



**UNIVERSIDADE FEDERAL DE ALAGOAS
CAMPUS DE ENGENHARIAS E CIÊNCIAS AGRÁRIAS
CURSO DE ENGENHARIA FLORESTAL**

EDUARDO VITOR DA SILVA

**PARAMETRIZAÇÃO E CALIBRAÇÃO DO MODELO 3-PG PARA DOIS CLONES
DE EUCALIPTO CULTIVADOS EM DIFERENTES DENSIDADES
POPULACIONAIS**

RIO LARGO, AL

2023

EDUARDO VITOR DA SILVA

**PARAMETRIZAÇÃO E CALIBRAÇÃO DO MODELO 3-PG PARA DOIS CLONES
DE EUCALIPTO CULTIVADOS EM DIFERENTES DENSIDADES
POPULACIONAIS**

Trabalho de Conclusão de Curso - TCC
apresentado a Universidade Federal de Alagoas –
UFAL, Campus de Engenharias e Ciências
Agrárias - CECA, como pré-requisito para
obtenção do grau de Bacharel(a) Engenheiro(a)
Florestal.

Orientador(a): Prof. Dr. Alessandro Claudio dos
Santos Almeida

RIO LARGO, AL

2023

Catálogo na Fonte
Universidade Federal de Alagoas
Biblioteca Campus de Engenharias e Ciências Agrárias
Bibliotecário Responsável: Erisson Rodrigues de Santana - CRB4 - 1512

S586p Silva, Eduardo Vitor da.

Parametrização e calibração do modelo 3-PG para dois clones de eucalipto cultivados em diferentes densidades populacionais. / Eduardo Vitor da Silva. – 2023.

57f.: il.

Orientador(a): Alexsandro Claudio dos Santos Almeida.

Trabalho de Conclusão de Curso (Bacharelado em Engenharia Florestal) – Graduação em Engenharia Florestal, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias, Universidade Federal de Alagoas. Rio Largo, 2023.

Inclui bibliografia

1. Eucaliptocultura. 2. Modelo ecofisiológico. 3. Planejamento florestal. I. Título.

CDU: 630*2

FOLHA DE APROVAÇÃO

Eduardo Vitor da Silva

PARAMETRIZAÇÃO E CALIBRAÇÃO DO MODELO 3-PG PARA DOIS CLONES DE EUCALIPTO CULTIVADOS EM DIFERENTES DENSIDADES POPULACIONAIS

Trabalho de Conclusão de Curso - TCC apresentado a Universidade Federal de Alagoas – UFAL, Campus de Engenharias e Ciências Agrárias - CECA, como pré-requisito para obtenção do grau de Bacharel(a) Engenheiro(a) Florestal.

Data de Aprovação: 28 / 08 / 2023.

Banca Examinadora

Prof. Dr. Alexsandro Claudio dos Santos Almeida
Universidade Federal de Alagoas – UFAL
Campus de Engenharias e Ciências Agrárias – CECA
(Orientador)

Prof. Dr. Clayton Alcarde Alvares
Empresa Suzano S.A.
Universidade Estadual Paulista Júlio de Mesquita Filho – UNESP
Faculdade de Ciências Agrônomicas - Campus de Botucatu – FCA

Prof. Dr. Rodrigo Eiji Hakamada
Universidade Federal Rural de Pernambuco – UFRPE

AGRADECIMENTOS

Á Deus por estar sempre presente na minha vida.

Á minha querida mãe e meu irmão, Adriana e Edval, que sempre acreditaram em minha perseverança e que tornaram tudo possível.

Ao Moacir Monteiro e Graça Monteiro que acreditaram em mim durante minha trajetória na graduação, cociliando com o trabalho em sua empresa.

Ao professor Alexsandro Claudio dos Santos Almeida, pelos valiosos ensinamentos, pelo exemplo de simplicidade, história de vida dentro da universidade, pelo apoio e confiança durante esses anos.

Aos meus amigos de graduação e de trabalho, por todos os momentos alegres, importantes para encarar todas as dificuldades encontradas pelo caminho, jamais me esquecerei de vocês e de sua importância para a conquista de mais esta etapa.

Aos membros da banca examinadora, por terem aceitado o convite de participar da avaliação deste trabalho contribuindo com sugestões.

A Pró-reitoria de Pesquisa e Pós-Graduação da Universidade Federal de Alagoas pelo auxílio financeiro durante meus ciclos de iniciação científica.

Ao Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas, pela oportunidade do curso.

A todos que direta ou indiretamente contribuíram para a realização deste trabalho.

Que a graça e a misericórdia de Deus nos acompanhem em todos os dias das nossas vidas.

A paz de Deus a todos.

Amém!

RESUMO

No estado Alagoas, cerca de 18.700 hectares são destinados à produção de eucalipto, sendo os plantios cultivados em diferentes condições edafoclimáticas. Diversos fatores influenciam os processos ecofisiológicos das árvores e a produtividade florestal (disponibilidade hídrica e nutricional, densidade populacional, tratos silviculturais e condições edafoclimáticas locais), devido à interação genótipo-ambiente. Modelos baseados em processos ecofisiológicos são ferramentas úteis para auxiliar no planejamento das empresas florestais, pois correlacionam tais fatores para gerar estimativas da produtividade florestal. Portanto, o presente trabalho objetivou avaliar a eficiência do modelo 3-PG em clones de eucalipto cultivados em Alagoas sob diferentes densidades de plantio. O modelo foi testado para a região da zona da mata de Alagoas, que concentra os cultivos florestais no estado, com dados de um experimento conduzido no município de Rio Largo. A parametrização foi realizada utilizando a base de dados do experimento junto a pesquisa bibliográfica considerando condições de cultivo e material genético semelhantes enquanto a calibração foi realizada de forma manual considerando a amplitude observada na literatura, dos parâmetros considerados sensíveis no modelo. Com o modelo parametrizado e calibrado, foram feitas simulações para estimar o crescimento da altura total (h), do diâmetro a altura do peito (d), do volume (v) e do incremento médio anual de madeira (IMA) de dois clones de eucalipto (I144 e VE41) cultivados em três densidades populacionais (1.666, 1.111 e 833 plantas por hectare). A acurácia do modelo foi averiguada por meio de análise gráfica, correlação linear (R), coeficiente de determinação (R²), erros padrões absoluto (S_{xy}) e relativo (S_{xy}%) e eficiência do modelo. Graficamente os valores estimados pelo modelo 3-PG para as variáveis altura total, diâmetro a altura do peito, volume e incremento médio anual de madeira, aproximaram-se dos observados em campo. Na avaliação da eficiência do modelo, os valores estimados não diferiram estatisticamente dos valores medidos, com exceção do tratamento do clone I144 sob a densidade de plantio de 833 arv.ha⁻¹. Conclui-se que o modelo 3-PG é eficiente para estimar as variáveis h, d, v e IMA dos dois clones e três espaçamentos testados na região de estudo.

Palavras-Chave: eucaliptocultura; modelo ecofisiológico; planejamento florestal.

ABSTRACT

In the state of Alagoas, around 18.700 hectares are destined to the production of eucalyptus, with plantations cultivated in different edaphoclimatic conditions. Several factors affect the ecophysiological processes of trees and forest productivity (water and nutritional availability, population density, silvicultural treatments and local edaphoclimatic conditions), due to the genotype-environment interaction. Models based on ecophysiological processes are useful tools to assist in the planning of forest companies, as they correlate such factors to generate yields from forest productivity. Therefore, the present work aimed to evaluate the efficiency of the 3-PG model in eucalyptus clones cultivated in Alagoas under different planting densities. The model was tested for the Zona da Mata region of Alagoas, which concentrates forest crops in the state, with data from a controlled experiment in the municipality of Rio Largo. The parameterization was carried out using the experiment's database together with the bibliographical research considering similar cultivation conditions and genetic material while the therapy was performed manually considering the amplitude observed in the literature, of the criteria received in the model. With the model parameterized and calibrated, simulations were performed to estimate the growth of total height (h), diameter at breast height (d), volume (v) and average annual wood increment (IMA) of two clones of eucalyptus (I144 and VE41) grown at three population densities (1,666, 1,111 and 833 plants per hectare). The accuracy of the model was verified through graphical analysis, intuitive linear (R), direction coordinate (R²), absolute (S_{xy}) and relative (S_{xy}%) patterns and model efficiency. Graphically, the values estimated by the 3-PG model for the variables total, diameter at breast height, volume and average annual wood increment, approximated the heights observed in the field. In evaluating the efficiency of the model, the estimated values did not differ statistically from the measured values, with the exception of the treatment of clone I144 under the planting density of 833 arv.ha-1. It is concluded that the 3-PG model is efficient to estimate the variables h, d, v and IMA of the two clones and three spacings tested in the study region.

Key words: eucalyptus culture; ecophysiological model; forest planning.

LISTA DE FIGURAS

Figura 1. Estrutura básica do modelo 3-PG e as influências causais de suas variáveis e processos. Fonte: Vergara (2013).	17
Figura 2. Localização da área experimental no Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas (CECA/UFAL), em Rio Largo, Tabuleiros Costeiros, no estado de Alagoas. Fonte:Autor.....	18
Figura 3. Classificação dos solos do estado de Alagoas e da área experimental no Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas (CECA/UFAL), em Rio Largo. Fonte:Autor.	19
Figura 4. Croqui para reconhecimento dos materiais genéticos e espaçamentos do plantio de eucalipto no Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas. Fonte:Autor.....	20
Figura 5. Medição da altura total das árvores (a) e da circunferência a altura do peito (b). Fonte:Autor.....	21
Figura 6. Abate da árvore para avaliação de cubagem rigorosa (a), medição das circunferências em diferentes alturas da árvore (b), Suta e bastão (c) e medição de diâmetros em diferentes alturas utilizando metodologia de cubagem da árvore em pé (d). Fonte:Autor.	22
Figura 7. Distribuição mensal das variáveis precipitação, temperatura máxima (°C) e temperatura mínima (°C) para o município de Rio Largo – AL. Fonte:Autor.....	37
Figura 8. Distribuição mensal da radiação solar global (MJ/m ²) para o município de Rio Largo – AL. Fonte:Autor.....	38
Figura 9. Variação mensal do armazenamento de água no solo (ARM) e capacidade de água disponível (CAD) para área de estudo no município de Rio Largo – AL. Fonte:Autor.....	39
Figura 10. Valores observados e estimados(3-PG) para a variável altura total média para os clones I144 e VE41 cultivados nas densidades de populacionais 1.666, 1.111 e 833 árvores por hectare. Fonte:Autor.....	42
Figura 11. Valores observados e estimados(3-PG) para a variável diâmetro altura do peito médio para os clones I144 e VE41 cultivados nas densidades de populacionais 1.666, 1.111 e 833 árvores por hectare. Fonte:Autor.	44
Figura 12. Valores observados e estimados(3-PG) para a variável volume de madeira para os clones I144 e VE41 cultivados nas densidades de populacionais 1.666, 1.111 e 833 árvores por hectare. Fonte:Autor.....	47

