a 0,05; 0,7; 1,30 e 2,30m com seções entre 1 e 2 metros. Já para árvores em

florestas nativas, Scolforo et al. (1994) estabeleceram medições de diâmetros a 0,30; 0,70; 1,30; 2,00 e assim sucessivamente, de metro em metro, até a altura desejada para a cubagem.

A cubagem rigorosa pode ser realizada pelo método destrutivo (derrubada da árvore) ou pelo não-destrutivo (árvore em pé). Sendo que para o último caso, os dados podem ser coletados por meio da escalada da árvore, ou com o emprego de instrumentos como: o telerelescópio, relascópio, dendrômetro óptico ou o pentaprisma (LACHINI, 2012).

Os métodos de cubagem rigorosa são divididos em absolutos e relativos. Nos métodos absolutos, o comprimento da seção não apresenta vínculo com o comprimento total da árvore. Já nos métodos relativos, o comprimento da seção representa um percentual do comprimento total da árvore, permitindo a comparação dos volumes individuais de árvores de tamanho diferente, porém com a mesma forma (CABACINHA, 2003).

As principais metodologias empregadas na cubagem rigorosa seguem o princípio dos métodos absolutos, são elas, a de Smalian, Huber e a de Newton (THIERSCH, 2002). Dentre essas, a de Smalian é considerada a mais utilizada, principalmente devido à facilidade de aplicação (OUNEKHAM, 2009).

A fórmula de Smalian requer medidas que consistem na medição dos diâmetros ou circunferências nas extremidades de cada seção do tronco (base e topo). Em geral as pesquisas desenvolvidas nesta área da dendrometria consideram como padrão o volume obtido por Smalian, dividindo-o à árvore em seções bastante curtas - 20, 30 cm, etc (MACHADO; FIGUEIREDO FILHO, 2006). No entanto, embora seja de fácil aplicação, a precisão desse método decresce consideravelmente quando comparada com as fórmulas de Huber e Newton, se a forma da seção mensurada não se assemelha a de um parabolóide (LEITE, 2008).

Um fator importante que deve ser considerado no processo de cubagem rigorosa é a grande variação da forma das árvores, variando com a espécie, o espaçamento, a idade, o sítio e os tratamentos silviculturais, sendo essencial avaliar a adequação dos métodos para cada região, considerando as características de cada povoamento (SCOLFORO; FIGUEIREDO FILHO, 1993).

2.5 Biomassa florestal

As plantas, por meio do processo de fotossíntese, conseguem capturar a energia transmitida pelo sol e transformá-la em energia química. Essa energia posteriormente é convertida em eletricidade, combustível ou calor. As fontes orgânicas que são responsáveis pela produção de energia pela fotossíntese são chamadas de biomassa (BROWN, 1997).

A biomassa é composta principalmente por carbono, mas não se resume apenas a ele, sendo também expressa por diversos elementos químicos que integram a estrutura orgânica das plantas como hidrogênio e oxigênio, e ainda os macros e micronutrientes (MALAVOLTA, 1980). Nesse sentido, a biomassa florestal engloba todo o material orgânico produzido por povoamentos naturais ou plantados, ou seja, todas as partes que compõem a parte aérea das árvores (fuste, casca, folhas, galhos, frutos e flores) ou subterrânea (raízes). Quando se considera apenas o carbono de origem vegetal, Sanquetta (2002) utiliza o conceito fitomassa.

A biomassa florestal pode ser expressa também como massa verde ou massa seca. Sendo a massa verde todo o material fresco amostrado, ou seja, contendo uma significativa proporção de água; já a massa seca, refere-se à biomassa obtida após secagem do material em estufa (CALDEIRA, 2003).

A biomassa está diretamente relacionada à estrutura da vegetação, conseqüentemente, determina a taxa e magnitude de respiração autotrófica, influencia na biodiversidade e, ainda, define a densidade da biomassa. É importante destacar sua influência na quantidade de carbono emitido na atmosfera (CO_2 , CO e CH_4), a partir de modificações antrópicas ou naturais nos ecossistemas que resultam na sua morte ou queima (HOUGHTON et al., 2009).

Considerando a importância da biomassa, as mudanças climáticas e, principalmente o crescimento expressivo do mercado de carbono, atualmente é crescente a demanda por técnicas adequadas de quantificação de biomassa florestal confiáveis e com baixo custo (NICOLETTI; SILVA; FLORIANI, 2015). No geral, estudos de quantificação de biomassa são considerados trabalhosos, demorados e onerosos, esses podem ser realizados por métodos diretos e indiretos (WATZLAWICK; KIRCHNER; SANQUETTA, 2009).

Os métodos diretos consistem na pesagem de toda a biomassa ou determinação do volume e densidade da madeira. Tal método apresenta alto grau de precisão, mas envolve amostragem destrutiva, tornando muitas vezes inviável sua aplicação em grandes áreas (LIMA JÚNIOR et al., 2014; SANQUETTA et al., 2014). Já as medições indiretas são uma alternativa para reduzir o impacto ambiental e o custo financeiro, podendo ser realizadas a partir de imagens de satélite e de equações alométricas (LIMA JÚNIOR et al., 2014). São chamadas equações alométricas as equações de regressão constituídas do carbono (C) ou biomassa como variável dependente e variáveis dendrométricas como independentes (SOARES; TOMÉ, 2004).

Os modelos de regressão usados nos métodos indiretos de estimativas de biomassa relacionam a biomassa ou carbono (variáveis de difícil obtenção), com variáveis comumente medidas em campo (altura e diâmetro) (SANQUETTA et al., 2014). Em geral, elas são recomendadas, pois oferecem predições diretas de carbono e biomassa. Entretanto, é importante

destacar que tais modelos devem ser ajustados a uma base de dados primária e, sempre que possível, desenvolvidas para cada local de estudo (BROWN, 1997; SANQUETTA et al., 2014).

Os ajustes dos modelos podem ser realizados para toda a árvore ou individualmente para cada parte (raiz, folha, galho ou fuste), o que é definido a partir do nível de informações que o pesquisador deseja obter. A escolha dos modelos matemáticos a serem empregados deve considerar o local onde foram desenvolvidos, as espécies trabalhadas, as classes de tamanho, a idade, e, ainda, informações sobre os erros das estimativas, nível de amostragem e outros parâmetros (SOMOGYI et al., 2006).

2.6 Influência das variáveis climáticas no crescimento de plantas

É definido o crescimento de uma árvore como o aumento gradual de camadas celulares nas suas raízes, tronco e galhos, como resposta não apenas ao processo natural da vida, mas também influenciado pelo estímulo do ambiente, alterando o tamanho e forma da planta (ZANON; FINGER, 2010; MACHADO et al., 2014).

Para o planejamento das atividades silviculturais, é importante o conhecimento do crescimento de árvores nativas em plantações florestais, sendo o estudo do incremento diamétrico uma ferramenta importante, tendo em vista que a partir deste, pode-se inferir o crescimento diamétrico de uma floresta e/ou de uma determinada espécie no tempo (SCOLFORO, 1998; MACHADO et al., 2014).

São vários os fatores que influenciam o crescimento e produtividade final de plantios florestais, dentre estes, pode-se citar os genéticos, as condições de solo, o clima, sendo as variáveis climáticas como temperatura, radiação solar, umidade relativa e precipitação de maior influência devido às mudanças ocorridas durante o período de desenvolvimento das plantas, limitando o seu incremento. Assim, é fundamental aprimorar o conhecimento no prognóstico sobre o crescimento das plantas de acordo com as condições às quais estão dispostas (BAMBERG, 2014).

Inúmeros são os fatores que regulam o desenvolvimento de plantas, tanto bióticos como abióticos, dentre estes pode-se citar a luz, a temperatura do ar, a umidade, a precipitação, o espaço físico, os fatores edáficos, topográficos, genéticos, os fatores relacionados à competição, a exemplo, o espaçamento de plantio (OLIVEIRA et al., 2010). Estes fatores podem ser intrínsecos e extrínsecos, tendo variação não apenas entre espécies, mas as variações do ambiente, condições ecológicas, fatores do sítio etc., no entanto, o clima, principalmente a precipitação e temperatura, entre outros elementos meteorológicos, apresentam maior

influência sobre o incremento diamétrico de muitas espécies de clima temperado e subtropical, em muitos casos no crescimento de árvores de clima tropical (MARTINKOSKI; VOGEL; JADOSKI, 2015).

Em estudo com a *Araucaria angustifolia*, Zanon e Finger (2010), observaram que as variáveis meteorológicas, como temperatura e precipitação, apresentaram correlação direta com seu incremento em diâmetro. Além disso, foi visto que estas variáveis tiveram influência positiva no incremento médio anual desta espécie, sendo que o incremento foi bastante reduzido nos meses em que as chuvas foram abaixo da média durante o verão, isto porque à medida que o solo vai secando devido ao período de menor pluviosidade, há restrição dos processos fisiológicos.

Efeitos diretos e indiretos relacionados à deficiência de água no crescimento de plantas, como a relação da disponibilidade hídrica do solo, afetarão a produtividade florestal (SOUZA et al., 2006). Neste sentido, estudando mudas de Mogno sob estresse hídrico, Lima et al. (2007) analisaram redução drástica na transpiração e condutância estomática, e citam que quando a evapotranspiração das plantas é maior do que a quantidade de água absorvida, há o fechamento estomático, conseqüentemente, há redução no crescimento.

Estudando duas espécies em Campina Grande do Sul e em Curitiba, Paraná, dentre estas o *Pinus taeda*, foi observada correlação positiva entre a temperatura e o incremento diamétrico e em altura (MACHADO et al., 2014). Já Figueiredo Filho et al. (2008), em estudo avaliando o incremento por meio de cinta dendrométrica, com *A. angustifolia* em São João do Triunfo, Paraná, observaram alta correlação entre o crescimento desta espécie e a temperatura do ar.

Por causar estresse abiótico, conseqüentemente danos às plantas, assim podendo interromper o crescimento de forma temporária ou permanente, as temperaturas máximas e mínimas são de interesse (LANDSBERG; SANDS, 2011). De acordo com os mesmos autores, a temperatura é determinante para as taxas de processos metabólicos, conseqüentemente o crescimento das árvores, principalmente no balanço do carbono, por meio da regulação da fotossíntese e respiração celular, afetando o balanço hídrico na planta, induzindo ao estresse hídrico e perda de turgescência, além de que temperaturas extremas podem causar danos às folhas.

Em estudo realizado em diferentes condições meteorológicas no centro sul do Brasil com diferentes espécies, tanto exóticas como *Eucalyptus* e *Pinus*, como várias espécies nativas, foi observado que as temperaturas máximas e mínimas do ar foram relacionadas ao crescimento do fuste das espécies em todos os locais estudados (CAMPOE et al., 2016).

Outra variável que pode ter importante influência no crescimento de plantas é o déficit de pressão de vapor, visto que o vapor de água no ar é determinante em relação à perda de água pelas folhas para a atmosfera a partir dos estômatos, através da transpiração. Essa transpiração é estimulada principalmente através do gradiente de pressão de vapor de água entre as folhas e o ar (LANDSBERG; SANDS, 2011).

As taxas de transpiração em florestas têm grande influência do déficit de pressão de vapor de água no ar, principalmente quando a variação de temperatura e umidade é baixa, e essa transpiração é diretamente controlada pelos estômatos e o vapor de água no ar através da interação das folhas e o ar. A transpiração e a pressão de vapor d'água irão influenciar a condutância superficial da folha, e com o aumento do déficit de pressão de vapor d'água entre a folha e o ar, ocorre o fechamento parcial dos estômatos, podendo influenciar no crescimento (ANDERSSON, 2005).

Em estudo com várias espécies e em diferentes condições meteorológicas, Campoe et al. (2016) observaram que o déficit de pressão de vapor foi a única variável meteorológica que afetou negativamente o crescimento em todos os locais e espécies estudadas, pois o impacto negativo do déficit de pressão de vapor na condutância estomática diminuiu a absorção de CO₂ e, como consequência, reduziu a produção de carboidratos e o crescimento do fuste.

É fundamental que haja estudos voltados com o foco na modelagem florestal, principalmente aqueles que incluam fatores ambientais como variáveis independentes, aliados ao fato que pouco se conhece sobre o crescimento mensal de indivíduos, assim, pesquisas dessa natureza, envolvendo a relação do incremento mensal com variáveis climáticas, são de grande relevância, tendo em vista que estes são raros ou até mesmo inéditos, especialmente para espécies de alto valor comercial e científico (MACHADO et al., 2014).

Araújo et al. (2014) mencionam que estudos avaliando o crescimento em função do regime climático em locais onde o potencial produtivo é desconhecido tem grande relevância, pois podem auxiliar em tomadas de decisões sobre os locais de maior adaptação e desempenho da espécie para o planejamento de futuros plantios florestais. Além do mais, no contexto da região nordeste, que poderá sofrer impacto significativo na produção florestal devido às mudanças climáticas, denotando assim, ainda mais a importância desse tipo de pesquisa para essa região.

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Caracterização da área de estudo

O presente estudo foi realizado em um plantio comercial de 2,5 hectares da espécie *Calophyllum brasiliense* Cambess (Figura 1), implantado em maio de 2012.



Figura 1 – Plantio comercial de *Calophyllum brasiliense* Cambess. aos 8,7 anos de idade, num espaçamento de 3 x 2 m no município de Igarassu, Pernambuco, Brasil.

A área de estudo localizada no município de Igarassu – PE, apresenta altitude aproximada de 19,0 metros e está situada nas coordenadas geográficas 7° 53'18'' de latitude sul e 34° 59' 25'' de longitude oeste (Figura 2).

O clima da região é tropical quente e úmido (As' de Köppen), a precipitação média anual é de 1.634,2 mm e temperatura média anual de 24,9 °C, com o período chuvoso iniciando em fevereiro e terminando em outubro. O seu relevo pertence ao grupo da unidade dos Tabuleiros Costeiros que acompanha o litoral de todo o Nordeste (CPRM, 2005).

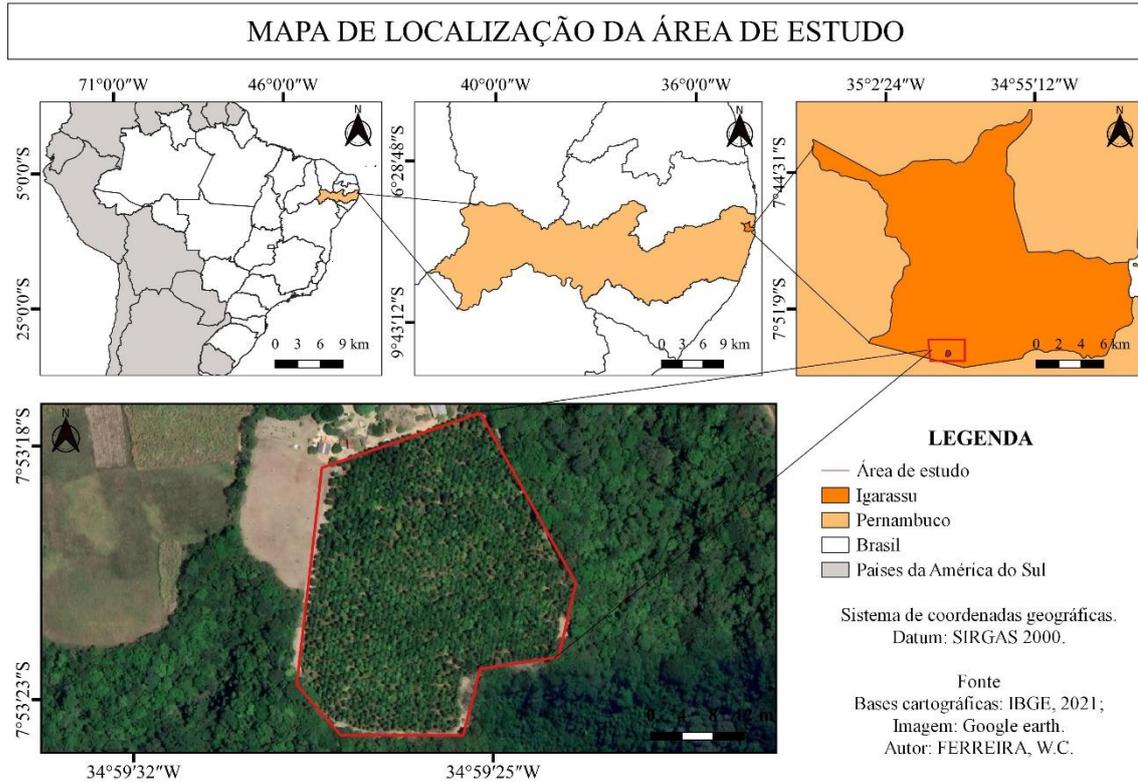


Figura 2 – Mapa de localização da área de estudo, município de Igarassu, Pernambuco, Brasil.