Figura 13. Valores observados e estimados(3-PG) para a variável incremento médio anual para os clones I144 e VE41 cultivados nas densidades de populacionais 1.666, 1.111 e 833 árvores por hectare. Fonte:Autor. 49

LISTA DE TABELAS

Tabela 1. Atributos físico-hídricos do solo da área experimental do CECA/UFAL, em Rio Largo, Tabuleiros Costeiros, no estado de Alagoas. Fonte:Autor.	19
Tabela 2. Equações volumétricas testadas para estimar o volume individual de madeira das árvores. Fonte:Autor.	23
Tabela 3. Equações volumétricas ajustadas para estimar o volume individual de madeira das árvores. Fonte:Autor.	23
Tabela 4. Parâmetros de partição de biomassa obtidos na literatura considerando o material genético, condições edafoclimáticas e cultivo para aprimoramento na calibração.	26
Tabela 5. Parâmetros da área de estudo, necessários para inicialização do modelo 3-PG.	27
Tabela 6. Dados climáticos obtidos na estação agrometeorológica do CECA-UFAL entre os meses de setembro de 2017 a setembro de 2022. Fonte:Autor.	29
Tabela 7. Parâmetros utilizados para realizar as simulações do crescimento de clones de eucalipto em Rio Largo – AL. Fonte:Autor.	31
Tabela 8. Equações alométricas ajustadas para utilização no modelo 3-PG. Fonte:Autor.	40
Tabela 9. Estatísticas de precisão do modelo 3-PG ao simular a altura total, diâmetro a altura do peito, volume e incremento médio anual de madeira. Fonte:Autor.	49
Tabela 10. Análise estatística da eficiência do modelo 3-PG ao simular o crescimento em h, d, v e IMA. Fonte:Autor.....	51

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	9
2. REFERENCIAL TEÓRICO	11
2.1 O modelo 3-PG	11
2.1.1 Produção Primária Líquida (PPL) e Produção Primária Bruta (PPB)	12
2.1.2 Alocação de Biomassa/Carbono	14
2.1.4 Balanço de Água no Solo	16
3. MATERIAL E MÉTODOS	17
3.1 Descrição da área de estudo	17
3.2 Coleta e tratamento dos dados	21
3.3 Parametrização do Modelo 3-PG	24
3.4 Calibração do Modelo 3-PG	28
3.5 Análise Estatística	35
4. RESULTADOS E DISCUSSÃO	37
4.1 Condições Ambientais	37
4.2 Equações alométricas ajustadas	39
4.3 Simulações para variável Altura (h)	40
4.4 Simulações para variável diâmetro a altura do peito (d)	42
4.5 Simulações para a variável volume de madeira (v)	45
4.6 Simulações para a variável incremento médio anual (IMA)	47
4.7 Eficiência estatística do Modelo 3-PG	50
5. CONCLUSÃO	52
REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS	52
7. APÊNDICE	58

1. INTRODUÇÃO

Os cultivos florestais no Brasil, se iniciaram na primeira década do século XX por meio de Navarro de Andrade que trouxe o gênero *Eucalyptus* para servir de matéria prima para produção de dormentes utilizados na construção de estradas de ferro (FLORIANO, 2018). Até a primeira metade da década de 60, o Brasil contava apenas com cerca de 500 mil hectares cultivados de florestas, até que em 1966 foi promulgada a Lei nº 5.106, trazendo como benefícios aos produtores, incentivos fiscais, permitindo a aplicação de parte do imposto de renda em reflorestamento. Na sequência, em 1970 veio o decreto nº 1.134 que permitia também a participação acionária de empresas de base florestal com incentivos fiscais, aumentando vertiginosamente a área de florestas plantadas para 5,5 milhões de hectares em todo país até o ano de 1980. Segundo o IBGE (2018), até dezembro de 2016, já se registrava 10 milhões de hectares, sendo 7,5 milhões de hectares de Eucaliptais, 2,1 milhões de hectares do gênero *Pinus* e parte de outras espécies florestais de interesse econômico.

No estado de Alagoas a cana-de-açúcar foi o principal monocultivo implantado, tendo início em 1850, e com a implantação de engenhos e a indústria sulcoalcooleira que vieram a tornar a base da economia alagoana até a década de 1960, fazendo com que no ano de 2014, a agroindústria representasse 22% do PIB do estado (FLORIANO, 2018). Porém, nas últimas décadas alguns fatores como desvalorização do produto (açúcar), topografia irregular de áreas agricultáveis, mecanização da colheita e a crise econômica que o setor sucroalcooleiro alagoano tem enfrentado, resultou-se em uma busca de diversificação de cultivo com implantações de eucaliptais no estado (LIMA, 2020). Essa alternativa trouxe a possibilidade de aproveitar áreas não-mecanizáveis, unindo rentabilidade á sustentabilidade do meio ambiente.

Alagoas é um estado com grande potencial florestal, haja vista as suas condições de clima e solo, e por isso, a eucaliptocultura é uma atividade que vêm se mostrando promissora, especialmente na zona da mata, onde a área total plantada já soma cerca de 18.700 hectares (SAMPAIO, 2021), além de contar com uma área potencial cultivável de 150 mil ha (FLORIANO, 2018). Porém, as condições em que o eucalipto está sendo cultivado no estado, são diversas, o que levou a Federação das Indústrias do Estado de Alagoas (FIEA) junto com algumas empresas a instalar experimentos na mesorregião leste. Esses experimentos têm mostrado que há alta variabilidade produtiva entre os materiais genéticos, com variação de 20 a 80 m³.ha⁻¹.ano⁻¹ por ano (FIEA, 2018) nas diferentes condições edafoclimáticas de Alagoas,

provavelmente devido à interação genótipo-ambiente-manejo silvicultural (ALMEIDA e SANDS, 2015; STAPE et al., 2008). Alguns dos clones implantados indicaram alta produtividade, chegando a alcançar quase o dobro da média nacional de incremento médio anual, que no ano de 2018 era de cerca de $36 \text{ m}^3 \cdot \text{ha}^{-1} \cdot \text{ano}^{-1}$ (FIEA, 2018; IBÁ, 2019).

Como a região se encontra entre os trópicos, os fatores abióticos apresentam significativa influência na produção florestal, como a água e os nutrientes minerais (PARA & COMERFORD, 2002). Para determinar o material genético mais adequado para um local específico, e que haja a produção máxima quando estes fatores estão disponíveis, é necessário conhecer a demanda hídrica e nutricional do cultivo (BORGES, 2009). Além disso, é necessário conhecer também outras características como ecofisiologia, processos fisiológicos da floresta (MARSDEN et al., 2013) e a influência da densidade populacional (FLORIANO, 2018; BALLONI & SIMÕES, 1980), permitindo a avaliação dos efeitos desses fatores na previsão do crescimento florestal.

Uma alternativa para prognosticar o crescimento florestal considerando tais fatores, é através de modelos baseados em processos. Na área de crescimento e produção florestal, a modelagem matemática pode ser entendida como a representação de sistemas biológicos, que incorporam conhecimentos sobre mecanismos fisiológicos e ecológicos por meio de algoritmos preditivos (JOHNSEN et al., 2001). Os modelos ecofisiológicos determinam a produtividade com base nos fatores determinantes da produtividade (radiação solar, temperatura, déficit de pressão de vapor, água e nutrientes) e são mais eficientes na caracterização das produtividades em condições de maior variabilidade climática, uma vez que estimam a produtividade e o crescimento frente aos impactos de mudanças ambientais ou de manejo (STAPE et al. 2004b; LONDERO et al., 2017; OLIVEIRA et al., 2018). Diversos modelos baseados em processos ecofisiológicos LINKAGES (PASTOR & Post, 1991), MAESTRO (Wang & Jarvis, 1990), FOREST – BCG (Running & Gower, 1991) têm sido idealizados para estimar a produtividade de povoamentos florestais. Porém, tendo em vista a complexidade relacionado aos processos fisiológicos da floresta, e do tratamento a eles dado, o número e os tipos de parâmetros de entrada para a operação desses modelos é elevado, fato que constrói um obstáculo à sua utilização prática.

No Brasil, o modelo 3-PG (*Physiological Principles Predicting Growth*) desenvolvido por Landsberg e Waring (1997), vem sendo empregado como ferramenta central em um sistema de gestão de florestas (ALMEIDA et al., 2003) e utilizado em diversos trabalhos realizados em diferentes estados da federação como: Amapá (Rascon, 2012), Pará (Behling et al., 2011), Bahia

(Stape et al., 2004; Lim et al. 2018), Minas Gerais (Borges, 2009; Silva, 2006), Espírito Santo (Almeida, et. al, 2004), São Paulo (Lemos, 2012) e Rio Grande do Sul (Londero, 2015; Cavalli, 2017). Sumariamente, este modelo foi desenvolvido para preencher a lacuna entre o crescimento e rendimento convencionais baseados em mensuração e os modelos de balanço de carbono baseado em processos. O modelo calcula a energia radiante absorvida pelo dossel e converte em produção de biomassa, e a eficiência da conversão de radiação é influenciada pelos efeitos da nutrição, armazenamento de água no solo (balanço hídrico), déficit de pressão de vapor atmosférico e a idade do povoamento. O carbono produzido pelo dossel é alocado para folhas, caules e raízes, usando equações dinâmicas que atualizam o estado do sistema em uma escala de tempo mensal.

Os modelos de crescimento ecofisiológicos, corretamente parametrizados e calibrados, vêm se mostrando como ferramentas práticas e que apresentam bons desempenhos para predizer crescimento de florestas em vários países do mundo que adotaram a sua utilização. Assim, é importante a adequação desses modelos às condições locais de manejo silvicultural (DP e adubação) e para os clones mais utilizados nos cultivos florestais do estado. Portanto, esse trabalho objetivou parametrizar e calibrar o modelo 3-PG para a estimativa do crescimento das variáveis diâmetro a altura do peito (d), altura total (h), Volume (V) e incremento médio anual (IMA) de madeira de dois clones de eucalipto cultivados sob três diferentes espaçamentos.