Antes da realização do plantio com *C. brasiliense*, existia na área uma plantação de cana-de-açúcar. A implantação das mudas de *C. brasiliense* ocorreu em maio de 2012. Para a realização do plantio, foram utilizadas sementes compradas da empresa Vasconcelos Florestal localizada no estado de São Paulo. As mudas foram produzidas no município de Igarassu-PE.

Para o plantio das mudas, foi feita a limpeza e preparo do solo através da aração da camada superficial até 30 cm de profundidade, além disso, foi realizada a correção do solo com calcário dolomítico ($2,6 \text{ t ha}^{-1}$) e aplicação de adubação fosfatada com superfosfato simples (1 t ha^{-1}). No plantio das mudas foi realizada a abertura de covas de $40 \times 40 \times 40 \text{ cm}$ num espaçamento de $3 \times 2 \text{ m}$ e adicionado esterco bovino aproximadamente 10 litros por cova.

Foram realizadas capinas sempre que necessário até o quinto ano para eliminar as plantas daninhas e não prejudicar o crescimento das mudas, além de outros tratamentos silviculturais como o controle de formigas e cupins. Foi realizada irrigação manual até o terceiro ano de plantio, além de adubação química do solo anual com NPK 4-14-8 até o sexto ano de plantio. Além disso, foi feito desbaste de cerca de 20% das árvores em junho de 2019. Foi coletado solo no mês de outubro no ano de 2021 para análise química. De acordo com a análise, o solo possui fertilidade natural baixa e alta acidez (Tabela 1).

Tabela 1 – Caracterização dos atributos químicos do solo na camada de 0-20 cm da área de estudo.

Variáveis	Unidade	Resultado
pH	Água	5,44
P	mg.dm ⁻³	4,22
K ⁺	Cmol _c .dm ⁻³	0,04
Na ⁺	Cmol _c .dm ⁻³	0,13
Ca ²⁺	Cmol _c .dm ⁻³	3,25
Mg ²⁺	Cmol _c .dm ⁻³	0,00
Al ³⁺	Cmol _c .dm ⁻³	0,29
H+al	Cmol _c .dm ⁻³	7,57
S	Cmol _c .dm ⁻³	3,42
t	Cmol _c .dm ⁻³	3,71
T	Cmol _c .dm ⁻³	10,99
V	%	31,12
m	%	7,82

Em que: pH: potencial hidrogeniônico; P: fósforo; K⁺: potássio; Na⁺: sódio; Ca²⁺: cálcio; Mg²⁺: magnésio; Al³⁺: alumínio; S: soma de bases trocáveis; t: capacidade de troca de cátions efetiva; T: capacidade de troca de cátions total; V%: saturação por bases; m%: saturação por alumínio.

3.2 Obtenção de medidas dendrométricas

Para análise do crescimento e produtividade, foram realizadas medições de fevereiro de 2021 a fevereiro de 2022. Foram alocadas parcelas permanentes de forma aleatória na área de estudo, onde foi possível a realização das avaliações ao longo do tempo. Para definir a intensidade da amostra necessária, foi feito inicialmente o inventário piloto, onde foram alocadas oito parcelas na área experimental. Para analisar a suficiência amostral, foi feito o cálculo do erro amostral, sendo adotado um erro admissível de 10 % a um nível de probabilidade de 95 %.

Com uma trena, foram demarcadas parcelas de 400 m² (20m x 20m) para medição da altura e diâmetro das árvores. O método utilizado foi o de área fixa e o processo de amostragem o casual simples, em que as parcelas foram sorteadas ao acaso na área de estudo. Foram mensurados o diâmetro a 1,30m do solo (DAP, em centímetros) de todos os indivíduos da parcela e altura total (H em metros). Para tal, foi utilizada uma suta para medição do DAP e um hipsômetro Haglöf para a obtenção da altura total.

3.3 Seleção das árvores amostras

Para atender aos objetivos deste estudo, foram selecionadas na área um total de 53 árvores para realização da cubagem rigorosa e 12 árvores para quantificação da biomassa por meio do método destrutivo. Para a seleção das árvores amostrais, foi usado o critério da distribuição diamétrica por frequência de cada classe. O número de árvores para a cubagem rigorosa e biomassa foi proporcional à distribuição de frequência do povoamento por classe diamétrica (Tabela 2).

Tabela 2 – Determinação do número de árvores para a realização da cubagem rigorosa e biomassa em floresta plantada de *C. brasiliense* em Igarassu, Pernambuco.

Centro de Classe	FA	FR%	N° de árvores cubadas	N° de árvores da Biomassa
9,15	34	9	5	1
10,46	174	48	25	6
11,77	134	37	20	4
13,08	19	5	3	1
14,39	3	1	0	0
TOTAL	364	100	53	12

3.4 Coleta de dados da cubagem rigorosa e biomassa

Na cubagem rigorosa das árvores, foi empregado o método analítico por meio do procedimento de Smalian. Nesse procedimento, inicialmente mensurava-se o DAP para analisar a inclusão da árvore na classe diamétrica e posteriormente, após a derrubada, era feita a medição da altura total (H) com o auxílio de uma trena. Em seguida, media-se as circunferências do fuste nas alturas: 0=base, 0,30; 0,50; 0,70; 1,00; 1,30 m, após, a cada 1,0 metro até a ponta da árvore. O volume de cada seção foi obtido por meio da Equação 1 e o volume da ponta foi obtido pela fórmula do cone (Equação 2). O volume real de cada árvore foi obtido por meio da Equação 3.

$$v_i = \left(\frac{g_i + g_{i+1}}{2} \right) l \quad (1)$$

$$v_p = \frac{g_n l_p}{3} \quad (2)$$

$$V_T = \sum v_i + v_p \quad (3)$$

Em que: V_T = Volume total por árvore (m^3); g = área transversal calculada (m^2) a partir de $g = \frac{\pi d^2}{40.000}$, sendo "d" o diâmetro da seção; v_i = volume da seção (m^3); v_p = volume da ponta (m^3); g_i = área transversal no início da seção (m^2); g_{i+1} = área transversal no fim da seção (m^2); g_n = área transversal na base da ponta (m^2); l_p = comprimento da ponta (m); l = comprimento da seção (m).

Como as árvores selecionadas para a biomassa também fizeram parte das usadas para a cubagem, inicialmente, após o abate, se realizava a cubagem rigorosa (Figura 3A).

Para análise da biomassa, após a derrubada das árvores, foram retirados e pesados separadamente todos os compartimentos das árvores (fuste, galhos e folhas) para obtenção do seu peso úmido total em campo com uma balança com capacidade máxima de 100,0 kg e precisão de 0,1 kg (Figura 3B, 3C, 3D). Em seguida, foram retiradas amostras de 0,3 kg de folhas e galhos para posterior determinação do seu peso seco. Todas as amostras foram acondicionadas em sacos de papel, identificadas e levadas ao laboratório de tecnologia da madeira da Universidade Federal Rural de Pernambuco (UFRPE).

Para o fuste, retirou-se amostras de discos de madeira com casca de aproximadamente 3,0 cm de espessura para posterior determinação da biomassa seca. Foram retirados discos em diferentes alturas, no DAP, na base (0% da altura do fuste), e a 25%, 50%, 75% e 100% (diâmetro de 2 cm) da altura total do fuste (Figura 3E). Cada disco teve seu peso verde medido no campo com balança de precisão de 0,1 kg.

Para a determinação da biomassa seca, foi determinado o peso seco das amostras (folhas, galhos, discos) por meio de secagem em estufa de renovação e circulação forçada de ar a uma temperatura de 65°C (Figura 3F) até atingir o seu peso constante (diferença menor que 0,5 g de uma medição para outra).



Figura 3 – Etapas de alguns dos processos para realização da cubagem rigorosa e obtenção da biomassa da *C. brasiliense*. A – Mensuração do fuste nas diferentes secções ao longo da árvore; B – Coleta e pesagem das folhas em campo; C – Pesagem dos galhos no campo; D – Pesagem do fuste no campo; E – Discos de aproximadamente 3 cm de espessura coletados nas diferentes alturas da árvore; F – Material na estufa para secagem.

A biomassa seca do tronco das árvores com casca, como dos galhos e folhas, foi obtida por meio da Equação 4.

$$B_i = \frac{Pu(c) * Ps(a)}{Pu(a)} \quad (4)$$

Em que: i = o índice que se refere à árvore; B_i = a biomassa de folhas, galhos ou tronco (kg); $Pu(c)$ = Peso úmido total em campo (kg); $Ps(a)$ = Peso seco da amostra (kg); $Pu(a)$ = Peso úmido da amostra (kg).

3.5 Ajuste das equações de volume e biomassa

Após obter os dados referentes ao volume real, da biomassa total e dos diferentes compartimentos das árvores (folhas, galhos e fuste), foi feito o ajuste das equações por meio da

análise de regressão, em que foi usado como variável dependente o volume individual (V_i) ou a biomassa total (B_i) e as variáveis independentes, o Diâmetro a 1,30m do solo (DAP) e a altura total (H) das árvores.

Para tanto, foram testados 6 modelos (Tabela 3), totalizando assim, 30 equações ajustadas. O ajuste dos modelos objetiva obter equações para estimar o volume individual e a biomassa seca total e de cada compartimento (variáveis dependentes) em função de variáveis de fácil obtenção (variáveis independentes).

Tabela 3 – Modelos matemáticos para estimativa do volume individual e da biomassa seca da *Calophyllum brasiliense* Cambess em plantio homogêneo em Igarassu-PE.

EQUAÇÃO	MODELO	AUTOR
1	$(V_i; B_i) = \beta_0 + \beta_1 \cdot DAP_i + \beta_2 \cdot DAP_i^2 + \beta_3 \cdot (DAP_i \cdot H_i) + \beta_4 \cdot (DAP_i^2 \cdot H_i) + \varepsilon_i$	Meyer
2	$(LnV_i; LnB_i) = \beta_0 + \beta_1 \cdot Ln(DAP_i) + \beta_2 \cdot Ln(H_i) + \varepsilon_i$	Schumacher-Hall
3	$(V_i; B_i) = \beta_0 + \beta_1 \cdot (DAP_i^2 \cdot H_i) + \varepsilon_i$	Spurr
4	$(V_i; B_i) = \beta_0 + \beta_1 \cdot DAP_i + \beta_2 \cdot (DAP_i^2 \cdot H_i) + \beta_3 \cdot H_i + \varepsilon_i$	Stoate
5	$(V_i; B_i) = \beta_0 + \beta_1 \cdot DAP_i + \beta_2 \cdot DAP_i^2 + \varepsilon_i$	Hohenadl-Krenn
6	$(V_i; B_i) = \beta_0 + \beta_1 \cdot (DAP_i^2 \cdot H_i) + \beta_2 \cdot (DAP_i \cdot H_i^2) + \beta_3 \cdot H_i^2 + \varepsilon_i$	Näslund

Em que: V_i = Volume (m^3) da i -ésima árvore; B_i = Biomassa seca total (kg) da i -ésima árvore ou i -ésimo compartimento da árvore; $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ = Coeficientes dos modelos; H_i = Altura total (m) da i -ésima árvore; DAP_i = Diâmetro a 1,30m do solo (cm) da i -ésima árvore; Ln = Logaritmo neperiano; ε_i = Erro de estimativa para i -ésima árvore.

A escolha das melhores equações para estimativa de volume e de biomassa com a base de dados em estudo, foi realizada com base no coeficiente de determinação ajustado (R_{aj}^2), que expressa a quantidade da variação explicada pela regressão, tendo em vista o número de coeficientes do modelo; no erro padrão da estimativa relativo ($S_{yx}\%$) e na análise gráfica dos resíduos ($E\%$), que verifica a presença de tendenciosidade nas estimativas, calculados pelas Equações 5, 6 e 7, respectivamente (CERQUEIRA et al., 2017). Foi verificada a significância dos modelos pelo cálculo do valor de F considerando um nível de significância ($\alpha = 0,05$).

$$R_{aj}^2 = 1 - \left(\frac{SQ_{res}}{SQ_{Tot}} \right) * \left(\frac{n-1}{n-p} \right) \quad (5)$$

$$S_{yx}\% = \frac{S_{yx}}{\bar{Y}} * 100 \quad (6)$$

$$E\% = \left(\frac{Y_i - \hat{Y}_i}{Y_i} \right) \quad (7)$$

Em que: SQ_{res} = soma de quadrados dos resíduos; SQ_{Tot} = soma de quadrados total; n = número de observações; p = número de coeficientes do modelo; S_{yx} = erro padrão da estimativa; \bar{Y} = média aritmética da variável dependente; Y_i = variável observada; \hat{Y}_i = variável estimada.

3.6 Incremento médio anual

A produção de volume de madeira para a *Calophyllum brasiliense* Cambess foi avaliada pela medida do DAP e da altura total (H) das árvores de oito parcelas permanentes instaladas na área de estudo. A partir do modelo que apresentou melhor ajuste foi obtido o volume.

Foi realizada a análise estatística descritiva (média, desvio padrão, erro padrão, coeficiente de variação, intervalo, mínimo e máximo) para as variáveis dendrométrica de altura total (H), DAP (cm) e volume individual (m³).

Com os dados do volume total, foi calculado o Incremento Médio Anual (IMA), expresso em m³ ha⁻¹ ano⁻¹, onde o cálculo é feito através da divisão do volume total por hectare e a idade atual do povoamento em anos (Equação 8).

$$IMA = \frac{V}{I} \quad (8)$$

Em que: V = Volume total (m³ ha⁻¹), na idade I ; I = Idade do povoamento.

3.7 Obtenção das variáveis meteorológicas

Os dados meteorológicos foram obtidos da *National Aeronautics and Space Administration / Prediction of Worldwide Energy Resources* - (plataforma NASA/POWER), a partir das coordenadas geográficas da área de estudo.

Para analisar a relação do crescimento diamétrico com as variáveis meteorológicas foram obtidos dados diários na escala de hora em hora de todo o período de estudo de

temperatura média do ar (T_{md}), temperatura máxima do ar (T_{mx}), temperatura mínima do ar (T_{mn}), umidade relativa do ar (UR) e precipitação (P).

Os dados diários foram organizados para corresponder o período de medições dendrométrica e compilado nos respectivos meses de crescimento.

Com os dados meteorológicos, o balanço hídrico climatológico foi calculado a partir de uma adaptação do trabalho de Thornthwaite & Mather (1955), descrito por Pereira; Angelocci; Sentelhas, (2007).

3.7.1 Déficit de pressão de vapor

O déficit de pressão de vapor (DPV) foi calculado a partir dos valores de temperatura e umidade relativa do ar, usado para determinar a pressão de saturação de vapor d'água no ar (Equação 9) (TETENS, 1930; ALVARENGA et al., 2014).

$$e_s = 0,6108 \times 10^{\frac{(7,5 T)}{(237,3 + T)}} \quad (9)$$

Em que: e_s = pressão de saturação de vapor d'água no ar (kPa); T = temperatura do ar (°C).

Com a umidade relativa e a pressão de saturação de vapor d'água no ar, determinou-se a pressão parcial de vapor d'água no ar (Equação 10).

$$e_a = \frac{UR e_s}{100} \quad (10)$$

Em que: e_a = Pressão parcial de vapor d'água (kPa); UR = Umidade relativa do ar (%).

A partir da diferença entre a pressão de saturação e a pressão parcial de vapor d'água no ar, foi calculado o déficit de pressão de vapor d'água no ar (Equação 11).

$$DPV = (e_s - e_a) \quad (11)$$

Em que: DPV = Déficit de pressão de vapor d'água no ar (kPa).

3.7.2 Evapotranspiração Potencial

A evapotranspiração potencial (ETP) de cada período foi calculada com base na metodologia de Thornthwaite (1948). Inicialmente, calculou-se a evapotranspiração potencial padrão (ETP, mm/mês) pela Equação 12, quando $0\text{ }^{\circ}\text{C} \leq T_n \leq 26,0\text{ }^{\circ}\text{C}$.

$$ETP = 16 \left(10 \frac{T_n}{I}\right)^a \quad (12)$$

Em que: ETP = evapotranspiração potencial expressa em milímetros (média) por um período de 30 dias (mm mês^{-1}); T_n = temperatura média do mês n , em $^{\circ}\text{C}$; I = índice que expressa o nível de calor disponível na região; a = é a função cúbica de I ; n = representa o mês, ou seja, $n = 1$ é janeiro; $n = 2$ é fevereiro; etc.

No caso de $T_n > 26,0\text{ }^{\circ}\text{C}$, a ETP foi obtida por meio da Equação 13, de Willmott et al. (1985), que substitui a Tabela de Thornthwaite (1948).

$$ETP = -415,85 + 32,24 T_n - 0,43 T_n^2 \quad (13)$$

O valor de I foi calculado pela aplicação da Equação 14, o qual depende do ritmo anual da temperatura, e inclui os efeitos térmicos de cada mês.

$$I = \sum_{n=1}^{12} (0,2 T_n)^{1,514} \quad (14)$$

Vale salientar que o expoente “ a ”, da Equação 12, também é um índice térmico regional, o qual foi calculado conforme uma função polinomial (Equação 15).

$$a = 6,75 \cdot 10^{-7} \cdot I^3 - 7,71 \cdot 10^{-5} \cdot I^2 + 1,7912 \cdot 10^{-2} \cdot I + 0,49239 \quad (15)$$

A ETP calculada, por definição, representa o total mensal de evapotranspiração que ocorreria numa determinada condição térmica, mas para um mês padrão de 30 dias e 12 horas de fotoperíodo (THORNTHWAITE, 1948). Assim, para obtenção da ETP de cada mês, esta foi corrigida em função do número real de dias e do fotoperíodo do mês (Equação 16).

$$ETP_{cor} = ETP \cdot \frac{ND}{30} \cdot \frac{N}{12} \quad (16)$$

Em que: ETP_{cor} é a ETP corrigida (mm mês^{-1}); ND é o número de dias do respectivo mês (dias); N é o fotoperíodo médio do respectivo mês (horas), calculado por meio da Equação 17.

$$N = \frac{2h_n}{15^\circ} \quad (17)$$

Em que: h_n é o ângulo no momento do nascer do sol (graus), dado pela Equação 18.

$$h_n = \arcsin(-\tan\emptyset \cdot \tan\delta) \quad (18)$$

Em que: \emptyset é a latitude (graus) e δ é o azimute solar (graus).

O azimute solar (δ) está relacionado ao ângulo projetado do sol em relação à sua posição no plano do horizonte local (SCHEEPERS; DU TOIT, 2020). Pelo método de Thornthwaite (1948), para determinar o fotoperíodo mensal médio requer o cálculo do azimute solar diário para cada mês do ano, este foi estimado conforme a Equação 19.

$$\delta = 23,45^\circ \cdot \text{sen} \left[\text{RAD} \left(360^\circ \left(\frac{NDA-80}{365} \right) \right) \right] \quad (19)$$

Em que: RAD é radianos; NDA é o número do dia do ano.

3.7.3 Balanço hídrico climatológico sequencial

Para a elaboração do balanço hídrico climatológico, se calculou a diferença (DIF) entre a precipitação mensal real e a evapotranspiração potencial corrigida (Equação 20), mantendo-se o sinal positivo ou negativo.

$$DIF = P - ETP_{cor} \quad (20)$$

Em que: P é a precipitação real (mm mês^{-1}) e ETP_{cor} é a evapotranspiração potencial corrigida (mm mês^{-1}).

Após a DIF, se realizou o cálculo do NEG.ACUM (Negativo Acumulado) e do Armazenamento de água no solo (ARM) simultaneamente, em que, NEG.ACUM representa o somatório da sequência de valores negativos de $P - ETP_{cor}$.

Iniciou-se o cálculo do NEG.ACUM no primeiro mês em que apareceu o valor negativo de $P - ETP_{cor}$, após um período de valores positivos de $P - ETP_{cor}$. Nesse primeiro mês o NEG.ACUM foi igual a $P - ETP_{cor}$. Com esse valor, se calculou o ARM (Equação 21).

$$ARM = CAD e^{\frac{NEG ACUM}{CAD}} \quad (21)$$

Em que: CAD é a capacidade de água disponível no solo.

Quando a diferença de $P - ETP_{cor}$ para o mês seguinte também foi negativa, essa diferença foi cumulativamente adicionada ao valor do mês anterior e utilizado para o cálculo de ARM. Prosseguiu-se enquanto a $P - ETP_{cor}$ foi negativa. Após uma sequência de $P - ETP_{cor}$ negativos e aparecer um mês com $P - ETP_{cor}$ positivo, foi somado o valor positivo de $P - ETP_{cor}$ ao ARM do mês anterior, obtendo-se o ARM do mês em questão, com esse valor de ARM, calculou-se o NEG.ACUM do mês (Equação 22).

$$NEG ACUM = CAD \ln \left[\frac{ARM}{CAD} \right] \quad (22)$$

Após a estimativa do NEG.ACUM, foi calculada a alteração no armazenamento (ALT) pela diferença entre o ARM do mês atual e o ARM do mês anterior. Em seguida, foi calculada a Evapotranspiração Real (ETR), conforme duas situações (Equação 23 e 24).

$$1^a - \text{quando } P - ETP_{cor} \geq 0 \text{ a } ETR = ETP_{cor} \quad (23)$$

$$2^a - \text{quando } P - ETP_{cor} < 0 \text{ a } ETR = P + |ALT| \quad (24)$$

3.7.4 Excesso e déficit hídrico

O déficit hídrico (DEF) representa a falta de água no solo, foi calculado conforme a Equação 25.

$$DEF = ETP_{cor} - ETR \quad (25)$$

Já no cálculo do excedente hídrico (EXC), foram consideradas as situações (Equações 26 e 27).

$$1^a - \text{quando } ARM < CAD, \text{ o } EXC = 0 \quad (26)$$

$$2^a - \text{quando } ARM = CAD, \text{ o } EXC = (P - ETP_{cor}) - ALT \quad (27)$$

3.8 Análises estatísticas

Para analisar o crescimento das árvores em função das variáveis meteorológicas foram realizadas medições mensais de DAP, e calculada a área seccional ($\text{cm}^2 \text{ árvore}^{-1}$). O incremento em área seccional foi calculado subtraindo a medição do mês considerado e seu anterior e o incremento acumulado foi calculado somando todos os valores dos incrementos mensais ao longo do período de estudo.

Foi aplicada a análise de regressão linear múltipla para estimar a taxa de crescimento das árvores em função da sazonalidade meteorológica, de acordo com a equação 28 (CAMPOE et al., 2016).

$$IASTT = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 Tmd + \hat{\beta}_2 Tmx + \hat{\beta}_3 Tmn + \hat{\beta}_4 P + \hat{\beta}_5 ETP + \hat{\beta}_6 ETR + \hat{\beta}_7 DH + \hat{\beta}_8 DPV \quad (28)$$

Em que: IASTT = Incremento da Área da Secção Transversal do Tronco ($\text{cm}^2 \text{ árvore}^{-1} \text{ mês}^{-1}$); Tmd = temperatura média do ar ($^{\circ}\text{C}$); Tmx = temperatura máxima do ar ($^{\circ}\text{C}$); Tmn = temperatura mínima do ar ($^{\circ}\text{C}$); P = precipitação (mm); ETP = evapotranspiração potencial corrigida (mm); ETR = evapotranspiração real (mm); DH= déficit hídrico (mm); DPV = déficit de pressão de vapor (kPa); β_0 a β_8 são estimativas dos coeficientes da equação de regressão ajustada.

Foi realizada a análise de regressão dos melhores subconjuntos com a finalidade de obter o melhor modelo de regressão, testando subconjuntos de preditoras especificados, considerando uma probabilidade de 5%. Essa análise possibilita o recurso de seleção de melhores subconjuntos de variáveis para elaborar com precisão expressiva um determinado modelo. Esse

procedimento denomina-se “bestsubsets”, presente no software Minitab[®] versão 19, e permite identificar qual(is) variável(is) são suficientes para uma melhor explicação da variável resposta.

Além do coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), foi utilizada a raiz do erro quadrático médio (REQM) para avaliar a qualidade do ajuste da regressão de crescimento em função das variáveis meteorológicas. Para avaliar o desempenho das regressões, foi feita análise gráfica dos resíduos, sendo possível assim, verificar a presença de tendenciosidade nas estimativas.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Equações volumétricas

Na Tabela 4 se observa para os modelos que apresentaram resultados significativos pelo teste F, que os valores de coeficiente de determinação ajustado variaram entre 76 a 89% e de erro padrão da estimativa oscilou entre 9,21 e 11,84%, mostrando um bom nível de precisão para as estimativas de volume individual.

O modelo 5 (Hohenadl-Krenn) apresentou menor qualidade de ajuste, com menor coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj} = 0,76$) e maior erro padrão ($S_{yx} = 11,84\%$). Pode-se observar que esse é o único modelo baseado apenas na variável independente DAP, sugerindo que as variáveis DAP e altura combinadas apresentam melhor correlação para estimar o volume.

Tabela 4 – Estimativas dos parâmetros das equações testadas para estimar o volume individual da *Calophyllum brasiliense* Cambess em floresta plantada em Igarassu-PE.

Modelos	Coeficientes					R^2_{aj}	$S_{yx}\%$	F
	$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\beta}_3$	$\hat{\beta}_4$			
(1)	-0,053011	0,003938	0,000107	0,000812	-0,000032	0,85	9,29	2,8E-20 **
(2)	-9,584021**	1,697182**	1,121157**			0,89	9,74	1,0E-24 **
(3)	0,006581*	0,000038**				0,84	9,77	4,7E-22 **
(4)	-0,081729*	0,007774*	-0,000003	0,005317**		0,86	9,21	2,7E-21 **
(5)	-0,138675*	0,024875*	-0,000700			0,76	11,84	9,0E-17 **
(6)	-0,012501	0,000065*	-0,000075	0,000687		0,84	9,62	2,3E-20 **

Em que: R^2_{aj} = coeficiente de determinação ajustado; $S_{yx}\%$ = erro padrão da estimativa relativo em m^3 ; $\beta_0, \beta_1, \beta_2, \beta_3, \beta_4$ = Coeficientes dos modelos; F = Valor de f de significação; * Indica que o modelo é significativo a um nível de significância de 0,05; ** = Indica que o modelo é significativo a um nível de significância de 0,01; Modelo de Meyer (1), Schumacher-Hall (2), Spurr (3), Stoate (4), Hohenadl-Krenn (5), Näslund (6).

Para a escolha do modelo mais adequado, a análise dos coeficientes e estatística de qualidade de ajuste fornecem importante subsídio, entretanto, esses critérios de forma isolada não garantem uma boa conclusão sobre o desempenho dos modelos. Assim, para uma melhor avaliação da qualidade dos ajustes, observa-se a distribuição gráfica dos resíduos (MIRANDA; PARO; COSTA, 2014).

Dessa forma, na figura 4 se verifica que as equações de Spurr (3) e Näslund (6) apresentaram uma leve tendência em superestimar o volume. Já as demais tiveram uma boa distribuição dos resíduos, sem tendências nas estimativas.

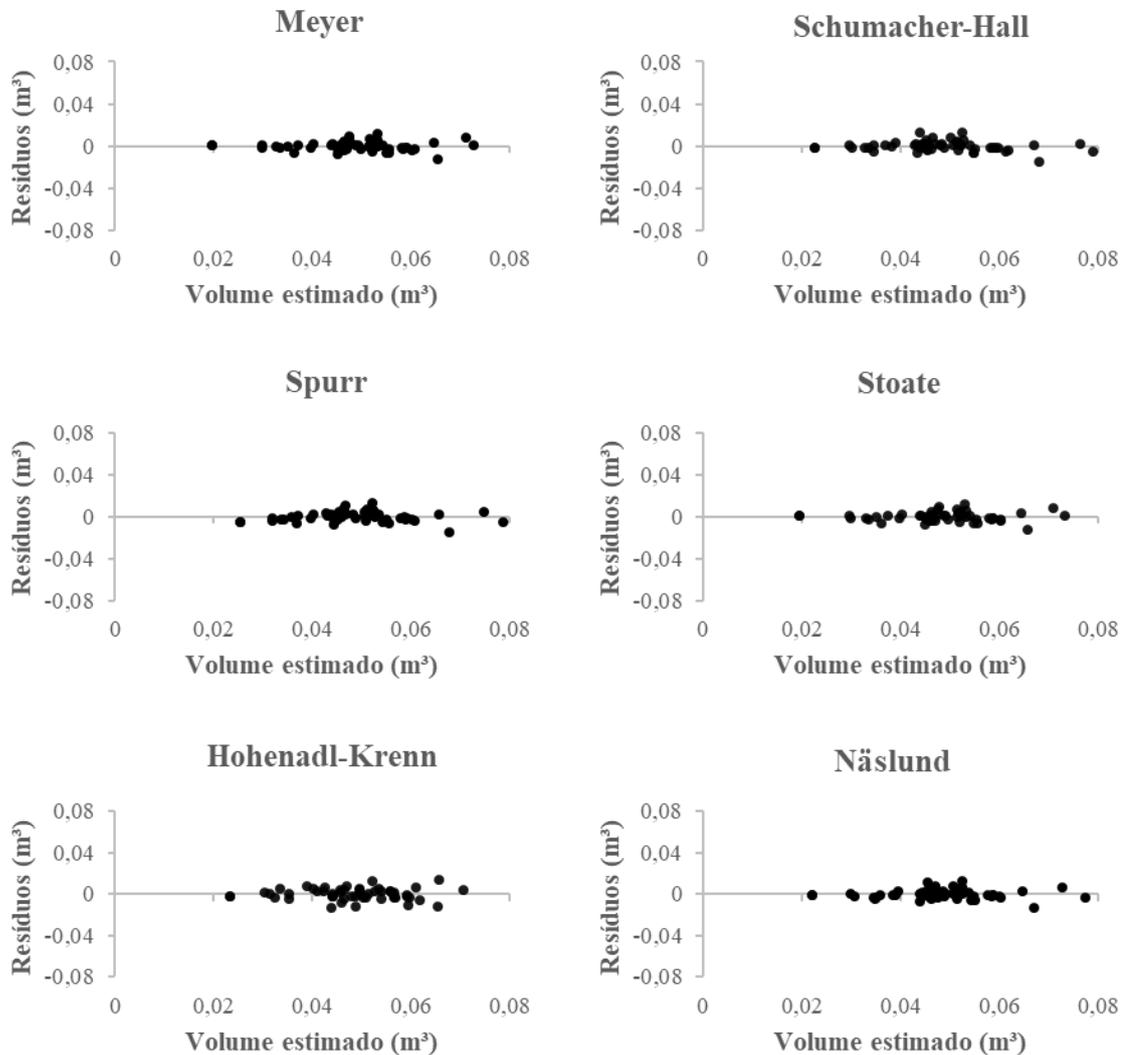


Figura 4 – Distribuição gráfica dos resíduos dos modelos testados para as estimativas do volume individual da *Calophyllum brasiliense* Cambess.