2. REFERENCIAL TEÓRICO

2.1 O modelo 3-PG

O modelo 3-PG é classificado como processual, ou seja, considera os processos ecofisiológicos do cultivo e as relações estatísticas entre as variáveis estudadas. O modelo é composto por cinco submodelos, são eles: assimilação de carboidratos produto da fotossíntese, alocação do carbono produzido para os compartimentos (raíz, caule e folhas), mortalidade de árvores, balanço hídrico e caracterização das variáveis dendrométricas (BORGES, 2009). As principais variáveis de entrada para execução do modelo são: de clima (temperatura, radiação e precipitação); de solo (fertilidade, textura, disponibilidade de água); de planta (biomassa inicial de lenho, folhas e raízes, população de árvores, coeficientes das equações alométricas, volume e a altura total); e fisiológicas (eficiência quântica máxima do dossel, condutância estomática do dossel, relação produção primária líquida e produção primária bruta) (SANDS,

2004; OLIVEIRA et al., 2018). As condições climáticas do sítio de simulação variam no espaço-tempo, e por isso, é importante realizar a caracterização climática mais próxima do real (SILVA, 2021), desta forma, os dados climáticos devem ser obtidos preferencialmente em uma estação agrometeorológica mais próxima do plantio e em escala mensal, formato requerido pelo modelo.

2.1.1 Produção Primária Líquida (PPL) e Produção Primária Bruta (PPB)

No modelo 3-PG a produção primária bruta é obtida por meio dos valores de radiação fotossinteticamente ativa incidente (RFA) e da eficiência quântica do dossel medidas em mol/m² e mol/mol, respectivamente. A RFA que atinge o dossel é calculada pela relação de que a cada 1 MJ de radiação solar equivale a 2,3 mols de RFA. Já a radiação fotossinteticamente ativa absorvida (RFAA) pelo dossel é determinada considerando o índice de área foliar (IAF) e a RFA, através da lei de Beer, que relaciona estas variáveis com queda exponencial da luz na trajetória vertical que a mesma percorre sobre a cobertura do dossel. A equação que descreve tal decréscimo é a de extinção de luz proposta por Lambert-Beert e modificada por Monsi e Saeki (1953).

$$I_z = I_0 \cdot e^{-k \cdot IAF} \quad (1)$$

Em que:

I_z = intensidade da radiação a uma determinada altura dentro da cobertura vegetal;

I_0 = intensidade da radiação no topo da cobertura vegetal, representa a RFA;

k = coeficiente de extinção ou atenuação, representa o grau de diminuição da radiação no interior da cobertura vegetal, seja por absorção ou espalhamento;

IAF = soma total da superfície foliar, de cima para baixo, até a altura z , por unidade de área de solo (IAF acumulado).

Após calculada a RFAA, o modelo estima a quantidade de carbono fixado por unidade de energia (fótons), que é representada pela eficiência quântica do dossel (α_c). A eficiência com que é feita a conversão é expresso por meio do valor de eficiência quântica máxima do dossel

(α_{cx}) e considera as restrições impostas pelos limitadores de crescimento, déficit de pressão de vapor (f_{DPV}), temperatura (f_T), dias de geada (f_F), disponibilidade de água (f_A) e nutrientes (f_N) e idade do povoamento (f_I). Estes parâmetros são incorporados em forma de produto no modelo 3-PG, e os valores variam numa escala de 0 a 1, sendo as condições de alta ou nenhuma limitação do crescimento, respectivamente.

$$\alpha_c = \alpha_{cx} * f_T * f_F * f_N * \Phi (f_{DPV}, f_A, f_I) \quad (2)$$

O modulador fisiológico (Φ) é composto pelos moduladores, balanço hídrico (f_A), déficit de pressão de vapor (f_{DPV}) e idade do povoamento (f_I).

$$\Phi = f_I * \min\{f_{DPV}, f_A\} \quad (3)$$

Na composição do modulador fisiológico (Φ), os moduladores f_{DPV} e f_A atuam considerando a limitação mais restritiva, ou seja, o modulador de menor valor será o que limitará o crescimento no período de estimativa simulado (LANDSBERG et al., 2001; BORGES, 2009; VERGARA, 2013). Após a consideração de todas essas limitações impostas pelo ambiente, por meio dos moduladores, o 3-PG estima o relacionamento entre a produção primária bruta (PPB) e RFAA:

$$PPB = \alpha_c * RFAA \therefore PPB = \alpha_{cx} * f_T * f_F * f_N * \Phi (f_{DPV}, f_A, f_I) * RFAA \quad (4)$$

Subsequentemente, o modelo considera que em cada 1 g de matéria seca (biomassa vegetal) existem 0,5 g de carbono, consequentemente, para cada 1 mol de carbono fixado são gerados 24 g de matéria seca vegetal (massa molar do carbono é igual 12 g). Após os fatores de conversão serem aplicados nas unidades, a PPB é expressa em t/ha de matéria seca vegetal. Segundo Gifford (2001), a relação entre Produção Primária Líquida e Produção Primária Bruta equivale a um coeficiente de eficiência de uso do carbono, e essa relação (PPL/PPB) tem variado pouco entre os diversos tipos de florestas, permanecendo numa amplitude entre 0,40 a 0,50 (LANDSBERG E WARING, 1997). Esta faixa de valores foi derivada dos trabalhos (SCHULZE et al., 1977; BENECKE e EVANS, 1987; WARING et al., 1995; RYAN et al., 1996a; WILLIAN et al., 1997) citados por Landsberg e Waring (1997). Esse relacionamento facilita os cálculos e elimina algumas das interferências referentes à necessidade de calcular às perdas de carbono via respiração, cujas medições são difíceis de serem feitas e não há

disponibilidade na literatura de dados medidos para a referida variável (PPL/PPB), para florestas plantadas de eucalipto no Brasil. Desta forma, é justificável adotar esse intervalo de valores para o relacionamento PPL/PPB, pois, o erro é menor do que o cálculo de perdas na respiração (LANDSBERG E WARING, 1997).

2.1.2 Alocação de Biomassa/Carbono

A alocação da PPL é realizada primeiramente para as raízes, e é determinada de acordo com as condições de crescimento do sítio, sendo função da disponibilidade de água no solo, déficit de pressão de vapor e fertilidade do solo. Assim, no modelo, a fertilidade do solo, além de influenciar a eficiência quântica máxima do dossel, também influencia a alocação de carboidratos para o sistema radicular, por meio da variável “m”, que depende, linearmente, da taxa de Fertilidade do Solo (FR):

$$m = m_0 + (1 - m_0) * FR \quad (5)$$

Na equação acima, a variável “ m_0 ” corresponde ao valor de “m” em solos de baixa fertilidade (FR = 0), que neste caso seria igual a 0. O valor de FR varia de 0 (condição de alta limitação) a 1 (sem limitação) e é obtido empiricamente, baseando-se em características físicas e químicas do solo, e dados sobre crescimento florestal, além da própria experiência do manejador florestal. O valor de “m” é incluído na equação empírica que calcula a alocação de carboidratos para as raízes:

$$n_R = \frac{n_{Rx} * n_{Rn}}{n_{Rn} + (n_{Rx} - n_{Rn}) * m\phi} \quad (6)$$

Onde:

n_R = Coeficiente de alocação para raízes;

n_{Rx} = Valor máximo do coeficiente de alocação para raízes;

n_{Rn} = Valor mínimo do coeficiente de alocação para raízes

ϕ = Modulador fisiológico

Quanto maior a limitação hídrica e/ou nutricional, (f_A e f_N tendendo a 0), maior será o coeficiente de alocação de carbono para as raízes (n_R), em acordo com princípios bem

estabelecidos por Beets & Whitehead (1996) e Landsberg & Gower (1997) citados por Sands & Landsberg (2002).

Os coeficientes de alocação de carbono para folhas (nF), e para material lenhoso, (tronco e galhos) chamado de nS , variam com as condições de crescimento do local, mas também dependem do crescimento da árvore média do povoamento, de tal maneira que nF declina e nS aumenta com a idade das plantas. No 3-PG, a partição da biomassa da parte aérea está baseada em relacionamentos alométricos entre a biomassa de folhas e tronco e o diâmetro a 1,30 m de altura do solo (Diâmetro Altura do Peito (DAP)). Dessa forma, a razão de partição entre a biomassa de folha e tronco ($pFS = nF/nS$), é uma função alométrica do DAP.

$$pFS = a_p * dap^{n_p} \quad (7)$$

Com relação à equação de partição (equação 7) os parâmetros a_p e n_p são obtidos com base nas equações 8 e 9 abaixo.

$$n_p = \frac{\ln(pFS_{20}/pFS_2)}{\ln(20/2)} \quad (8)$$

$$a_p = \frac{pFS_2}{2^{n_p}} \quad (9)$$

Onde: pFS_2 e pFS_{20} : Correspondem ao valor de biomassa entre folhas e tronco para os diâmetros 2 e 20 cm respectivamente.

Depois de calculado o valor de partição da biomassa entre folhas e tronco (pFS) para um diâmetro qualquer e também calculado o valor do coeficiente de alocação de carbono para raiz (nR) calcula-se o coeficiente de alocação de carbono para tronco (nS) com base na equação 3.10, onde:

$$n_s = \frac{(1 - n_R)}{(1 + pFS)} \quad (10)$$

O valor do coeficiente de alocação de biomassa para as folhas (nF) é calculado por diferença entre os valores dos coeficientes de alocação de biomassa para raiz e tronco.

$$n_F = 1 - n_R - n_S \quad (11)$$

A partir dessas informações, o modelo estima, em intervalos mensais ou anuais, a biomassa de tronco, folhas e raízes (t/ha), o diâmetro do tronco (cm), a área basal (m²/ha), o volume de lenha (m³/ha), o incremento da lenha médio anual (m³/ha/ano), o IAF (m²/m²), o balanço de água no solo (mm), a queda de “serapilheira” (t/ha) e a ciclagem radicular (t/ha).