A equação 2 (Schumacher-Hall) foi a que apresentou ajuste mais adequado para o conjunto de dados entre as equações testadas, com $R^2_{aj} = 0,89$ e $S_{yx} \% = 9,74$, além de distribuição gráfica dos resíduos satisfatória (Figura 4), evidenciando a seleção desse modelo para estimativa do volume.

Pode ser constatada também a qualidade do ajuste pela relação entre o volume observado e o volume estimado (Figura 5), com boa sobreposição dos valores em toda a amplitude dos dados para a equação de melhor ajuste.

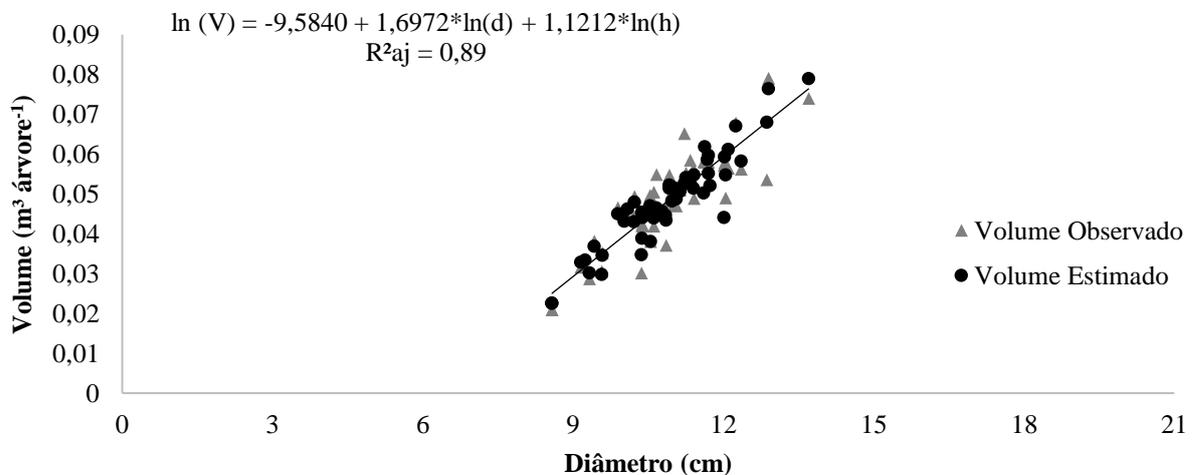


Figura 5 – Equação de melhor ajuste (Schumacher-Hall) com os valores observados e estimados para a *Calophyllum brasiliense* Cambess em floresta plantada em Igarassu (PE).

São raras as publicações de trabalhos sobre o ajuste de modelos volumétricos para a *Calophyllum brasiliense* na literatura. Trabalhos semelhantes ao do presente estudo com diferentes espécies nativas e exóticas do Brasil com interesse comercial foram desenvolvidos em várias regiões do país (MIRANDA; PARO; COSTA, 2014; AGUIAR et al., 2017; CARRIJO et al., 2020).

Na modelagem volumétrica do presente estudo, os resultados de R^2_{aj} e $S_{yx}\%$ foram satisfatórios para alguns modelos e semelhantes aos encontrados por Miranda, Paro e Costa (2014) para *H. courbaril* no norte de Mato Grosso e, Cerqueira et al. (2017), em estudo sobre a modelagem volumétrica para *Tectona grandis* L.F. na mesorregião Nordeste do Pará. Em estudo realizado no município de Dueré (TO), Silva et al. (2018), ajustando equações volumétricas para a espécie *Calophyllum brasiliense*, a mesma do presente estudo aos 94 meses de idade, encontraram resultados superiores, com o R^2_{aj} variando entre 0,92 a 0,98 e o $S_{yx}\%$ entre 2,24 a 14,45%.

Essa diferença pode ser atribuída à heterogeneidade dos povoamentos, devido às características edafoclimáticas entre as duas áreas de estudo, às condições de plantio (por exemplo, espaçamento, tratamentos silviculturais, etc.). Isso mostra a importância de se ajustar equações de volume para cada região específica ou seu uso deve ser para povoamentos e áreas

com características semelhantes. Segundo Figueiredo Filho et al. (2014), é recomendável que a utilização de equações ajustadas seja feita para conjuntos de dados dentro das mesmas condições.

De acordo com a estatística de regressão e distribuição gráfica dos resíduos, a equação obtida por meio do modelo de Schumacher-Hall foi a que apresentou desempenho mais satisfatório para as estimativas do volume individual para a *Calophyllum brasiliense*. Resultados semelhantes foram encontrados por Silva et al. (2019), que também constatou que o modelo de Schumacher-Hall apresentou melhor precisão em trabalho realizado em plantio com a mesma espécie do presente estudo.

Esse modelo volumétrico é muito usado para estimar o volume individual em plantios comerciais de espécies florestais, principalmente do gênero *Eucalyptus* e *Pinus*, como observado em trabalho realizado por Stepka et al. (2017) na região dos Campos Gerais no Paraná com *Pinus taeda* L., e Sales et al. (2015), que ajustando equações volumétricas no agreste de Pernambuco para um clone de *Eucalyptus grandis* x *E. urophylla*, também encontraram a equação de Schumacher-Hall com melhor eficiência de ajuste.

4.2 Análise da biomassa

4.2.1 Estoque de Biomassa acima do solo

Os resultados apresentados na Tabela 5 foram obtidos calculando-se a média da biomassa seca para cada compartimento e para a biomassa total das árvores amostradas, as variações são expressas pelo desvio padrão e os coeficientes de variação e os valores mínimos e máximos dão uma ideia da amplitude dos valores da biomassa.

Observa-se que a maior amplitude entre os compartimentos ocorreu no fuste, onde a variação entre o valor máximo e mínimo foi de 19,01 kg, seguido pelos galhos, com amplitude de 17,16 kg e folhas de 7,05 kg. Para a biomassa seca total, a amplitude foi de 39,92 kg (Tabela 5).

O compartimento com maior variabilidade de dados em relação à média foi o fuste, com maior desvio padrão, porém seu coeficiente de variação foi menor, mostrando que seu conjunto de dados é mais homogêneo. Os compartimentos das folhas e galhos apresentaram menores valores de desvio padrão e elevados coeficientes de variação, indicando uma alta heterogeneidade nos seus conjuntos de dados.

Tabela 5 – Valores médios de biomassa seca total e nos diferentes compartimentos (Folhas, Galhos e Fuste), seguido do desvio padrão, coeficiente de variação (CV%), peso Máximo e Mínimo em árvores de *Calophyllum brasiliense* Cambess em floresta plantada em Igarassu – PE.

Biomassa seca (kg árvore ⁻¹)					
Compartimentos	Média	Desvio Padrão	CV%	Máximo	Mínimo
Folhas	5,0	2,1	42,7	8,69	1,64
Galhos	13,8	5,6	40,2	21,88	4,72
Fuste	28,3	6,4	22,6	35,22	16,21
Biomassa total	47,1	12,5	26,6	63,11	23,19

A maior concentração de biomassa seca acima do solo entre os compartimentos nas árvores de *Calophyllum brasiliense* Cambess se encontra no fuste, seguido dos galhos, enquanto que as folhas apresentaram a menor quantidade (Tabela 5). Em termos percentuais, a biomassa seca acima do solo se distribui nas plantas da seguinte forma: 60% no fuste, 29% nos galhos e 11% nas folhas (Figura 6).

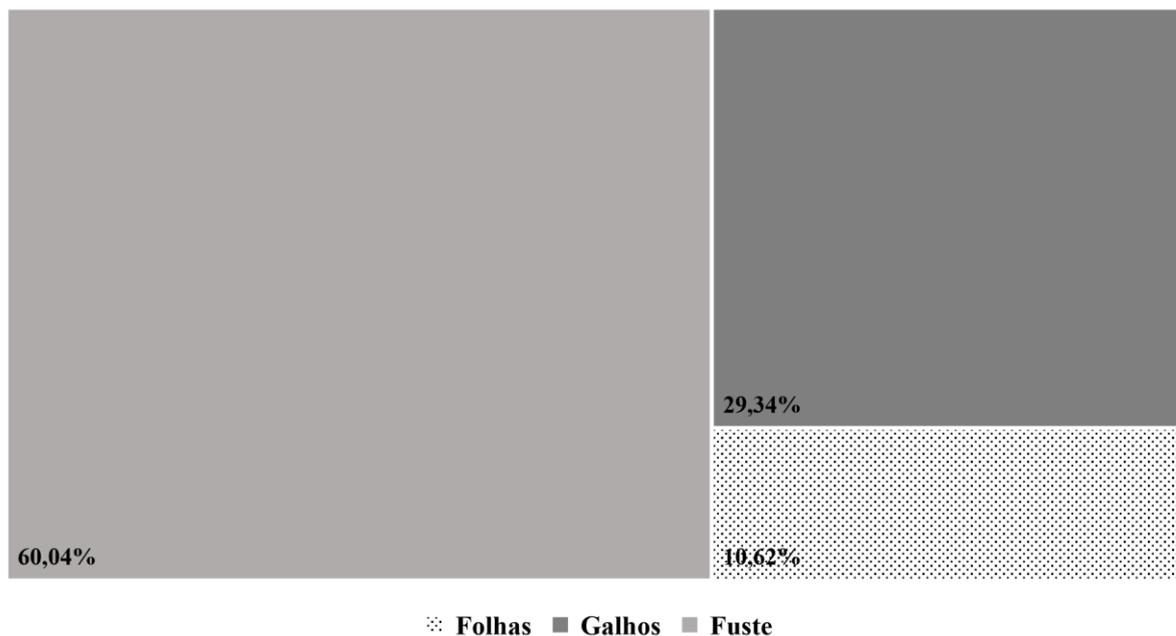


Figura 6 – Distribuição relativa da biomassa seca acima do solo entre os compartimentos em árvores de *Calophyllum brasiliense* Cambess em floresta plantada no município de Igarassu – PE.

4.2.2 Equações de Biomassa

As equações selecionadas para estimar a biomassa foliar apresentaram adequações estatísticas não satisfatórias, porém, foram as que apresentaram melhores resultados dentre as que foram testadas, com o R^2_{aj} oscilando entre 36% a 43%. O S_{yx} foi alto, variando de 32,1% a 40,26%, indicando um baixo nível de precisão nas estimativas da biomassa foliar para todos os modelos testados (Tabela 6).

Isso possivelmente se deu devido à irregularidade na arquitetura das copas das árvores, ocasionando uma alta heterogeneidade na biomassa foliar entre as árvores. Fato este que pode ser observado pelo alto coeficiente de variação (Tabela 5). O modelo de Meyer (1) foi o de melhor ajuste dentre os analisados para estimar a biomassa foliar, com melhor distribuição gráfica de resíduos (Figura 7), entretanto, não apresentou indicadores de ajuste satisfatórios.

Tabela 6 – Estimativas dos parâmetros das equações testadas para estimar a biomassa total e dos diferentes compartimentos (Folhas, Galhos e Fuste) em árvores de *Calophyllum brasiliense* Cambess em floresta plantada em Igarassu-PE.

Compartimentos	Modelo	Coeficientes					R^2_{aj}	$S_{yx}\%$	F
		$\hat{\beta}_0$	$\hat{\beta}_1$	$\hat{\beta}_2$	$\hat{\beta}_3$	$\hat{\beta}_4$			
Folhas	(1)	240,573	-80,062	5,286	4,106*	-0,368*	0,43	32,10	0,091
	(2)	-6,645	-0,379	4,130			0,37	40,26	0,051
	(6)	-47,024	0,092	-0,221	1,845		0,36	34,19	0,093
Galhos	(1)	810,576*	-261,483*	17,166**	12,772**	1,158**	0,64	24,25	0,022*
	(2)	-4,761	-0,212	3,558			0,32	38,99	0,072
	(6)	-155,274*	0,320*	-0,754*	6,108*		0,54	27,28	0,027*
Fuste	(1)	109,407	-56,997	4,216	4,390	-0,365	0,87	8,26	0,001**
	(4)	-165,863*	14,167	-0,057	11,273*		0,86	8,33	0,000**
	(6)	-80,403*	0,166*	-0,381	3,307*		0,86	8,51	0,000**
Biomassa total	(1)	1160,555*	-398,542**	26,668**	21,267**	1,891**	0,87	9,67	0,001**
	(2)	-3,060	0,500	2,585*			0,70	18,31	0,002**
	(6)	-282,701**	0,578**	-1,356**	11,260**		0,83	10,99	0,001**

Em que: R^2_{aj} = coeficiente de determinação ajustado; $S_{yx}\%$ = erro padrão da estimativa relativo em m^3 ; $\hat{\beta}_0, \hat{\beta}_1, \hat{\beta}_2, \hat{\beta}_3, \hat{\beta}_4$ = Coeficientes dos modelos; F = Valor de f de significação; * Indica que o modelo é significativo a um nível de significância de 0,05; **Indica que o modelo é significativo a um nível de significância de 0,01. Modelo de Meyer (1), Schumacher-Hall (2), Stoate (4), Näslund (6).

Para a biomassa seca dos galhos, o coeficiente de determinação ajustado variou de 32 a 64%. Todos os modelos apresentaram $S_{yx}\%$ elevado e modestos R^2_{aj} . Os modelos (1) e (6) foram significativos ao nível de 5% de probabilidade pelo teste F, já o modelo (2) não foi significativo, indicando uma baixa correlação de suas variáveis independentes com a variável dependente.

O modelo de melhor ajuste para biomassa seca de galhos foi o de Meyer (1), com distribuição gráfica dos resíduos mais homogênea (Figura 7), entretanto, apresentou razoáveis indicadores de ajuste, portanto, pode-se afirmar que as estimativas de biomassa para galhos são modestas, assim seu uso requer parcimônia.

Para estimar a biomassa do fuste, os modelos de melhor desempenho apresentaram bons indicadores de ajuste, tendo em vista o R^2_{aj} e $S_{yx}\%$, com valores bem próximos, variando de 86 até 87% e 8,26 até 8,51%, respectivamente (Tabela 6). O modelo que melhor se ajustou aos dados foi novamente o de Meyer (1), que apresentou distribuição gráfica dos resíduos sem tendências (Figura 7) e melhor desempenho nos indicadores de ajuste, com maior coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj} = 0,87$) e menor erro padrão da estimativa ($S_{yx}\% = 8,26\%$) dentre os modelos testados.

Na estimativa da biomassa seca total, pode-se observar dentre os modelos de melhor ajuste, que o modelo (2) foi o que apresentou menor qualidade nas estimativas, ou seja, menor coeficiente de determinação ajustado e maior erro padrão da estimativa (Tabela 6). Comparando-se os modelos (1) e (6), o que se mostrou mais adequado foi o de Meyer (1) devido aos indicadores de ajuste, com maior coeficiente de determinação ajustado ($R^2_{aj} = 0,87$) e menor erro padrão da estimativa ($S_{yx}\% = 9,67$), além da distribuição gráfica dos resíduos mais balanceada (Figura 7). Além disso, o modelo (1) atendeu aos critérios estatísticos, com valor F significativo a 1% de significância, podendo ser utilizado para estimar a biomassa seca total para o povoamento de *C. brasiliense*.

Da mesma forma que para o volume, é importante ressaltar que informações sobre alocação de biomassa para a *C. brasiliense* são escassas, até onde se sabe, este é um dos primeiros estudos que aplica modelagem da biomassa em povoamento desta espécie, assim, demonstrando a sua importância. Por isso, optou-se por citar trabalhos com outras espécies.

Barbeiro, Vieira e Sanquetta (2009), ajustando equações para *Nectandra grandiflora* Ness. na Estação Experimental da Universidade Federal do Paraná, localizada no município de São João do Triunfo, também não conseguiram bons ajustes para folhas e galhos, como observado no presente estudo. Já para a biomassa do fuste e total obtiveram ajustes satisfatórios.

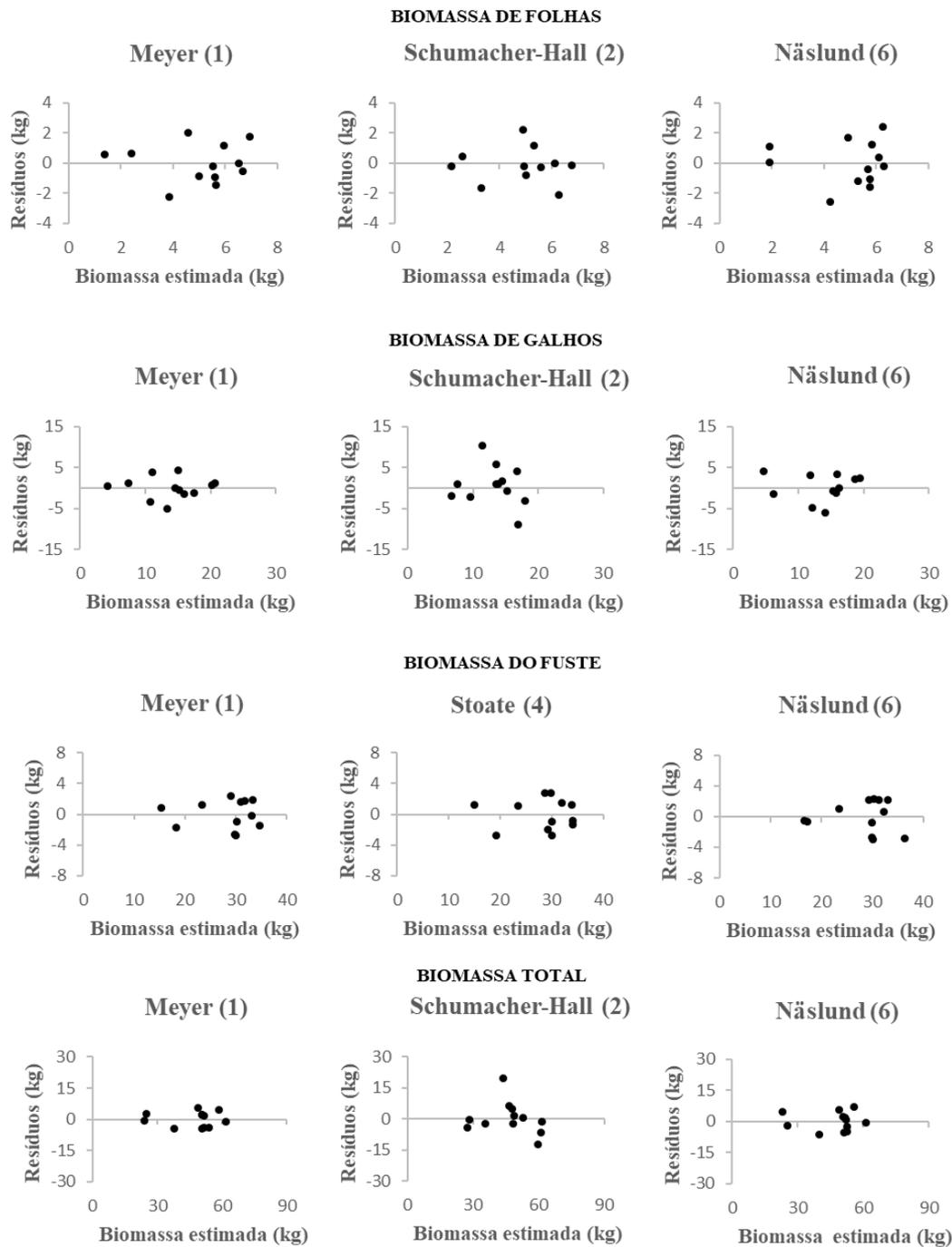


Figura 7 – Distribuição gráfica dos resíduos dos modelos de melhor ajuste para estimar a biomassa seca total e dos diferentes compartimentos de *Calophyllum brasiliense* Cambess em floresta plantada em Igarassu-PE.

Baseado nas estatísticas de regressão, observa-se que dentre todos os ajustes tanto para os compartimentos como para a biomassa total, a folhagem obteve o pior desempenho. Gatto et al. (2011), estudando *Eucalyptus* ssp na região do Centro-Leste de Minas Gerais, também encontraram o pior resultado para esse compartimento, com coeficiente de determinação de 33,8%, inferior ao presente estudo.

Schikowski, Corte e Sanquetta (2013), na modelagem da biomassa individual *Pinus* em povoamentos localizados no centro sul do Estado do Paraná, também não encontraram bons ajustes para folhas e galhos, entretanto, os resultados do R^2_{aj} tanto para a biomassa total como para todos os compartimentos foram superiores aos deste estudo.

Estudando a espécie *Tachigali vulgaris* em floresta plantada em Dom Eliseu (PA), Cerveira (2019), ao ajustar 17 equações alométricas para estimar a biomassa acima do solo para referida espécie, observou que a equação de Meyer esteve entre as três melhores, tanto para a biomassa total, quanto para os diferentes compartimentos da planta, como observado nesta pesquisa.

Vale ressaltar, que a modelagem individual de biomassa da *Calophyllum brasiliense* é importante sob vários aspectos, para quantificações visando o fornecimento de matérias-primas para a indústria de produtos não-madeiráveis, como a farmacêutica. De acordo com Cidrão (2012), esta espécie tem potencial nesse sentido, onde ele cita que as folhas, galhos e sementes estão sendo testados em laboratórios com vista à elaboração de medicamentos voltados à cura de doenças como AIDS, câncer, diabetes e úlceras.

Atualmente, esta espécie tem despertado grande interesse da indústria farmacêutica devido à sua composição química, apresentando propriedades analgésicas, antiviral, anticancerígeno, dentre outras (GÓMEZ-VERJAN et al., 2019). Além disso, a obtenção da biomassa dos diferentes compartimentos das árvores é importante para estimativas do estoque de carbono, informação necessária em projetos de sequestro de carbono. Nesses projetos, devem apresentar as projeções do estoque de carbono, no qual está intimamente relacionado com a biomassa dos diferentes compartimentos da planta.

4.3 Produtividade da *Calophyllum brasiliense* Cambess.

Pode-se observar por meio da estatística descritiva que o diâmetro à altura do peito, a altura total e o volume apresentaram respectivamente uma variação de 7 a 14,7 cm, 8,96 a 15,24 m e 0,0294 a 0,1307 m³ (Tabela 7). Verifica-se uma baixa amplitude das variáveis dendrométrica com baixo coeficiente de variação para altura e DAP ($CV\% \leq 20\%$), já o volume apresentou uma maior variabilidade. Resultados como este são característicos de plantios homogêneos, devido ao regime de manejo e tratos silviculturais.

Tabela 7 – Estatística descritiva das variáveis dendrométricas DAP (cm), H (m) e Volume (m³) do plantio comercial de *Calophyllum brasiliense* Cambess em Igarassu (PE) aos 9,8 anos de idade.

Estatísticas	DAP (cm)	H (m)	V (m³)
Média	11,30	10,53	0,0601
Erro padrão	0,07	0,05	0,0008
Mediana	10,55	11,21	0,0586
Moda	11,30	12,21	0,0529
Desvio padrão	1,28	0,96	0,0154
CV%	12,19	8,47	25,62
Intervalo	7,70	6,28	0,1013
Mínimo	7,00	8,96	0,0294
Máximo	14,70	15,24	0,1307

Em que: DAP = Diâmetro medido a 1,3 metros de altura; H = altura total; V = volume individual total com casca.

Para avaliar a produtividade do plantio, foram calculados o incremento médio anual (IMA) a partir dos valores médios. Sendo assim, a *C. brasiliense* apresentou um incremento médio em diâmetro de 1,09 cm ano⁻¹ e em altura de 1,17 m ano⁻¹. O incremento médio anual para o povoamento foi de 10,27 m³ ha⁻¹ ano⁻¹ para um volume total estimado de 100,16 m³ ha⁻¹ aos 9,8 anos de idade.

Os resultados encontrados nessa pesquisa para as variáveis DAP e altura total estão de acordo com os valores observados para essa espécie em plantações comerciais. Piotto et al. (2003), em trabalho realizado na Costa Rica com a mesma espécie do presente estudo aos 10,3 anos de idade, em plantações manejadas por desbaste, verificaram um DAP médio de 17,47 cm e altura média total de 12,94 m.

Petit e Montagnini (2006), em plantio aos 11 anos de idade encontraram valores médios para altura total de 16,9 m e DAP de 18 cm. Já Silva et al. (2019), em plantio comercial com cerca de 8 anos com espaçamento de 4 x 2 m, observaram um DAP médio de 7,48 cm e altura total de 5,43 m.

Para a variável IMA, Silva et al. (2019) observaram resultados próximos ao do presente estudo, com um incremento médio de 1,27 cm ano⁻¹ para o DAP e 0,88 m ano⁻¹ para a altura, para o povoamento foi observado um IMA de 11,78 m³ ha⁻¹ ano⁻¹. Já Redondo-Brenes e Montagnini (2006) encontraram resultados superiores aos desta pesquisa, estudando a mesma espécie, sendo o incremento médio em DAP e altura total de 1,55 cm ano⁻¹ e 1,48 m ano⁻¹,

respectivamente, e um incremento médio anual de $15,1 \text{ m}^3 \text{ ha}^{-1} \text{ ano}^{-1}$. Essa diferença na produtividade dos plantios pode ser explicada ao fato destes se localizarem em diferentes regiões geográficas com condições climáticas diferentes, como também as condições de plantio.

4.4 Influência das variáveis climáticas no crescimento da *Calophyllum brasiliense* Cambess.

O incremento em área da secção transversal do tronco (IASTT) da *Calophyllum brasiliense* Cambess apresentou variação ao longo do período de estudo e mostrou influência das variáveis meteorológicas (Figura 8B). A menor taxa de crescimento corrente mensal (IASTT $< 0,4 \text{ cm}^2$ por árvore) ocorreu nos meses de março/2021 e no período de setembro/2021 a fevereiro/2022) (Figura 8B). Ao mesmo tempo que nesse período foi observado uma menor precipitação e balanço hídrico negativo, ocasionando déficit hídrico no solo, conseqüentemente, causando diminuição no crescimento.

Durante o período de avaliação o maior crescimento em área da secção transversal do tronco (ASTT) ocorreu nos meses de abril de 2021 a agosto do mesmo ano (Figura 8B). Foi nesse período que ocorreu as maiores precipitações mensais e é observado que esses são meses que não apresentaram déficit hídrico no solo (Figura 8C).

O mês com maior incremento da ASTT foi o de abril de 2021 (IASTT = $2,32 \text{ cm}^2 \text{ árvore}^{-1}$). Foi visto que esse é o primeiro mês que não apresenta déficit hídrico no solo após alguns meses com o balanço hídrico negativo, ocasionando uma rápida resposta das árvores, obtendo um maior crescimento (Figuras 8B e C).

Fato este pode ser atribuído também à reidratação do tronco, visto que durante os períodos mais secos pode ter ocorrido a contração dele, devido às maiores temperaturas e baixa umidade relativa do ar que essa região apresenta durante o período de estiagem.

Foi observado uma baixa variação na temperatura média, máximas e mínimas mensais ao longo do período de análise, no entanto, foi visto que as menores temperaturas médias das máximas ocorreram entre os meses de abril a outubro de 2021, período este que foi observado maior incremento acumulado da ASTT das plantas. Comportamento similar é visto com o DPV, durante esse período foi observado menores DPV e maior incremento acumulado (Figura 8A a D).