2.1.3 Evolução do Número de Árvores

A competição dentro do sítio de crescimento é um fator importante a ser considerado, pois afeta o a caracterização dendrométrica das árvores médias dentro do povoamento, e por isso têm-se buscado descrever a relação entre o tamanho desses indivíduos e a densidade populacional ao longo do tempo (Schneider et. al, 2014). Dessa forma, a variação na quantidade de árvores do povoamento ao longo do tempo é calculada através do sub-modelo derivado da lei dos 3/2 e taxas de crescimento de troncos. Recorre à equação que determina a alocação do carbono para as folhas e tronco e as restrições aos padrões de crescimento. Um limite superior (W_{sx} (Kg_{DM}/árvore)) da biomassa de troncos (WS) é calculado para um determinado valor de densidade do povoamento (N). A lei do auto-desbaste é parametrizada por uma estimativa de W_{sx} para árvore média em povoamentos em auto-desbaste. Se, num dado momento, a biomassa do tronco da árvore média é maior que W_{sx} , a população é reduzida até um número consistente com W_{sx} . Uma vez que a mortalidade altera tanto o número de árvores como a biomassa, pode ser necessário recorrer a uma aplicação iterativa da lei do auto-desbaste para assegurar que a lei é cumprida para o novo estado. Quando há remoção de árvores, assume-se que cada tronco retirado tem aproximadamente 20% da biomassa do tronco médio e que não ocorre perda de folhas. Isto simula o fato de que as árvores que morrem, são normalmente as mais fracas, menores, e com poucas folhas (Sands e Landsberg, 2002).

2.1.4 Balanço de Água no Solo

O 3-PG inclui um modelo simples de balanço de água no solo, que trabalha em escala mensal. À precipitação mensal mais irrigação (opcional) contrapõem a evapotranspiração, que é calculada através da equação de Penman-Monteith (Landsberg e Gower, 1997). A interceptação pela copa é uma percentagem fixa da precipitação, mas dependendo de determinado valor alcançado, ser função do índice de área foliar. Quando o solo atinge a capacidade de campo, o excesso de água é perdido por meio escoamento superficial. Assume-se que o déficit de pressão

de vapor (f_{DPV}), a água disponível no solo (f_{SW}) e a idade do povoamento (f_{AGE}) afetam a condutância dos estomas. A condutância da copa (gC (m/s)) é determinada a partir de uma condutância dos estomas potencial que é ajustada pelo modificador da idade (f_{AGE}) e pelo menor dos modificadores ambientais f_{SW} e f_{DPV} , e aumenta com o aumento do IAF até ao máximo da condutância da copa (gCx (m/s)).

Na Figura 1, é mostrado o conceito geral do modelo 3-PG com os seus cinco submodelos simples: a produção de biomassa, a alocação de biomassa entre as folhas, as raízes e o tronco a mortalidade de tronco, o balanço hídrico do solo e a conversão de biomassa de tronco em variáveis de interesse para gestores florestais.

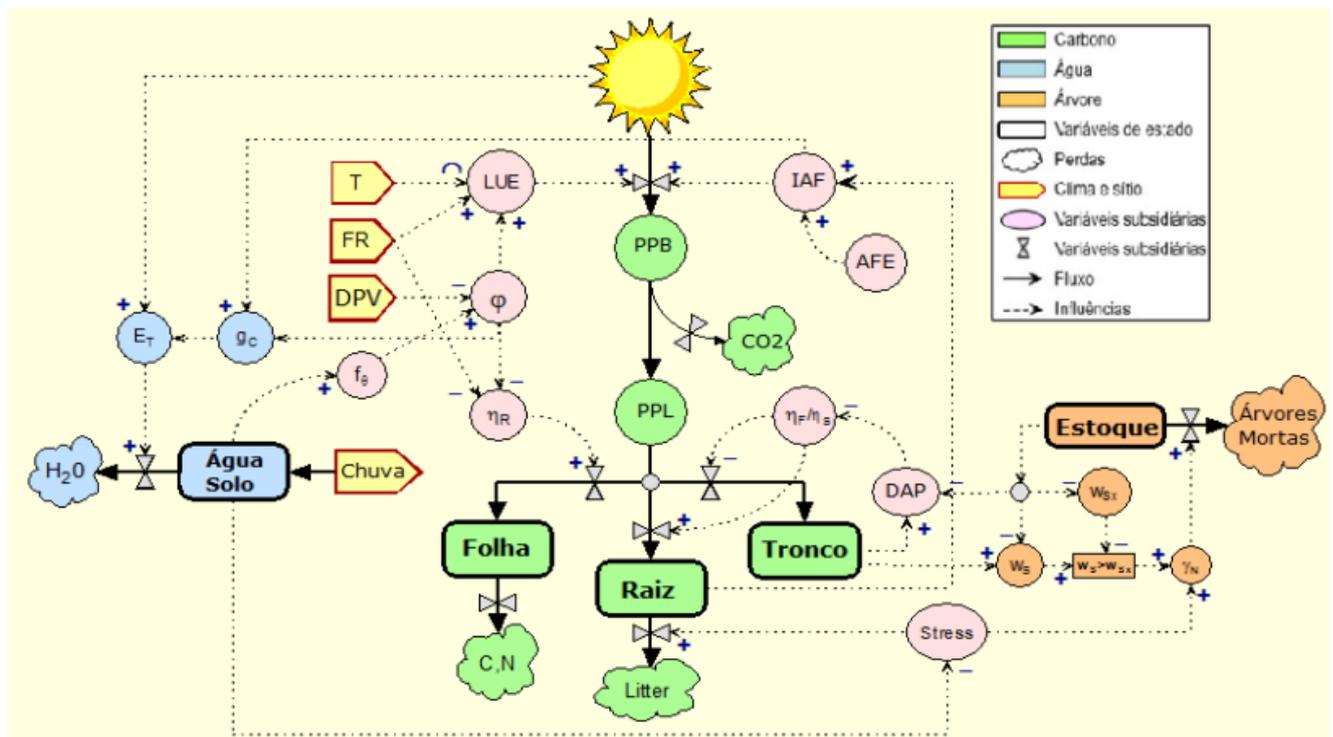


Figura 1. Estrutura básica do modelo 3-PG e as influências causais de suas variáveis e processos. Fonte: Vergara (2013).

3. MATERIAL E MÉTODOS

3.1 Descrição da área de estudo

Este estudo foi realizado utilizando dados de um cultivo de eucalipto conduzido na área experimental do Centro de Engenharias e Ciências Agrárias (CECA) da UFAL, localizado no município de Rio Largo, Alagoas, Brasil (09° 28' 02'' S e 35° 49' 43'' W). A região fica no

centro das principais regiões produtoras de eucalipto no Estado (Figura 2). A eucaliptocultura alagoana é desenvolvida majoritariamente nas microrregiões dos Tabuleiros Costeiros e Zona da Mata, com predominância de clima caracterizado como quente e úmido (B1), megatérmico (A'), com deficiência de água moderada no verão (s) e grande excesso de água no inverno (w2) (Thorntwaite e Mather, 1955). Sendo que, 70% dos 1.800 mm de precipitação média anual total ocorre no período chuvoso, compreendido entre os meses de abril e agosto (SOUZA et al., 2004; FERREIRA JÚNIOR, 2014). A temperatura média anual do ar é de 25,4 °C do ar com mínimas de 19,3 °C em agosto e máximas de 31,7 °C em janeiro.

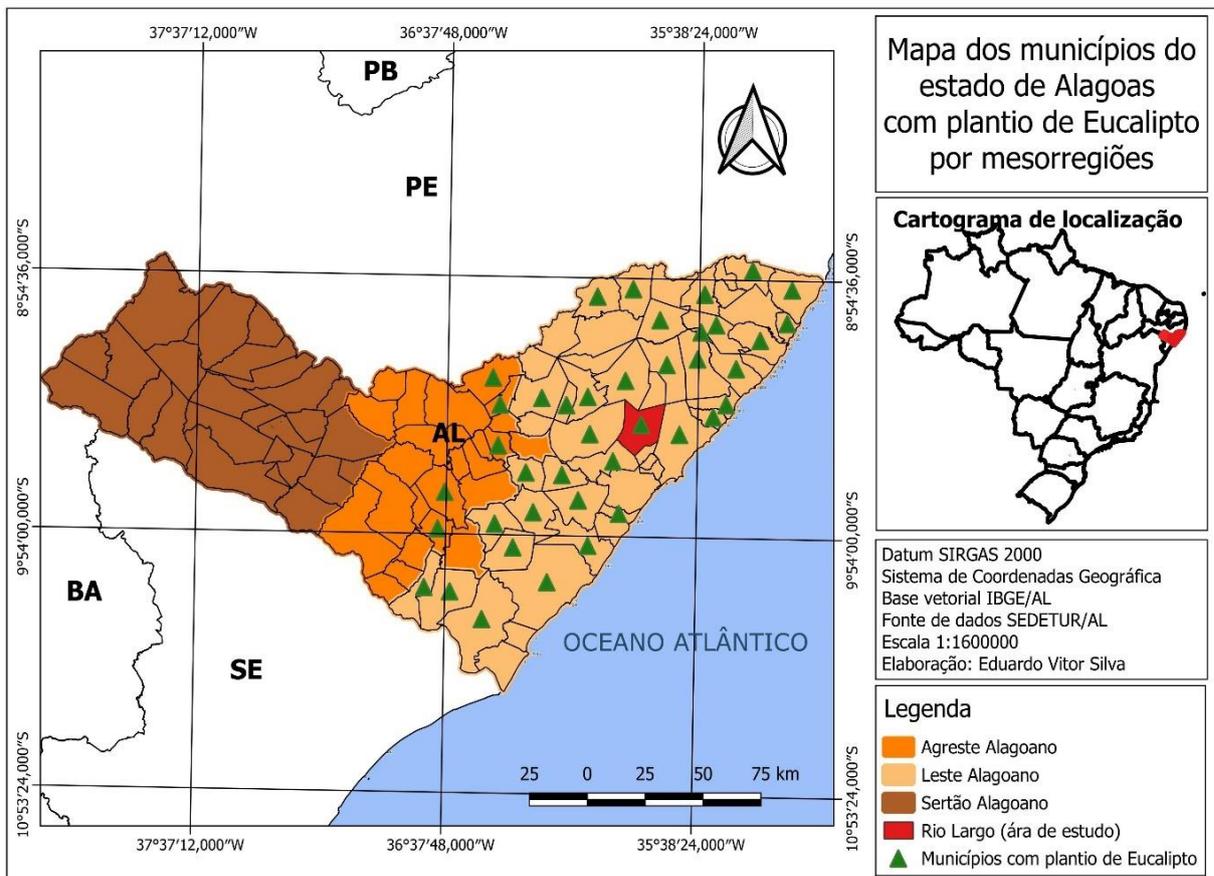


Figura 2. Localização da área experimental no Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas (CECA/UFAL), em Rio Largo, Tabuleiros Costeiros, no estado de Alagoas. Fonte:Autor.