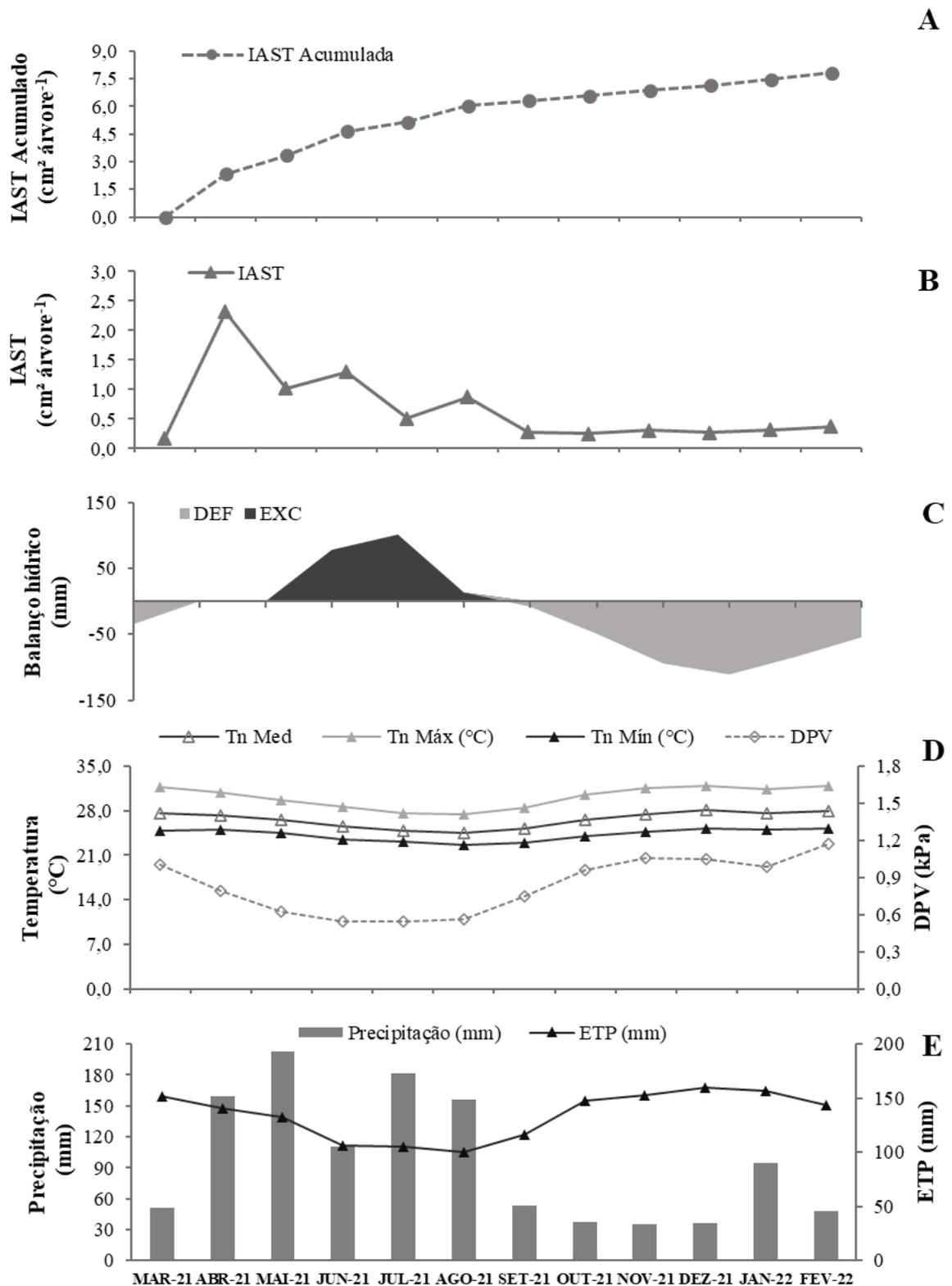


Figura 8 – Crescimento da área da seção transversal do fuste acumulado (A) e atual (B) de *Calophyllum brasiliense* Cambess, balanço hídrico sequencial (C), temperatura e déficit de pressão de vapor (D) e precipitação e evapotranspiração (E) (de cima para baixo) em Igarassu – PE.

Conforme a análise de regressão linear múltipla, se pôde constatar que os subconjuntos 4 e 5 apresentaram as melhores estatísticas de ajuste com maiores coeficientes de determinação ajustados e menores erros (Tabela 8). Para avaliar a qualidade da regressão de crescimento foi feita a distribuição gráfica dos resíduos (Figura 9), dessa forma, foi possível observar a presença de tendenciosidade na estimativa pelos modelos. Foi observado que os subconjuntos 3, 5 e 6 tem uma tendência em subestimar o crescimento da ASTT, já o subconjunto 2 apresentou uma tendência em superestimar o incremento. Os subconjuntos 1 e 4 não apresentaram tendência na estimativa do crescimento.

Tabela 8 – Estimativas dos parâmetros de regressão múltipla entre o crescimento da área da secção transversal do tronco versus dados climáticos e índices estatísticos da *Calophyllum brasiliense* Cambess em floresta plantada no município de Igarassu (PE).

Subcon- juntos	$\hat{\beta}_0$ (cm ² árv ⁻¹)	T	T	T	P	ETP	ETR	DH	DPV (cm ² árv ⁻¹ kPa ⁻¹)	R ² _{aj}	REQM	F
		md	mx	mn								
		(cm ² árv ⁻¹ °C ⁻¹)			(cm ² árv ⁻¹ mm ⁻¹)							
1	19,556		0,885**			-0,062*	0,021**			0,69	0,29	0,006**
2	19,134		0,858*		0,002	-0,059*	0,019*			0,66	0,28	0,018*
3	18,718	1,489	2,193		0,006	-0,070*	0,019*			0,69	0,25	0,027*
4	24,727		3,935**	3,263*	0,019*	0,151**	0,039**	0,020*		0,89	0,14	0,004**
5	24,508		3,834**	3,176*	0,019*	0,161**	0,045**	0,021*	1,821	0,89	0,12	0,012*
6	23,283	3,057	2,933	-5,473	0,022	-0,165*	0,049*	0,022*	1,948	0,86	0,41	0,046*

Equação Multivariada: $IAST = \hat{\beta}_0 + \hat{\beta}_1 T_{md} + \hat{\beta}_2 T_{mx} + \hat{\beta}_3 T_{mn} + \hat{\beta}_4 P + \hat{\beta}_5 ETP + \hat{\beta}_6 ETR + \hat{\beta}_7 DH + \hat{\beta}_8 DPV$.

IASTT = incremento da área da secção transversal do tronco (cm² árvore⁻¹ mês⁻¹); Tmd= temperatura média do ar (°C); Tmx = temperatura máxima do ar (°C); Tmn = temperatura mínima do ar (°C); P = precipitação (mm); ETP = evapotranspiração potencial (mm); ETR = evapotranspiração real (mm); DPV = déficit de pressão de vapor (kPa); $\hat{\beta}_0$ a $\hat{\beta}_6$ são coeficientes da equação de regressão multivariada; R²_{aj}= coeficiente de determinação ajustado; REQM = Raiz do erro quadrático médio; F = Valor de f de significação; ** valor-P < 0,01; * valor-P < 0,05.

Assim, o subconjunto (4), $IASTT = -24,72682 + 3,93539 (T_n M_x) - 3,26276 (T_n M_n) + 0,01888 (P) - 0,15052 (ETP) + 0,03947 (ETR) - 0,02002 (DH)$ foi o melhor para explicar a variação no crescimento da *Calophyllum brasiliense* Cambess, no qual mostrou relação significativa (P < 0,01), com um coeficiente de determinação ajustado (R²_{aj} = 89%) e Raiz do

Erro Quadrático Médio (REQM = 0,14). De acordo com a distribuição dos resíduos, não apresentou tendência para estimativa do crescimento (Figura 9).

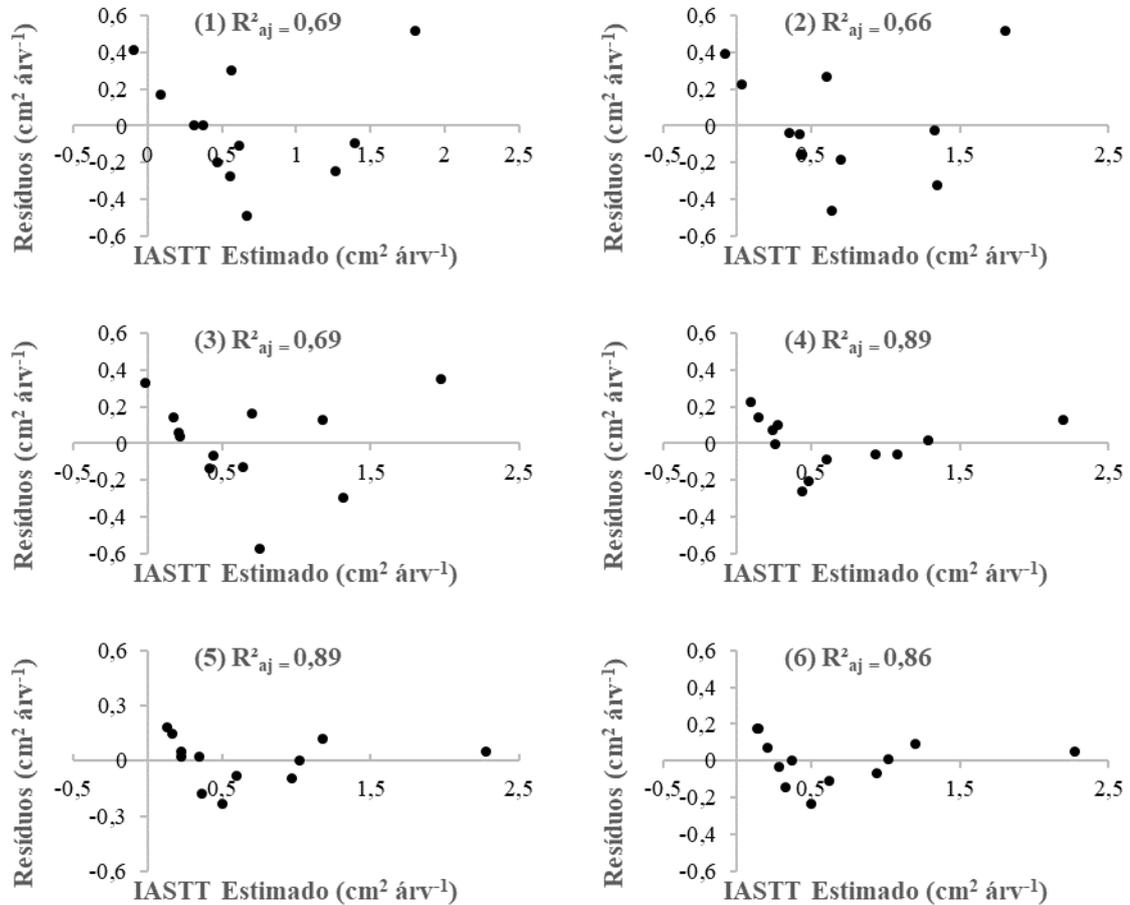


Figura 9 – Distribuição gráfica dos resíduos dos melhores subconjuntos para estimar a variação do Incremento da Área Secção Transversal do Tronco (IASTT) mensal de *Calophyllum brasiliense* Cambess em floresta plantada em Igarassu-PE.

Como observado no presente estudo, Cardoso et al. (2022), em trabalho realizado em um plantio comercial de *Eucalipto*, no município de Boa Esperança do Sul-SP, observaram que a taxa de crescimento da área seccional do tronco foi influenciada por variáveis meteorológicas, sendo o período de menor crescimento o de menor precipitação, com balanço hídrico no solo negativo.

Na área de estudo, o período de maior temperatura média das máximas correspondeu ao período de menor precipitação, proporcionando menor disponibilidade hídrica no solo e causando déficit hídrico. Assim, a diminuição no crescimento da área da secção transversal do tronco (ASTT) da *Calophyllum brasiliense* foi correlacionado às altas temperaturas do ar e o

déficit hídrico do solo, que ocorreu durante o período de baixa precipitação na área de estudo. Com a baixa precipitação e aumento da temperatura, ocasiona um aumento no déficit de pressão de vapor de água no ar (DPV) e conseqüentemente, maior evapotranspiração levando as plantas ao estresse hídrico.

As taxas de transpiração em florestas têm grande influência do DPV, principalmente quando a variação de temperatura e umidade é baixa, e essa transpiração é diretamente controlada pelos estômatos e o vapor de água no ar através da interação das folhas e o ar. A transpiração e a pressão de vapor d'água irão influenciar a condutância superficial da folha (ANDERSSON, 2005). Segundo Lin et al. (2015), em espécies arbóreas, o impacto negativo do DPV na condutância estomática diminui a absorção de CO₂, reduzindo a produção de carboidratos e o crescimento do fuste.

Durante o período de estiagem, Campoe et al. (2016) observaram um menor crescimento da ASTT estudando *Eucalyptus* e *Pinus*, corroborando com os resultados dessa pesquisa. A disponibilidade hídrica no solo é a principal restrição ao crescimento de plantas, onde os principais mecanismos de regulação da captura e uso de nutrientes e luz pelas árvores estão relacionados à disponibilidade de água, com grande influência no crescimento ao longo dos anos (ELLI et al., 2019; LIM et al., 2020). Sob déficit hídrico, há limitação do crescimento potencial das árvores (RYAN et al., 2020).

Em estudo realizado por Cardoso et al. (2022), também observaram durante o período de análise, uma rápida resposta das plantas logo após o início do período chuvoso, período em que houve as maiores taxas de crescimento da ASTT, resultado semelhante ao do presente estudo. Ainda Cardoso et al. (2022), atribuíram essa rápida recuperação do diâmetro do tronco ao seu crescimento, como resultado da retomada da produção de hormônios e carboidratos, distribuídos ao longo do floema que induzem ao aumento da divisão celular na camada cambial, conseqüentemente no diâmetro do tronco, e à sua reidratação, uma vez que este pode ter contraído durante a estação seca.

Estudos avaliando o crescimento em função da sazonalidade meteorológica dentro do ano de crescimento tem grande relevância, é fundamental passo para entender os limites da produção (CAMPOE et al., 2016), assim, auxiliando em tomadas de decisões sobre os locais de maior adaptação e desempenho de determinada espécie para o planejamento de futuros plantios.

Simulações sugerem a ocorrência de mudanças climáticas futuras na América do Sul, com variações na distribuição e quantidade das chuvas, além de aumento de temperatura (CHOU et al., 2014), caso confirmadas, há uma alta probabilidade de a produtividade de plantações florestais serem afetadas negativamente na região de estudo. Assim, melhorar o

entendimento de como a *Calophyllum brasiliense* responde às variáveis meteorológicas são essenciais para o planejamento a longo prazo de futuros plantios nessa região, sem comprometimento de sua produtividade.

5. CONCLUSÕES

Com base nos resultados apresentados, pode-se afirmar que o modelo volumétrico de Schumacher-Hall descrito pela função $Ln V = -9,584021 + 1,697182. (LnDAP) + 1,121157. (LnH)$ apresentou o melhor ajuste e boa precisão estatística para o conjunto de dados analisados, evidenciando que este modelo poderá ser usado para estimativa do volume individual para o povoamento de *Calophyllum brasiliense* Cambess.

As equações com melhores estatísticas foram obtidas no ajuste para a biomassa total seguida do fuste. Já para os galhos e folhas os resultados foram menos expressivos.

Tanto para a biomassa total como para os compartimentos da planta (folhas, galhos e fuste), o modelo de melhor ajuste foi o de Meyer. Para a estimativa da biomassa seca para folhas e galhos os modelos testados apresentaram desempenho fraco. Para a biomassa seca do fuste e total, a equação de melhor ajuste (Meyer) apresentou boa precisão estatística, com bons indicadores de ajuste podendo ser usadas.

As árvores de *C. brasiliense* apresentaram influência da sazonalidade meteorológica, onde estas tiveram um maior crescimento durante o período de balanço hídrico positivo, respondendo assim, a hipótese inicial.

De forma prática, esta pesquisa apresenta equações para serem utilizadas em florestas plantadas na estimativa de volume e biomassa desta espécie, bem como evidencia que futuras mudanças no clima podem afetar negativamente o crescimento e produção da *C. brasiliense*.