Em Alagoas predominam oito tipos de solos (Figura 3), sendo que os argissolos e latossolos são os mais encontrados nas áreas de eucaliptocultura. Eles apresentam fertilidade natural entre baixa a média, com relevos entre plano e levemente ondulado e com boas propriedades físicas como: drenagem, capacidade de retenção de água e profundidade efetiva (Silva et al., 2013). Características estas que estão presentes no município de Rio Largo, pois o

Solo da área experimental é classificado como Latossolo Amarelo Coeso Argissólico, de textura média-argilosa, com declividade média de 2% e velocidade de infiltração básica de água (VIB) de 52 mm.h⁻¹. Os demais atributos físico-hídricos do solo encontram-se na Tabela 1 (CARVALHO et al, 2003) e indicam a representatividade da área de estudo, em termos edáficos e climáticos, das áreas de eucaliptocultura alagoana.

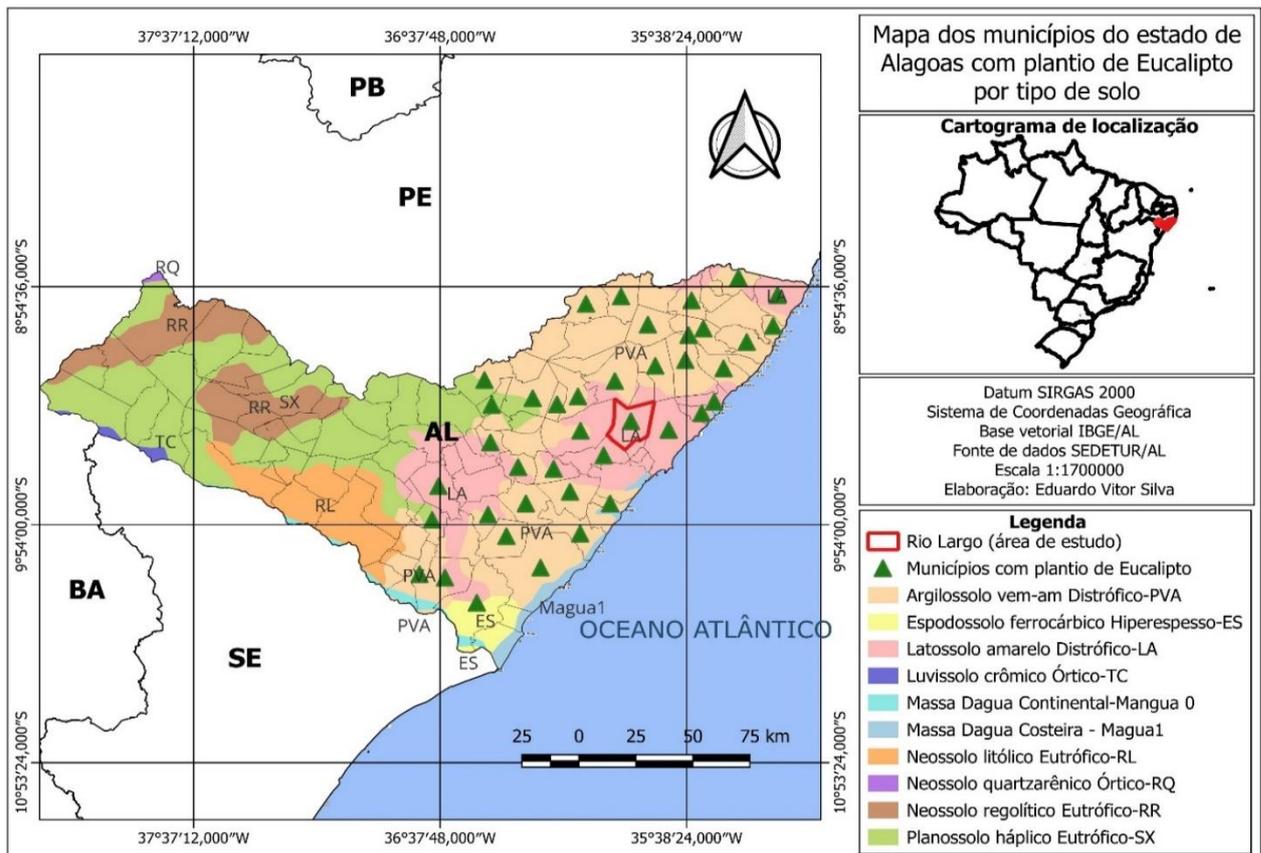


Figura 3. Classificação dos solos do estado de Alagoas e da área experimental no Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas (CECA/UFAL), em Rio Largo. Fonte:Autor.

Tabela 1. Atributos físico-hídricos do solo da área experimental do CECA/UFAL, em Rio Largo, Tabuleiros Costeiros, no estado de Alagoas. Fonte:Autor.

Textura do solo	Camadas (m)	Densidade (kg m ⁻³)	Conteúdo volumétrico de água no solo ⁽¹⁾ (m ³ m ⁻³)		
			PMP	CC	SAT
Médio argilosa	0 - 0,10	1360	0,12	0,20	0,40
	0,10 - 0,20	1440	0,13	0,22	0,43
	0,20 - 0,30	1520	0,14	0,24	0,43

PMP – Ponto de Murcha Permanente; CC – Capacidade de Campo; SAT – Conteúdo de Água na Saturação.

O experimento foi instalado em agosto de 2017 para analisar dois grupos de tratamentos, que são três densidades populacionais e dois clones de eucalipto. O ensaio foi arranjado no delineamento de blocos ao acaso num esquema de parcelas subdivididas composto de três repetições, totalizando 9 parcelas e 18 subparcelas. Nas parcelas foram arranjadas o tratamento de densidade populacional, 833, 1.111 e 1.666 árvores por hectare, utilizando espaçamentos de 3 x 4 m, 3 x 3 m e 3 x 2 m, respectivamente. Nas subparcelas foram arranjados os dois clones de eucalipto VE41 e I144, oriundos do cruzamento *Eucalyptus grandis* x *Eucalyptus urophylla*. Cada parcela era composta por 7 linhas de plantas e 14 árvores por linha, totalizando 98 plantas, e as subparcelas por 49 plantas (7 linhas com 7 árvores por linha). Os tamanhos delas variam em função da densidade populacional. Os dois materiais genéticos testados são muito utilizados na região leste do estado, enquanto a escolha dos espaçamentos visou analisar a produtividade em múltiplos usos da madeira.

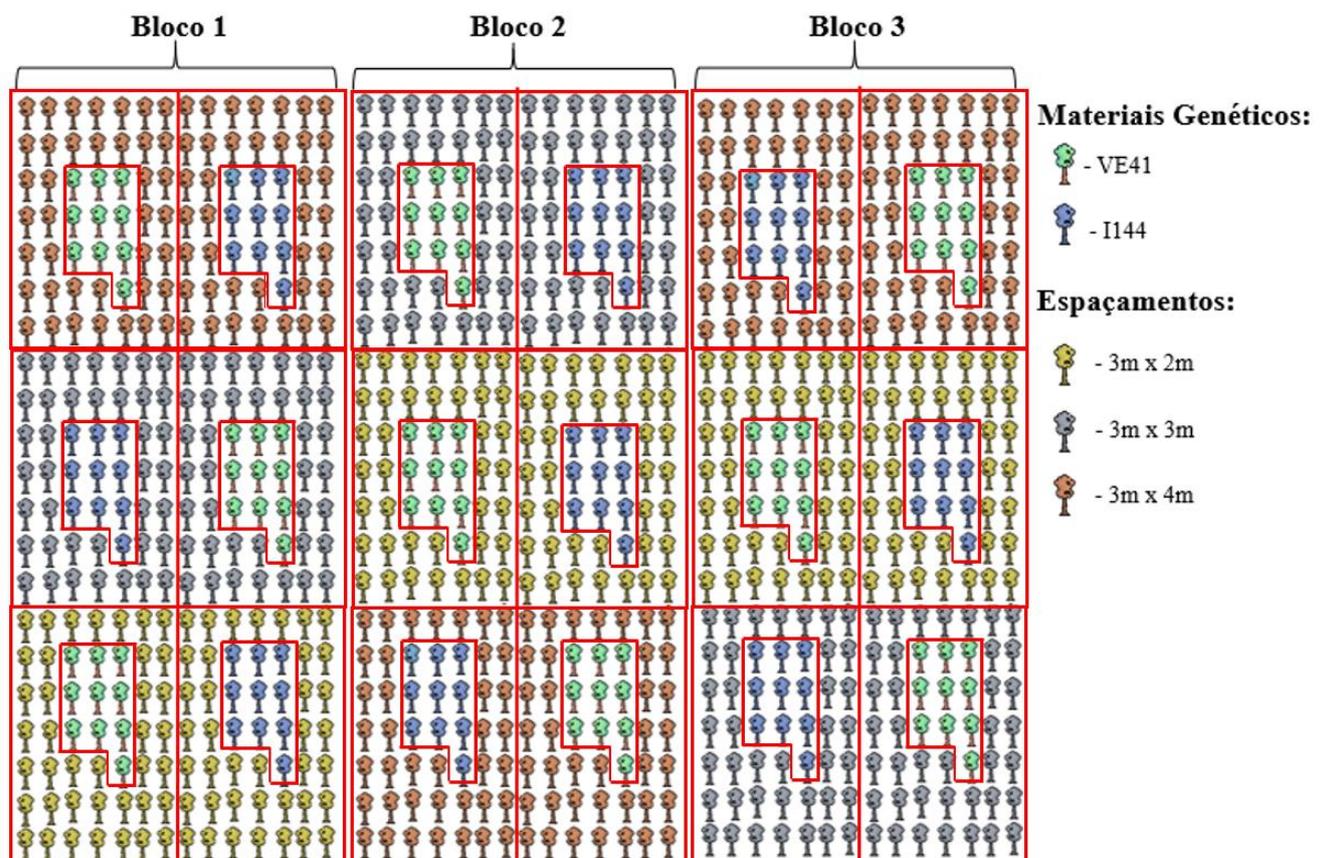


Figura 4. Croqui para reconhecimento dos materiais genéticos e espaçamentos do plantio de eucalipto no Campus de Engenharias e Ciências Agrárias da Universidade Federal de Alagoas.

Fonte: Autor.

3.2 Coleta e tratamento dos dados

O crescimento das árvores foi monitorado com a realização de 15 inventários florestais, mensurando os diâmetros a altura do peito (d) e a altura total (h) das 10 árvores centrais de cada subparcela (Figura 4). Até os 2 anos de idade, foram realizados com frequência bimestral, e após, ocorreram semestralmente até setembro de 2022, aos cinco anos de idade. Para tanto, foi realizado o tratamento dos dados para identificar possíveis outliers através do pacote *Outliers* e submetidos ao teste de normalidade de Shapiro-Wilk, ambas análises realizadas no software R.

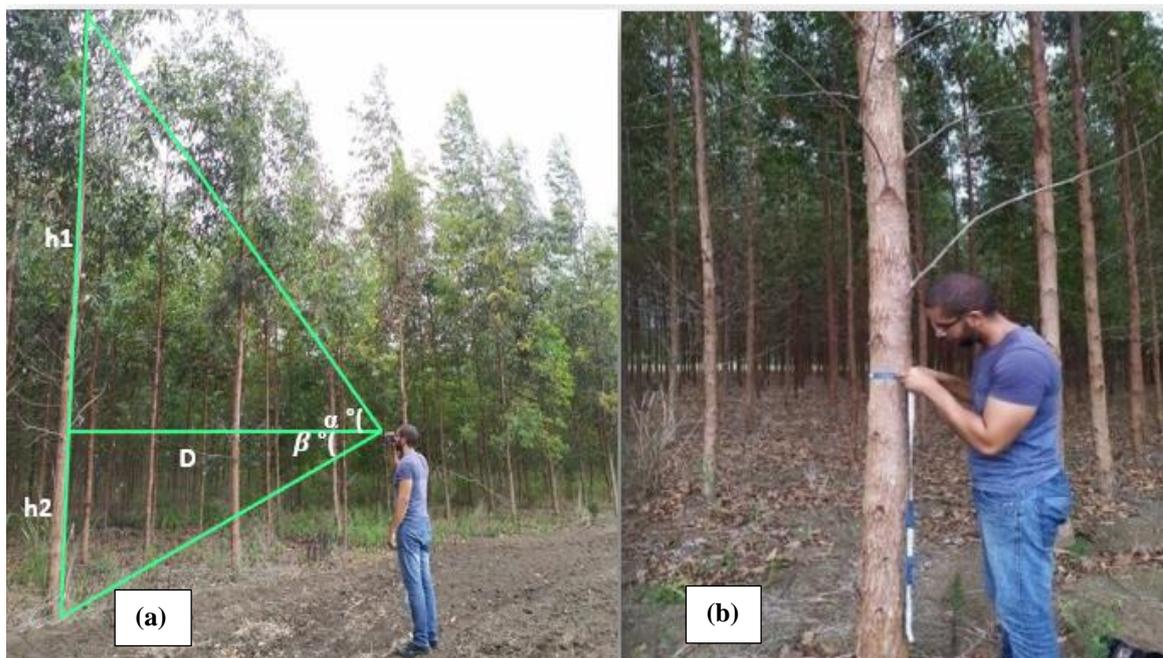


Figura 5. Medição da altura total das árvores (a) e da circunferência a altura do peito (b).
Fonte: Autor.

Foram realizadas cinco avaliações de cubagem do tronco da árvore para determinação do volume de madeira individual (v). Sendo que, em apenas duas foram realizadas de forma destrutiva com o abate de árvore para a cubagem. Nas demais avaliações, utilizou-se a metodologia da árvore em pé. Nas cubagens com abate (destrutiva), foram cortadas 18 árvores (uma por subparcela) (Figura 6.a e Figura 6.b). Já na avaliação da árvore em pé, foram cubadas três árvores por subparcela, totalizando 54 árvores cubadas (Figura 6.c e Figura 6.d).

A seleção das árvores para cubagem se deu com base nas distribuições diamétricas das árvores da área útil de cada parcela.



Figura 6. Abate da árvore para avaliação de cubagem rigorosa (a), medição das circunferências em diferentes alturas da árvore (b), Suta e bastão (c) e medição de diâmetros em diferentes alturas utilizando metodologia de cubagem da árvore em pé (d). Fonte:Autor.

Na cubagem rigorosa das árvores abatidas, as medições dos diâmetros ocorreram nas alturas 0,10, 0,30, 0,70 e 1,30m, sendo que após esta última, a medição ocorreu a cada 1 metro até alcançar o diâmetro comercial (4cm). Já a cubagem da árvore em pé, os diâmetros foram medidos por meio de suta acoplada a um bastão metálico com comprimento de 7 metros e o auxílio de uma escada de madeira, sendo que só foi possível mensurar os diâmetros até 8 metros de altura da árvore. Nesta metodologia também foi considerado as alturas da cubagem rigorosa, sendo a metodologia utilizada para o cálculo do volume das seções, a descrita por Smalian (HUSCH et al., 2003), incluindo o volume de madeira acima de 8 metros de altura.

A partir dos dados observados de v , h e d das árvores cubadas, ajustou-se e selecionou-se equações volumétricas. Para tanto, três equações volumétricas (Tabela 2) foram ajustadas em cada uma das cinco avaliações de volume. Sendo que, a de Shumacher-Hall foi a que apresentou melhor desempenho nas estimativas do v . O desempenho de estimativa do v das equações testadas foi analisado com base no ranqueamento dos índices estatísticos coeficiente de determinação e erro padrão de estimativa. O ajuste foi realizado utilizando o *software* R

versão 4.1.2 utilizando o pacote *nlme*. Com as equações ajustadas, foram estimados o volume individual das demais árvores das áreas úteis de cada subparcela. Com os valores estimados de v e espaçamentos de cada tratamento, determinou-se o volume por hectare.

Tabela 2. Equações volumétricas testadas para estimar o volume individual de madeira das árvores. Fonte:Autor.

Autor	Equação
Shumacher-Hall	$v = \beta_0 * d^{\beta_1} * h^{\beta_2} + \varepsilon$ (1)
Stoate	$v = \beta_0 + \beta_1 * d^2 + \beta_2 * d^2 * h + \beta_3 * h + \varepsilon$ (2)
Spurr	$v = \beta_0 + \beta_1 * d^2 * h + \varepsilon$ (3)

Em que: v = volume individual; d : diâmetro a altura do peito; h : altura total; β : parâmetros ajustáveis.

Tabela 3. Equações volumétricas ajustadas para estimar o volume individual de madeira das árvores. Fonte:Autor.

Medologia	n	β_0	β_1	β_2	R^2	R^2_{aj}	Sxy (m ³)	Sxy (%)
Em pé	18	0,00019*	1,598**	0,733**	0,9330	0,9240	0,00378	0,38
Abate	18	0,00008**	1,631**	1,036**	0,9904	0,9891	0,00178	0,18
Em pé	18	0,00019*	1,498**	0,825**	0,9205	0,9099	0,00560	0,57
Abate	18	0,00034	1,605**	0,524*	0,9489	0,9411	0,00703	0,70
Em pé	54	0,00034**	1,7456**	0,427**	0,9263	0,9234	0,01833	1,83

Após a determinação do volume por hectare para cada tratamento, foi calculado o incremento médio anual (IMA) por meio da equação 4 descrita por FLORIANO (2021).

$$IMA_t = \frac{V_t}{t} \quad (4)$$

Onde:

IMA_t : Incremento médio anual, em m³.ha⁻¹.ano⁻¹;

V_t : Volume de madeira na idade t , em m³.ha⁻¹;

t : idade, em anos

3.3 Parametrização do Modelo 3-PG

No modelo 3-PG os parâmetros necessários para inicialização são os que caracterizam área de estudo e a cultura estudada (eucalipto), como: latitude, solo (classe, fertilidade, quantidade máxima, mínima e inicial de água), climatológicos (médias mensais de temperatura, radiação, precipitação), cultura (biomassa inicial de folha, lenho e raízes, número de árvores, coeficientes de equações alométricas) e fisiológicas (máxima eficiência quântica do dossel, condutância estomática do dossel, área foliar específica, densidade básica da madeira, fração de galhos e casca em relação a biomassa lenhosa da parte aérea).

Utilizou-se o valor da latitude -9,46 para a localização geográfica da região, o sinal negativo designa que a área de estudo está situada no hemisfério sul. A planilha utilizada para as simulações do presente estudo requer somente a latitude como parâmetro de inicialização, não sendo necessário o valor da longitude.

No 3-PG, deve-se classificar o solo em uma das quatro classes, argiloso (C), argilo-arenoso (CL), arenoso (S) e areno-argiloso (SL) e indicar um índice de fertilidade que pode variar de 0 a 1, sendo 0 para solos de baixa fertilidade e 1 para solos sem restrições nutricionais. Porém, usualmente se adota valores entre 0,30 a 0,80 para diminuir o desvio entre as estimativas e os valores observados em campo (VERGARA, 2013). O solo estudado foi classificado como argiloso (C) e atribuído o valor de 0,55 para o índice de fertilidade, pois o solo da área experimental é classificado como Latossolo Amarelo Coeso Argisólico de textura médio-argilosa, é de baixa fertilidade natural, foi realizada adubação de fundação, além de considerar as características físicas e atributos descritos na Tabela 1.

A capacidade de água disponível (CAD) do solo variou ao longo do tempo em função do crescimento do sistema radicular até os 500 dias após o plantio (Equação 5), logo após a profundidade estabilizou-se em 2,0 metros, valor usualmente adotado para eucaliptais no Brasil (LEMOS, 2012, FERREIRA 2007, STAPE et al. 2004b). No modelo 3-PG a CAD necessária para inicialização, é a máxima que pode ser atingida na área de estudo em função da profundidade explorada pelo sistema radicular efetivo. Dessa forma, a CAD máxima atingida na área de estudo aos 5 anos de idade, foi de 291 mm, determinado por meio do balanço hídrico mensal. Já a quantidade mínima de água no solo foi de 32,04 mm que se refere ao valor mais baixo atingido pelo armazenamento no período de estiagem enquanto a quantidade inicial de água no solo no momento do plantio das mudas foi de 32,94mm.

$$CADi = (\theta_{cc} - \theta_{pmp}) * ds * Zi \quad (5)$$

Onde:

CADi: a capacidade de água disponível (mm),

θ_{cc} : é a capacidade de campo ($m^3.m^{-3}$);

θ_{pmp} : é o ponto de murcha permanente ($m^3.m^{-3}$);

ds: é a densidade do solo ($Kg.m^{-3}$);

Zi: é a profundidade alcançada pelo sistema radicular (m);

O tamanho do sistema radicular foi estimado pelo modelo proposto por Reis et al. (2014) (Equação 6):

$$\begin{aligned} Zi &= 0,002782660439 * D + 0,226451677452 & D \leq 500 & (6) \\ Zi &= 2,0 & D > 500 & \end{aligned}$$

Onde:

Zi: profundidade do sistema radicular (m);

D = dias após o plantio (dias).