6. REFERÊNCIAS

- ABREU, E. C. R. **Modelagem para prognose precoce do volume por classe diamétrica para *Eucalyptus grandis***. 2000. 69f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) - UFLA, Lavras, 2000.
- AGUIAR, D. R. D., LIMA, A. J. N., GAMA, J. R. V., ANDRADE, D. F. C. D., SANTOS, J. D., & HIGUCHI, N. Adjustment of volumetric equations from fallen trees for analysis of the logging effect in the Tapajós National Forest, Pará, Brazil. **Australian Journal of Basic and Applied Sciences**, v. 10, p. 48-59, 2017.
- ALVARENGA, C. B.; TEIXEIRA, M. M.; ZOLNIER, S.; CECON, P. R.; SIQUEIRA, D. L.; RODRIGUÊS, D. E.; SASAKI, R. S.; RINALDI, P. C. N. Efeito do déficit de pressão de vapor d'água no ar na pulverização hidropneumática em alvos artificiais. **Bioscience Journal**, v.30, p.182-193, 2014.
- ANDERSSON, F. **Coniferous Forests**. Elsevier, v. 6 2005.
- ARAUJO, P. H. C., SILVA, F. F., GOMES, M. F. M., FÉRES, J. G., BRAGA, M. J. Uma análise do impacto das mudanças climáticas na produtividade agrícola da região nordeste do Brasil. **Revista Economia do Nordeste**, v. 45, n. 3, p. 46-57, 2014.
- BAMBERG, R. **Análise da influência das variáveis meteorológicas no crescimento em diâmetro e altura de quatro espécies florestais**. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2014.
- BARBEIRO, L. D. S. S., VIEIRA, G., SANQUETTA, C. R. Equações para estimativa da biomassa individual de *Nectandra grandiflora* Ness (canela-amarela). **Floresta**, v. 39, n. 4, 2009.
- BASTIN, J. F.; FINEGOLD, Y.; GARCIA, C.; MOLLICONE, D.; REZENDE, M.; ROUTH, D.; CROWTHER, T. W. The global tree restoration potential. **Science**, v.365, n.6448, p.76–79, 2019.
- BELCHIOR, P. R. M. **Estimação de volumes total, de fuste e de galhos em mata secundária no Município de Rio Vermelho, MG - Viçosa**. 1996. 75 f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – UFV, Viçosa, 1996.
- BERNABÉ-ANTONIO, A.; ESTRADA-ZUÑIGA, M. E.; BUENDÍA-GONZÁLEZ, L.; REYES-CHILPA, R.; CHÁVEZ-ÁVILA, V. M.; CRUZ-SOSA, F. Production of anti-HIV-1 calanolides in a callus culture of *Calophyllum brasiliense* (Cambes). **Plant Cell, Tissues and Organ Culture**, v.103, n.1, p.33-40, 2010.
- BINKLEY, D.; CAMPOE, O. C.; ALVARES, C. A.; CARNEIRO, R. L.; STAPE, J. L. Variation in whole-rotation yield among *Eucalyptus* genotypes in response to water and heat stresses: The TECHS project. **Forest Ecology and Management**, v. 462, p. 117953, 2020.

BRENES, A. R.; MONTAGNINI, F. Growth, productivity, aboveground biomass, and carbon sequestration of pure and mixed native tree plantations in the Caribbean lowlands of Costa Rica. **Forest Ecology and Management**, v. 232, n.1/3, p.168-178, 2006.

BRITO, J. O. O Uso Energético da Madeira. **Estudos Avançados**, v. 21, n. 59, p. 185-193, 2007.

BROWN, S. **Estimating biomass and biomass change of tropical forests: a primer**. Rome: FAO, 1997. 55p.

BURGER, D. **Ordenamento florestal I – A produção florestal**. Curitiba, PR: Fundação de Pesquisas Florestais do Paraná, 1980. 124p.

CABACINHA, C. D. **Um método para a realização do inventário florestal suprimindo a cubagem rigorosa**. 2003. 116f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) - UFLA, Lavras, 2003.

CABACINHA, C. D.; SCOLFORO, J. R. S.; THIERSCH, C. R.; SALES, N. L. P.; CARVALHO, L. R. Uma nova abordagem para o método geométrico usando o índice da parábola. **Ciência Florestal**, v.23, n.1, p.261-271, 2013.

CALDEIRA, M. V. W. **Determinação de biomassa e nutrientes em uma floresta ombrófila mista montana em General Carneiro, Paraná**. 2003. 193f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - UFPR, Curitiba, 2003.

CAMPOE, O.C.; MUNHOZ, J.S.B.; ALVARES, C.A.; CARNEIRO, R.L.; de MATTOS, E.M.; FERREZ, A.P.C.; STAPE, J.L. Meteorological seasonality affecting individual tree growth in forest plantations in Brazil. **Forest Ecology and Management**. v. 380, p. 149–160, 2016.

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

CARAGLIO, Y., BARTHELEMY, D. **Revisão crítica dos termos relativos ao crescimento e à ramificação de vegetais vasculares**. Original francês, Tradução de: Miroslava Rakocevic, Moacir Jose Sales Medrado e Jorge Ribasky. Colombo: EMBRAPA Florestas, 2003. 101 p.

CARDOSO, P. H. S.; NETO, A. D.; OLIVEIRA, F. C.; TOMAZELLO-FILHO, M.; GUEDES, F. T. P.; ALVARES, C. A.; H.; STAPE, J. L.; NOGUEIRA, T. A R.; CAPRA, G. F.; JANI, A. D.; HE, Z.; ABREU-JUNIOR, C. H. Fertilization management with sewage sludge sustains *Eucalyptus* productivity in Cerrado infertile soil. **Forest Ecology and Management**, v. 519, p. 120338, 2022.

CARRIJO, J. V. N.; FERREIRA, A. B. D. F.; FERREIRA, M. C.; DE AGUIAR, M. C.; MIGUEL, E. P.; MATRICARDI, E. A. T.; REZENDE, A. V. The growth and production modeling of individual trees of *Eucalyptus urophylla* plantations. **Journal of Forestry Research**, v. 31, n. 5, p. 1663-1672, 2020.

CARVALHO, P. E. R. **Espécies arbóreas brasileiras**. Brasília: Embrapa Informação Tecnológica; Colombo: Embrapa Florestas, 2003.

CARVALHO, P. E. R. **Espécies florestais brasileiras: recomendações silviculturais, potencialidades e uso da madeira.** Colombo: Embrapa – CNPF; Brasília: Embrapa – SPI, 1994.

CERQUEIRA, C. L.; LISBOA, G. S.; FRANÇA, L. C. J.; MÔRA, R.; MARQUES, G. M.; SALLES, T. T.; BRIANEZI, D. Modelagem da altura e volume de *Tectona grandis* LF na mesorregião Nordeste do Pará. **Nativa**, Sinop: Pesquisas Agrárias e Ambientais, v.5, p.606-611, 2017.

CERVEIRA, S. S. **Equações alométricas para estimar a biomassa acima do solo em floresta plantada com tachi-branco (*Tachigali vulgaris*), Dom Eliseu/ Pará.** 111 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Ambientais) – Instituto de Geociências, Universidade Federal do Pará, Empresa Brasileira de Pesquisa Agropecuária, Belém, 2019.

CHOU, S. C.; LYRA, A.; MOURÃO, C.; DEREZYNSKI, C.; PILOTTO, I.; GOMES, J.; BUSTAMANTE, J.; TAVARES, P.; SILVA, A.; RODRIGUES, D.; CAMPOS, D.; CHAGAS, D.; SUEIRO, G.; SIQUEIRA, G.; MARENGO, J. Assessment of climate change over South America under RCP 4.5 and 8.5 downscaling scenarios. **American Journal of Climate Change**, v. 3, n. 05, p. 512, 2014.

CIDRÃO, D. F. **Economia florestal: potencialidades do Guanandi.** 2012. Dissertação (Mestrado) - Centro Universitário de Araraquara, Programa de Pós-Graduação em Desenvolvimento Regional. 184 f. Araraquara-SP, 2012.

CIRIELLO, E. **Variabilidade genética de caracteres relacionados ao enraizamento de estacas de progênes e clones de Guanandi (*Calophyllum brasiliense* Cambess.).** 2010. 75f. Dissertação (Mestrado em Ciência Florestal) – UNESP. Botucatu, 2010.

CISNEROS-TORRES, D.; CRUZ-SOSA, F.; NICASIO-TORRES, M. P.; GONZÁLEZ-CORTAZAR, M.; ROMERO-ESTRADA, A.; BERNABÉ-ANTONIO, A. Establishment of a cell suspension culture from *Calophyllum brasiliense* and evaluation of its antioxidant and anti-inflammatory activity. **Revista Mexicana de Ingeniería Química**, v. 19, n. 1, p. 59-70, 2020.

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

CORDEIRO, I. M.; SCHWARTZ, G.; BARROS, P. L. Efeitos do clima sobre o incremento diamétrico de Paricá (*Schizolobium parahyba* var. *amazonicum* – Fabaceae) em plantios comerciais. **Nativa**, Sinop, v. 8, n. 2, p. 246-252, mar./abr, 2020.

CORDEIRO, M. A.; PEREIRA, N. N. J.; BINOTI, D. H. B.; BINOTI, M. L. M. S.; LEITE, H. G. Estimativa do volume de *Acacia mangium* utilizando técnicas de redes neurais artificiais e máquinas vetor de suporte. **Pesquisa florestal brasileira**, v.35, n.83, p.255-261, 2015.

CPRM - **Serviço Geológico do Brasil Projeto cadastro de fontes de abastecimento por água subterrânea.** Diagnóstico do município de Igarassu, estado de Pernambuco / Organizado [por] João de Castro Mascarenhas, Breno Augusto Beltrão, Luiz Carlos de Souza Junior, Manoel Júlio da Trindade G. Galvão, Simeones Neri Pereira, Jorge Luiz Fortunato de Miranda. Recife: CPRM/PRODEEM, 2005.

DUFFECKY, M. D.; FOSSATI, L. C. Avaliação da adaptação de *Calophyllum brasiliense* Cambess. (Guanandi), família Clusiaceae, no planalto norte catarinense. **Ágora: revista de divulgação científica**, v.16, n.2, p.14-27, 2009.

ELLI, E. F.; SENTELHAS, P. C.; DE FREITAS, C. H.; CARNEIRO, R. L.; ALVARES, C. A. Assessing the growth gaps of *Eucalyptus* plantations in Brazil—Magnitudes, causes and possible mitigation strategies. **Forest Ecology and Management**, v. 451, p. 117464, 2019.

ENCINAS, J. I.; ENCINAS, O. **Epidometria forestal**. Mérida: RELAFOR, v. 1., 2008.

ENCINAS, J. I.; SILVA, G. F.; PINTO, J. R. **Idade e crescimento das árvores**. Comunicações Técnicas Florestais, Brasília, UFB, v. 7, n. 1, 2005.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Global Forest Resources Assessment 2020**. Roma: FAO, 2020. 16p. Disponível em: < <http://www.fao.org/3/CA8753EN/CA8753EN.pdf> >. Acessado em: 07 jun. 2022.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Forests and poverty reduction**. 2015. Disponível em: < <http://www.fao.org/forestry/livelihoods/en/> >. Acessado em: 25 mai. 2022.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **Manual of forest inventory, with special reference to mixed tropical forest**. Roma, 1981. 200p. Disponível em: < <http://cmq.esalq.usp.br/Philodendros/lib/exe/fetch.php?media=lc0510:historico:2021:husch-1981.pdf> >. Acessado em: 09 jun. 2022.

FAO - Food and Agriculture Organization of the United Nations. **The State of the World's Forests 2018** - Forest pathways to sustainable development. Rome. Licence: CC BY-NC-SA 3.0 IGO. 2018. Disponível em: < <https://www.fao.org/documents/card/fr/c/I9535EN/> >. Acessado em: 25 mai. 2022.

FIGUEIREDO FILHO, A.; MACHADO, S. A.; MIRANDA, R. O. V.; RETSLAFF, F. A. S. Compêndio de Equações de volume e de afilamento de espécies florestais plantadas e nativas para as regiões geográficas do Brasil. **Curitiba, Brasil. Universidade Estadual do Centro-Oeste**, 2014.

FIGUEIREDO FILHO, A.; RODE, R.; FIGUEIREDO, D. J.; MACHADO, S. A. Seasonal diameter increment for 7 species from an Ombrophylous Mixed Forest, southern state of Paraná, Brazil. **Floresta**, v. 38, n.3, p. 527-543, 2008.

GASPAROTTO, J. R. A.; BRENZAN, M. A.; PILOTO, I. C.; CORTEZ, D. A. G.; NAKAMURA, C. V.; DIAS FILHO, B. P.; FERREIRA, A. G. Phytochemical study and evaluation of the molluscicidal activity of *Calophyllum brasiliense* Camb (Clusiaceae). **Química Nova**, v.28, p.575-578, 2005.

GATTO, A., BARROS, N.F., NOVAIS, R.F., SILVA, I.R., LEITE, H.G., VILLANI, E.M.A. Estoque de carbono na biomassa de plantações de eucalipto na Região Centro - Leste do Estado de Minas Gerais. **Revista Árvore**, v. 35, p. 895-905, 2011.

GOMES, A. M. A. **Medição dos arvoredos**. Lisboa: Livraria Sá da Costa, 1957. 413p.

GÓMEZ-VERJAN, J. C.; RIVERO-SEGURA, N. A.; ESTRELLA-PARRA, E.; RINCÓN-HEREDIA, R.; MADARIAGA-MAZÓN, A.; FLORES-SOTO, E.; GONZÁLEZ-MELJEM, M.; MARCO CERBÓN, M.; REYES-CHILPA, R. Network pharmacology uncovers anticancer activity of Mammea-type coumarins from *Calophyllum brasiliense*. **Planta Medica**, v. 85, n. 01, p. 14-23, 2019.

GUIMARÃES, H. S. Gestão de florestas plantadas: exemplo de conservação e preservação ambiental. **Revista Opiniões**, 2013.

HOLL, K. D. Effects of above-and below-ground competition of shrubs and grass on *Calophyllum brasiliense* (Camb.) seedling growth in abandoned tropical pasture. **Forest ecology and management**, v. 109, n. 1-3, p. 187-195, 1998.

HOUGHTON, R. A.; HALL, F.; GOETZ, S. J. Importance of biomass in the global carbon cycle. **Journal of Geophysical Research**, v.144, n.G00E03, p.1-13, 2009.

IBÁ – INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório Anual 2021**. Brasília, DF, 2021. 93 p. Disponível em iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorioiba2021-compactado.pdf. Acesso em: 07 jun. de 2022.

ÍBA. INDÚSTRIA BRASILEIRA DE ÁRVORES. **Relatório Anual 2020**. Brasília, DF, 2020. 122 p. Disponível em: < <https://iba.org/datafiles/publicacoes/relatorios/relatorio-iba-2020.pdf> >. Acesso em: 4 Dez. 2020.

ISAIAS, D. E. B.; NIERO, R.; NOLDIN, V. F.; DE CAMPOS-BUZZI, F.; YUNES, R. A.; DELLE-MONACHE, F.; CECHINEL-FILHO, V. Pharmacological and phytochemical investigations of different parts of *Calophyllum brasiliense* (Clusiaceae). **Pharmazie**, v.59, n.11, p.879-881, 2004.

KOEHLER, A. B. **Modelagem Biométrica e Morfometria em Povoamentos Jovens de *Araucaria angustifolia* (Bert.) Ktze, em Tijucas do Sul, Estado do Paraná**. 2009. 142f. Tese (Doutorado em Engenharia Florestal) - UFPR, Curitiba, 2009.

LACHINI, E. **Efeito da Idade na Estimativa do Volume de árvores de *Pinus caribaea* var. *hondurensis* e *Pinus oocarpa***. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) – UFES, Jerônimo Monteiro, 2012. 44f.

LANDSBERG J.; SANDS P. **Physiological ecology of forest production: principles, processes, and models**. Amsterdam: Elsevier/Academic Press, ed. 1, v. 4, 331 p, 2011.

LEITE, F. S. L. **Estimativa do volume de madeira a partir do diâmetro da cepa em uma área explorada de floresta amazônica de terra firme**. 2008. 74f. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – UNB, Brasília, 2008.