Os dados meteorológicos utilizados nas simulações estão apresentados em médias mensais na Tabela 5. Eles foram coletados em uma estação meteorológica automática (Micrologger – CR 1000, Campbell Scientific, Logan, Utah) instalada a 600 m do experimento. Os dados coletados entre setembro de 2017 a setembro de 2022 foram de temperatura ($^{\circ}C$) máxima e mínima, precipitação pluvial (mm) e radiação solar global ($MJ.m^{-2}$). Adotou-se o valor 0 para dias de produção perdidos por geada, pois não há registros de geadas na região da pesquisa.

O estoque inicial variou de 833, 1.111 e 1666 árvores.ha⁻¹, conforme os espaçamentos de cada tratamento, abrangendo densidades populacionais de padrões comerciais. Por meio dos estudos de Borges (2009), Vergara (2013) e Landsberg & Waring (1997), foi possível adotar os valores de frações iniciais de biomassa nas folhas, raízes e caule das mudas, assim como os parâmetros que compõem os relacionamentos de partição de biomassa, taxa de queda de serrapilheira e renovação de raiz, uma vez que, os materiais genéticos utilizados são híbridos de eucalipto Urograndis. Como não houve análise de biomassa suficiente para obter tais

parâmetros, utilizou-se os valores encontrados por estes autores, e no processo de calibração, os valores foram aprimorados obedecendo amplitude observada na literatura (Tabela 4).

Tabela 4. Parâmetros de partição de biomassa obtidos na literatura considerando o material genético, condições edafoclimáticas e cultivo para aprimoramento na calibração.

Parâmetro	Padrão	Literatura	Autor	Utilizado	Justificativa
Biomassa inicial de folhas	0	0,05 a 1,60	L1 e L2	0,05	Os materiais genéticos utilizados são do mesmo cruzamento deste estudo (E. grandis x E. urophylla).
Biomassa inicial de fuste (galho + casca + lenho)	0	0,02 a 0,099	L1 e L2	0,02	
Biomassa inicial de raízes	0	0,03 a 106	L1 e L2	0,03	
Partição folha/tronco DAP=2	1	1,64	L1	1,64	
Partição folha/tronco DAP=20	0,15	0,15	L3	0,15	Valor padrão
Constante da relação entre DAP e biomassa tronco	0,095	0,025	L1	0,025	Os materiais genéticos utilizados são do mesmo cruzamento deste estudo (E. grandis x E. urophylla).
Potência da relação entre DAP e biomassa do tronco	2,4	2,9	L1 e L3	2,4 a 3,60	Calibrado conforme intervalo utilizado na literatura, entre 2,4 (default) até 3,60.
Fração máxima de PPL para raiz	0,8	0,5	L1	0,5	Os materiais genéticos utilizados são do mesmo cruzamento deste estudo (E. grandis x E. urophylla).
Fração mínima de PPL para raiz	0,25	0,1	L1	0,1	
Taxa máxima de queda de folheto	0,027	0,07	L1	0,07	
Taxa de folheto t=0	0,001	0,001	L1	0,001	
Idade da queda de folheto adquire valor médio	12	4	L1	4	
Taxa de renovação média mensal de raiz	0,015	0,025	L1	0,025	

Em que: L1 = Borges (2009); L2 = Vergara (2013); L3 = Landsberg & Waring (1997).

Fonte:Autor.

A área foliar específica foi determinada pela razão entre a área foliar (m²) e a massa seca da amostra (kg) de folhas. Para tanto, foram coletadas amostras de 100 gramas (1 por subparcela) de matéria fresca após homogeneização de toda a folhagem. Logo após, mediu-se a área foliar (utilizando o equipamento LI-COR 3100 Area Meter) e massa seca (secas em estufa de circulação e renovação de ar a 67°C).

A densidade básica da madeira (pb) foi obtida por meio da retirada de discos de madeira de 3cm de espessura nas posições 0, 25, 50, 75 e 100% da altura comercial (considerando

diâmetro mínimo de 4 cm). Os discos foram convertidos em cunhas, onde foram imersas em água até atingir o volume saturado. A densidade básica foi determinada considerando o que é preconizado na norma NBR 11942 de 2013 da ABNT. O volume de cada amostra foi obtido por meio de balança hidrostática com leitura de 0,1g de precisão, e logo em seguida, foram secas em estufa de circulação e renovação de ar a 105°C sendo posteriormente pesadas para determinação do peso seco. A densidade básica de cada amostra foi calculada pela razão entre o peso seco e o volume saturado.

Os parâmetros que compõe o modificador de água no solo e CO₂ atmosférico, os efeitos da fertilidade e fatores de conversão (interceptação de radiação) foram mantidos os mesmos determinados por Landsberg e Waring (1997), estudando *Eucalyptus Globulus* na Austrália, pois se tratam de parâmetros de difícil obtenção.

Para a estimativa da relação entre h e d, volume de madeira e d ao longo do crescimento, foi realizado o ajuste das equações alométricas 5 e 6 propostas por SANDS e LANDSBERG (2002) através do pacote *nlme* no *software* R versão 4.1.2.

$$h = a_H d^{nHB} + \varepsilon \quad (5)$$

$$V = a_V d^{nVB} + \varepsilon \quad (6)$$

Onde:

d: diâmetro a 1,30m de altura médio (cm).

a_H, a_V : coeficientes multiplicativos ajustados.

nHB, nVB : parâmetros potenciais ajustados

h: altura total média das árvores;

V : volume de madeira (m³.ha⁻¹)

ε : Erro aleatório.

Tabela 5. Parâmetros da área de estudo, necessários para inicialização do modelo 3-PG.

Parâmetros de Sítio	Valor	Unidade
Latitude	-9,46	Hemisfério Sul
Índice de fertilidade	0,55	-

Classe de solo	C	Argiloso
Máximo ASW	291	mm
Mínimo ASW	32,04	mm
Mês de Plantio	Setembro	-
Idade Final	5	Anos
Nº de Saídas	DAP, H, V, IMA	(cm); (m); (m ³ .ha ⁻¹); (m ³ .ha ⁻¹ .ano ⁻¹)
Estoque inicial	833/1.111/1.666	árvore.ha ⁻¹
ASW Inicial	32,94	mm

Em que: Máximo ASW = quantidade máxima de água no solo; Mínimo ASW = quantidade mínima de água no solo; ASW inicial = Quantidade de água inicial no solo. Fonte:Autor.

Os demais parâmetros (Tabela 6) que não foram medidos em campo ou laboratório, foram obtidos considerando a metodologia adotada por todos os autores que parametrizaram o modelo 3-PG no Brasil, onde, deve-se considerar estudos regionais, material genético e condições edafoclimáticas e silviculturais semelhantes a região estudada, e se mesmo assim não houver a medição do parâmetro para região, utilizar o valor padrão (*default*) do modelo ajustado pelos autores Landsberg e Waring (1997). Dessa forma, considerando as características mencionadas, os parâmetros que não foram mensurados em campo, foram obtidos por meio dos estudos de (BORGES et al., 2009; SANDS e LANDSBERG, 2002; LONDERO et al, 2015; LEMOS, 2012; VERGARA, 2013; OLIVEIRA, 2016; CALDEIRA, 2019) e consulta literária.

3.4 Calibração do Modelo 3-PG

Neste estudo, a calibração ocorreu considerando as condições climáticas ocorridas no período de crescimento do experimento. Alguns parâmetros são considerados como muito sensíveis no modelo, pois interagem entre si, são eles: (a) eficiência quântica máxima do dossel, (b) parâmetros que controlam a alocação da biomassa (tais como: Partição folha/tronco, partição para a raiz), (c) interceptação da luz (idade do fechamento do dossel), (d) condutância estomática (tais como: condutância máxima do dossel e definidor de resposta estomática ao DPV). Esses parâmetros foram calibrados manualmente considerando a amplitude do parâmetro (mínimo e máximo) registrados na literatura, conforme recomendação de diversas pesquisas (LANDSBERG e WARING, 1997; BORGES et al. 2009; PONTES 2011; LONDERO et. al, 2015

Tabela 6. Dados climáticos obtidos na estação agrometeorológica do CECA-UFAL entre os meses de setembro de 2017 a setembro de 2022.

Fonte:Autor.

Mês	2017				2018				2019			
	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	P (mm)	Rad. T (MJ/m² dia)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	P (mm)	Rad. T (MJ/m² dia)	Tmáx (°C)	Tmín (°C)	P (mm)	Rad. T (MJ/m² dia)
Jan	-	-	-	-	30	22	119	22,1	32	21	109	19,9
Fev	-	-	-	-	30	23	138	20,4	34	22	41	21,5
Mar	-	-	-	-	31	22	101	20,2	36	21	130	20,5
Abr	-	-	-	-	29	22	361	14,8	33	21	62	18,6
Mai	-	-	-	-	29	21	154	16,5	32	20	191	17,4
Jun	-	-	-	-	28	20	107	15,8	30	19	240	14,9
Jul	-	-	-	-	27	19	105	14,6	30	18	269	14,7
Ago	-	-	-	-	28	19	48	18,7	29	18	162	17,1
Set	27	20	120	19,6	28	19	36	20,0	31	18	39	19,4
Out	28	20	37	21,1	31	20	1	22,3	32	19	12	21,0
Nov	30	21	14	23,3	30	22	47	20,6	36	19	7	21,8
Dez	31	22	69	22,4	31	22	68	21,0	35	20	27	20,5
	2020				2021				2022			
Jan	34	21	21	20,2	33	20	64	19,9	33	20	97	20,9
Fev	34	22	101	20,2	34	21	21	21,7	34	21	6	23,5
Mar	35	21	260	18,8	33	21	174	20,2	33	21	297	18,0
Abr	34	21	364	18,3	32	21	332	19,0	34	21	134	18,0
Mai	33	21	261	14,9	31	20	282	16,0	32	20	573	13,6
Jun	30	19	303	14,4	30	19	269	14,2	30	20	395	12,1
Jul	27	20	269	14,7	31	19	196	15,3	29	18	445	13,2
Ago	27	19	162	17,1	29	18	206	15,5	29	18	332	16,0
Set	28	19	48	18,7	32	18	96	18,3	31	18	61	18,9
Out	34	19	5	19,8	33	19	37	20,8	-	-	-	-
Nov	35	19	46	20,2	34	20	5	22,1	-	-	-	-
Dez	32	20	27	20,4	35	21	96	20,4	-	-	-	-

Em que: T_{\max} = temperatura máxima; T_{\min} = temperatura mínima; P = Precipitação pluvial; Rad. T = radiação solar global.