LEITE, H. G.; ANDRADE, V. C. L. Um método para condução de inventários florestais sem o uso de equações volumétricas. **Árvore**, v.26, n.3, p.321-328, 2002.

LIM, H.; ALVARES, C. A.; RYAN, M. G.; BINKLEY, D. Assessing the cross-site and within-site response of potential production to atmospheric demand for water in *Eucalyptus* plantations. **Forest Ecology and Management**, v. 464, p. 118068, 2020.

LIMA JÚNIOR, C.; ACCIOLY, L. J. O.; GIONGO, V.; LIMA, R. L. F. A.; SAMPAIO, E. V. S. B.; MENEZES, R. S. C. Estimativa de biomassa lenhosa da caatinga com uso de equações alométricas e índice de vegetação. **Scientia Forestalis**, v.42, n.102, p.289-298, 2014.

LIMA, A. P. B.; DA SILVA LOBATO, A. K.; NETO, C. F. O.; DE ALMEIDA, C. M.; GOUVÊA, D. D. S.; MARQUES, L. C.; DA COSTA, R. C. L. Transpiração e Condutância Estomática em Folhas de Mudas de Mogno (*Swietenia macrophylla* King R.A) Submetidas ao Estresse Hídrico e à Reidratação. **Revista Brasileira de Biociências**, v. 5, n. 2, p. 933–935, 2007.

LIMA, R. B. DE.; ALVES JÚNIOR, F. T.; OLIVEIRA, C. P. DE; DA SILVA, J. A. A.; FERREIRA, R. L. C. Predicting of biomass in Brazilian tropical dry forest: A statistical evaluation of generic equations. **Anais da Academia Brasileira de Ciências**, v.89, n.3, p.1815-1828, 2017.

LIN, Y. S., MEDLYN, B. E., DUURSMA, R. A., PRENTICE, I. C., WANG, H., BAIG, S., ... & WINGATE, L. Optimal stomatal behaviour around the world. **Nature Climate Change**, v. 5, n. 5, p. 459-464, 2015.

LORENZI, H. **Árvores brasileiras: manual de identificação e cultivo de plantas arbóreas nativas do Brasil**. Nova Odessa: Plantarum, 1992. 352 p.

MACHADO, S. A.; ZAMIN, N. T.; NASCIMENTO, R. G. M.; SANTOS, A. A. P. Efeito de Variáveis Climáticas no Crescimento Mensal de *Pinus taeda* e *Araucaria angustifolia* em Fase Juvenil. **Floresta e Ambiente**, Seropédica, v. 21, n.2, p.170-181, 2014.

MACHADO, S.A.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Dendrometria**. 2. ed. Guarapuava: Unicentro, 2006. 316 p.

MALAVOLTA, E. **Elementos de nutrição mineral de plantas**. São Paulo, Ceres, 1980, 251 p.

MARTINKOSKI, L.; VOGEL, G. F.; JADOSKI, S. O. Influência do clima no crescimento diamétrico de *Araucária angustifolia*: Revisão bibliográfica. **Brazilian Journal of Applied Technology for Agricultural Science**, Guarapuava-PR, v. 8, n. 2, p. 104-111, 2015.

MBOW, C.; VERSTRAETE, M. M.; SAMBOU, B.; DIAW, A. T.; NEUFELDT, H. Allometric models for aboveground biomass in dry savanna trees of the Sudan and Sudan Guinean ecosystems of Southern Senegal. **Journal of Forest Research**, v.19, n.3, p.340–347, 2014.

MIRANDA, D. L. C., PARO, B. A. V., COSTA, G. R. Estimativa do volume em árvores de *Hymenaea coubaril* e *Trattinnickia burserifolia* no norte de Mato Grosso. **Nativa**, v. 2, n. 4, p. 219-223, 2014.

MIRANDA, D. L. C.; JUNIOR, V. B.; GOUVEIA, D. M. Fator de forma e equações de volume para estimativa volumétrica de árvores em plantios de *Eucalyptus urograndis*. **Scientia plena**, v.11, n.3, p.1-8, 2015.

NAVARRO, E. C. Viabilidade econômica do *Calophyllum brasiliense* (Guanandi). **Revista científica eletrônica de engenharia florestal**, v.5, n.9, 2007.

NICOLETTI, M. F.; SILVA, E.; FLORIANI, M. M. P. Metodologia não destrutiva para quantificação do volume e biomassa do fuste em remanescente florestal. **Nativa**, v.3, n.4, p.287-291, 2015.

NYLAND, R. D. Even-to uneven-aged: the challenges of conversion. **Forest ecology and management**, v. 172, n. 2-3, p. 291-300, 2003.

OLIVEIRA, J. M.; ROIG, F. A.; PILLAR, V. D. Climatic signals in tree-rings of *Araucaria angustifolia* in the southern Brazilian highlands. **Austral Ecology**, Carlton, v. 35, n. 2, p. 134-147, 2010.

OUNEKHAM, K. **Developing volume and taper equations For *Styrax tonkinensis* in Laos**. 2009. 77f. Thesis (Degree of Master of Forestry Science) - University of Canterbury, New Zealand, 2009.

PATREZE, C. M.; FELIX, D. B.; SCARANO, F. R.; ALVES-FERREIRA, M. Isolating of a putative glyceraldehyde-3 phosphate dehydrogenase (GAPDH) from *Calophyllum brasiliense*, an important tropical forest tree. **Silvae Genetica**, v.61, n.1/2, p.44-51, 2012.

PEREIRA, A. R., ANGELOCCI, L. R., SENTELHAS, P. C. **Meteorologia Agrícola**. LCE 306. Universidade de São Paulo. Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”. Piracicaba - SP, p. 202, 2007.

PEREIRA, A. S.; CORTEZ, P. A.; DE ALMEIDA, A. A. F.; PRASAD, M. N. V.; FRANÇA, M. G. C.; DA CUNHA, M.; DE JESUS, R. M.; MANGABEIRA, P. A. O. Morphology, ultrastructure, and element uptake in *Calophyllum brasiliense* Cambess.(Calophyllaceae J. Agardh) seedlings under cadmium exposure. **Environmental science and pollution research**, v. 24, n. 18, p. 15576-15588, 2017.

PETIT, B.; MONTAGNINI, F. Growth in pure and mixed plantations of tree species used in reforesting rural areas of the humid region of Costa Rica, Central America. **Forest Ecology and Management**, v. 233, n. 2-3, p. 338-343, 2006.

PETROKOFISKY, G.; KANAMARU, H.; ACHARD, F.; GOETZ, S. J.; JOOSTEN, H.; HOLMGREN, P.; WATTENBACH, M. Comparison of methods for measuring and assessing carbon stocks and carbon stock changes in terrestrial carbon pools. How do the accuracy and precision of current methods compare? A systematic review protocol. **Environmental Evidence**, v.1, n.6, p.1–21, 2012.

PIOTTO, D.; Montagnini, F.; Ugalde, L.; Kanninen, M. Growth and effects of thinning of mixed and pure plantations with native trees in humid tropical Costa Rica. **Forest Ecology and Management**, v. 177, n. 1-3, p. 427-439, 2003.

REDONDO-BRENES, A.; MONTAGNINI, F. Growth, productivity, aboveground biomass, and carbon sequestration of pure and mixed native tree plantations in the Caribbean lowlands of Costa Rica. **Forest Ecology and Management**, v. 232, n. 1-3, p. 168-178, 2006.

RIBASKI, N.G. Conhecendo o setor florestal e perspectivas para o futuro. **Brazilian Journal of Animal and Environmental Research**, v.1, n.1, p.44-58, 2018.

ROMANIUK, D. S. **Modelagem do crescimento e da produção em plantios de *Pinus taeda* L. na região Centro- Sul do Paraná**. 2015. 70f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – UNICENTRO, IRATI, 2015.

RYAN, M. G.; STAPE, J. L.; BINKLEY, D.; ALVARES, C. A. Cross-site patterns in the response of Eucalyptus plantations to irrigation, climate and intra-annual weather variation. **Forest Ecology and Management**, v. 475, p. 118444, 2020.

SALES, F. D. C. V.; DA SILVA, J. A. A.; FERREIRA, R. L. C.; GADELHA, F. H. L. Ajustes de modelos volumétricos para o clone Eucalyptus grandis x E. urophylla cultivados no Agreste de Pernambuco. **Floresta**, v. 45, n. 4, p. 663-670, 2015.

SANQUETTA, C. R.; BALBINOT, R. Métodos de determinação de biomassa florestal. **As florestas eo carbono**, p. 119-140, 2002.

SANQUETTA, C. R.; CORTE, A. P. D.; MOGNON, F.; MAAS, G. C. B.; RODRIGUES, A. L. Estimativa de carbono individual para *Araucaria angustifolia*. **Pesquisa Agropecuária Tropical**, v.44, n.1, p.1-8, 2014.

SANQUETTA, C. R.; WATZLAWICK, L. F.; CORTE, A. P. D.; FERNANDES, L. A. V.; SIQUEIRA, J. D. P. **Inventários florestais: planejamento e execução**. 2ªed. Ed. Curitiba: Multi-Graphic, 2009. 316 p.

SCHEEPERS, G. P.; DU TOIT, B. Soil water deficit as a tool to measure water stress and inform silvicultural management in the Cape Forest Regions, South Africa. **iForest-Biogeosciences and Forestry**, v. 13, n. 6, p. 473, 2020.

SCHIKOWSKI, A. B.; DALLA CORTE, A. P.; SANQUETTA, C. R. Modelagem do crescimento e de biomassa individual de Pinus. **Pesquisa Florestal Brasileira**, v. 33, n. 75, p. 269-278, 2013.

SCHNEIDER, P. R; SCHNEIDER, P. S. P. **Introdução ao Manejo Florestal**. Santa Maria: Ed. FACOS, 2006.526 p.: il.

SCHRÖDER, T.; DOS SANTOS, H. N. A.; ZIMMERMANN, A. P. L.; PEREIRA, L. D.; JUNIOR, D. S. R.; MEYER, E. A.; FLEIG, F. D. Métodos de estimativa de volume comercial para *Eucalyptus grandis*: especificidades e recomendações. **Revista Pesquisa Florestal Brasileira**, v.33, n.73, p.01-07, 2013.

SCOLFORO, J. R. **Biometria Florestal: Modelagem do crescimento e da produção de florestas plantadas e nativas**. Lavras: UFLA/FAEPE; 1998. 441 p.

SCOLFORO, J. R. S. **Modelos para expressar o crescimento e a produção florestal**. Lavras: FAEPE, 1994.

SCOLFORO, J. R. S.; FIGUEIREDO FILHO, A. **Mensuração florestal 2: volumetria**. Lavras: ESAL/FAEPE, 1993. 126p.

SFB - Serviço Florestal Brasileiro. **Florestas e Recursos Florestais: Bens e Serviços que a Floresta Fornece**. Atualização 2019. Brasília: SBF, 2019a. Disponível em: < <https://snif.florestal.gov.br/pt-br/florestas-e-recursos-florestais/169-bens-e-servicos-que-a-floresta-fornece> >. Acessado em: 26 mai. 2022.

SILVA, M. C.; GOERGEN, S. F.; COELHO, M. C. B.; GIONGO, M.; ERPEN, M. L.; DOS SANTOS, A. F. Avaliação de modelos volumétricos para plantio comercial de *Calophyllum brasiliense* Cambess na região sul do estado do Tocantins. **Journal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 6, n. 1, p. 202-208, 2018.

SILVA, M. C.; VIEIRA, A. C.; ATAÍDE, Y. B.; RAMOS, Y. A.; COELHO, M. C. B.; GIONGO, M.; ERPEN, M. L. Volume, funções probabilísticas e produtividade em plantio de *Calophyllum brasiliense* no município de Dueré (TO). **Advances in Forestry Science**, v. 6, n. 2, p. 623-630, 2019.

SOARES, C. P. B.; NETO, F. P.; SOUZA, A. L. **Dendrometria e inventário florestal**. Viçosa: UFV, 2006. 276p.

SOARES, P.; TOMÉ, M. Analysis of the effectiveness of biomass expansion factors to estimate stand biomass. In: HASENAUER, H.; MAKELA, A. (Eds.). **Modeling forest production**. Viena: BOKU University of Natural Resources and Applied Life Sciences, 2004. p. 368-374.

SOMOGYI, S.; WENISCH, T. F.; AILAMAKI, A.; FALSAFI, B.; MOSHOVOS, A. Spatial memory streaming. **ACM SIGARCH Computer Architecture News**, v.34, n.2, p.252-263, 2006.

SOUZA, A. L.; SOARES, C. P. B. **Florestas nativas: estruturas, dinâmica e manejo**. Viçosa, MG: Ed. UFV, 2013. 322p.

SOUZA, A. M.; CARVALHO, D.; VIEIRA, F. A.; NASCIMENTO, L. H.; LIMA, D. C. Estrutura genética e espacial de populações naturais de *Calophyllum brasiliense* Camb. em mata de galeria. **Cerne**, v.13, n.3, p.239-247, 2007.

SOUZA, M. J. H.; RIBEIRO, A.; LEITE, H. G.; LEITE, F. P.; MINUZZI, R. B. Disponibilidade hídrica do solo e produtividade do eucalipto em três regiões da Bacia do Rio Doce. **Revista Árvore**, Viçosa, v. 30, n.3, p. 399-410, 2006.

STEPKA, T.F.; ZENY JÚNIOR, G.A.; LISBOA, G. dos S.; CERQUEIRA, C.L.; PESCK, V.A.; ROIK, M. Modelos volumétricos e funções de afilamento para *Pinus taeda* L. na região dos Campos Gerais, Paraná, Brasil. **Revista Espacios**, v.38, n.21, p.26-35, 2017.

TASHI, S.; KEITEL, C.; SINGH, B.; ADAMS, M. Allometric equations for biomass and carbon stocks of forests along an altitudinal gradient in the eastern Himalayas. **Forestry: An International Journal of Forest Research**, v.90, n.3, p.445-454, 2017.

TETENS, V. O. Über einige meteorologische Begriffe, **Zeitschrift Geophysic**, Wurzburg, v. 6, p. 297-309, 1930.

THORNTHWAITE, C. W.; MATHER, J. R. The Water Balance. **Drexel Institute of Technology** – Laboratory of Climatology, Centerton, 1955.

THORNTHWAITE, C.W. An approach toward a rational classification of climate. **Geographical Review**, v. 38, n. 1, p. 55-94, 1948.

URZEDO, D. I.; FRANCO, M. P.; PITOMBO, L. M.; CARMO, J. B. Effects of organic and inorganic fertilizers on greenhouse gas (GHG) emissions in tropical forestry. **Forest Ecology and Management**, v.310, n.15, p.37-44, 2013.

WATZLAWICK, L. F.; KIRCHNER, F. F.; SANQUETTA, C. R. Estimativa de biomassa e carbono em floresta com araucaria utilizando imagens do satélite Ikonos II. **Ciência Florestal**, v.19, n.2, 169–181, 2009.

WILLMOTT, C.J.; ROWE, C.M.; MINTZ, Y. Climatology of the terrestrial seasonal water cycle. **Journal of Climatology**, 5:589-606, 1985.

ZANON, M. L. B.; FINGER, C. G. Relação de variáveis meteorológicas com o crescimento das árvores de *Araucaria angustifolia* (Bertol.) Kuntze em povoamentos implantados. **Ciência Florestal**, v. 20, n. 3, p. 467-476, 2010.