Valor de m quando FR = 0	-	0	0	0	0	0	0	0	P	
Valor de Fn quando FR = 0	-	1	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	L1	Condições de cultivo e edáficas semelhantes ao do presente estudo de Borges (2009) e Stape (2002).
Potência de (1-FR) em Fn	-	0	1	1	1	1	1	1	L1	
Idade máxima do povoamento	Anos	50	9	9	9	9	9	9	L1	
Potência da idade relativa em Fage	-	4	4	4	4	4	4	4	P	A base de dados do cultivo de eucalipto utilizado neste estudo é carente de informações relacionados a biomassa, além disso, parte dos parâmetros são de difícil obtenção, na literatura observa-se o uso dos valores padrões (<i>default</i>) determinado por Landsberg e Waring (1997).
Idade relativa para Fage = 0,5	-	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	0,95	P	
Taxa de mortalidade para idade madura	Ano ⁻¹	0	0	0	0	0	0	0	P	
Taxa de mortalidade de mudas (t = 0)	Ano ⁻¹	0	0	0	0	0	0	0	P	
Idade na qual a taxa de mortalidade tem valor médio	Anos	0	0	0	0	0	0	0	P	
Forma da resposta a mortalidade	-	1	1	1	1	1	1	1	P	
Biomassa de fuste máxima por árvore para 1000 árvores/há	Kg.árv	300	300	300	300	300	300	300	P	
Potência da regra de auto-debaste	-	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	1,5	P	
Fração média de biomassa de folha perdida por árvore morta	-	0	0	0	0	0	0	0	P	
Fração média de biomassa de raiz perdida por árvore morta	-	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	P	
Fração média de biomassa de fuste perdida por árvore morta	-	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	P	
Área foliar específica na idade 0	m ² .kg ⁻¹	11	15,97	12,58	15,97	12,58	17,17	12,72	O	Observado no inventário florestal.
Área foliar específica para árvores maduras	m ² .kg ⁻¹	4	7,98	7,98	7,98	7,98	7,98	7,98	L1	Considerou-se os valores do material genético de mesmo cruzamento (BORGES, 2009).
Idade na qual a área foliar específica = (AF0+AF1)/2	Anos	2,5	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	1,23	L1	
Coefficiente de extinção da RFA absorvida pelo dossel	-	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	0,5	L3	Na literatura, observa-se o uso do valor padrão (<i>default</i>) determinado por Landsberg e Waring (1997) e observado por Almeida et al. (2004).
Idade de fechamento do dossel	Anos	3	2	2	2,5	2,5	2,8	2,8	A	Calibrado utilizando uma amplitude observada na literatura que varia de 1,5 á 3 anos.
Proporção máxima da chuva evaporada do dossel	-	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	0,15	P	Valor padrão do modelo.
AF para máxima interceptação da chuva	-	0	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33	A	Ajustado no processo de calibração

Eficiência quântica máxima do dossel	mol.mol ⁻¹	0,06	0,072 5	0,072 5	0,072 5	0,072 5	0,072 5	0,072 5	0,0725	A	Calibrado utilizando uma amplitude observada na literatura que varia de 0,06 á 0,08.
Razão PPL/PPB	-	0,47	0,5	0,48	0,5	0,48	0,5	0,48	0,48	L1	Valor utilizado para híbridos <i>E. Urograndis</i>
Condutância mínima do dossel	m.s ⁻¹	0	0	0	0	0	0	0	0	P	Na literatura, observa-se pequena variação na amplitude da máxima condutância, sendo o valor médio 0,02 m.s ⁻¹ .
Condutância máxima do dossel	m.s ⁻¹	0,02	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,018	0,0182	P	
Af para máxima condutância do dossel	-	3,33	2	2	2	2	2	2	3,33	P	
Define resposta estomática ao DPV	m.Bar ⁻¹	0,05	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33	3,33	P	
Condutância na camada limítrofe do dossel	m.s ⁻¹	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	0,05	L1	Condições climáticas semelhantes. Na literatura usa-se o valor padrão do modelo.
Fração de galho e casca na idade 0	-	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	0,2	P	
Fração de galho e casca em idade madura	-	0,75	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	0,59	L1	Os materiais genéticos utilizados são do mesmo cruzamento deste estudo (<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>).
Idade na qual PBB = (PBB0 + PBB1)/2	Anos	0,15	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	0,19	L1	
Densidade básica mínima da madeira (para árvores jovens)	t.m ⁻³	2	2,17	2,17	2,17	2,17	2,17	2,17	2,17	L1	
Densidade básica máxima da madeira (para árvores maduras)	t.m ⁻³	0,450	0,357	0,421	0,363	0,419	0,357	0,391	0,391	O	Determinado pelo inventário florestal.
Idade na qual a densidade básica da madeira = (P0 + P1)/2	Anos	4	0,505	0,505	0,505	0,505	0,505	0,505	0,505	L1	Os materiais genéticos de mesmo cruzamento (<i>E. grandis</i> x <i>E. urophylla</i>) e densidade de plantio.
Constante na relação de altura do fuste	-	0	2,264	2,264	2,264	2,264	2,264	2,264	2,264	L1	
Potência do D na relação de altura do fuste	-	0	0,879	0,897	0,999	1,001	1,067	1,067	0,9115	A	Ajustados utilizando dados de inventário florestal.
Potência do estoque na relação de altura do fuste	-	0	1,132	1,167	1,052	1,066	0,977	0,977	1,0986	A	
Constante na relação de volume do fuste	-	0	0	0	0	0	0	0	0	P	Valor padrão do modelo 3-PG.
Potência do D na relação de volume do fuste	-	0	0,122	0,125	0,335	0,085	0,206	0,206	0,0738	A	Ajustados utilizando dados de inventário florestal.
Potência do estoque na relação de volume do fuste	-	0	2,792	2,838	2,227	2,765	2,266	2,266	2,7195	A	
Intercepto da relação entre radiação líquida vs radiação solar	W.m ⁻²	-90	0	0	0	0	0	0	0	P	Por ser parâmetros de difícil obtenção, na literatura, observa-se o uso do valor

Inclinação da relação entre radiação líquida vs radiação solar	-	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	0,8	P	padrão (default) determinado por Landsberg e Waring (1997).
Peso molecular da matéria seca	g.mol ⁻¹	24	24	24	24	24	24	24	P	
Fator de conversão da radiação solar na RFA	Mol.MJ ⁻¹	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	2,3	P	

Em que: P = valor padrão (default) do modelo; A = ajustado; O = observado; L1 = Borges (2009); L2 = Stape *et al.* (2002); L3 = Almeida *et al.*

(2004); L4 = Vergara (2013) I144 e VE41 = materiais genéticos; 3x2, 3x3 e 3x4 = espaçamentos.

3.5 Análise Estatística

A acurácia do modelo 3-PG foi averiguada pelos seguintes métodos estatísticos: análise gráfica, correlação linear (7), coeficiente de determinação (8), erro padrão absoluto (9), erro padrão relativo (10) e eficiência do modelo (11).

$$R = \frac{\sum(x_i - \bar{x}) \cdot (y_i - \bar{y})}{\sqrt{(\sum(x_i - \bar{x})^2)(\sum(y_i - \bar{y})^2)}} \quad (7)$$

Onde:

R: correlação linear entre os dados observados e estimados pelo 3-PG;

y_i : iésimo valor observado no inventário florestal;

x_i : iésimo valor estimado pelo modelo 3-PG;

\bar{x} : valor médio estimado pelo modelo 3-PG;

\bar{y} : valor médio observado no inventário florestal;

$$R_{aj.}^2 = 1 - \left[\left(\frac{n-1}{n-k-1} \right) \right] * (1 - R^2) \quad (8)$$

Onde:

n : número de observações;

k : número de parâmetros do modelo alométrico;

R^2 : correlação linear elevado ao quadrado;

$$S_{yx} = \sqrt{\frac{\sum(y - \hat{y})^2}{n - k - 1}} \quad (9)$$

Onde:

S_{yx} : erro padrão da estimativa absoluto;

n : número de observações;

y : valor observado em campo;

\hat{y} : valor estimado pelo modelo 3-PG;

k: número de parâmetros do modelo alométrico;

$$S_{yx}\% = \left(\frac{S_{yx}}{\bar{y}} \right) \cdot 100 \quad (10)$$

$S_{yx}\%$: erro padrão da estimativa relativo;

\bar{y} : valor médio de y observado;

A avaliação da eficiência do modelo, na etapa de calibração, foi testada por meio da regressão linear simples, considerando a equação 11.

$$O = \beta_0 + \beta_1 * E \quad (11)$$

Onde:

O: valor observado no inventário florestal;

E: valor estimado pelo modelo 3-PG;

β :parâmetros ajustáveis;

A significância dos parâmetros (β_0 e β_1) da equação 11 foram testadas por meio do Teste T dos parâmetros, por meio das equações 12, 13 e 14.

$$S(\beta_0) = \sqrt{\frac{S^2 \sum x_i^2}{n \sum (x_i - \bar{x})^2}} \quad (12)$$

Onde:

$S(\beta_0)$: erro padrão do parâmetro;

S^2 : quadrado médio do resíduo da regressão ajustada;

x_i : iésimo valor estimado pelo modelo 3-PG;

$$S(\beta_i) = \sqrt{\frac{S^2}{\sum (x_i - \bar{x})}} \quad (13)$$

Onde:

$S(\beta_i)$: erro padrão do parâmetro;

S^2 : quadrado médio do resíduo da regressão ajustada;

x_i : i-ésimo valor estimado pelo modelo 3-PG;

$$T = \frac{\beta_i - Y}{S(\beta_i)} \quad (14)$$

Onde:

T: valor calculado para comparar na distribuição T;

β_i : assume o valor β_0 ou β_1 ;

Y: assume o valor 0 ou 1 para o teste dos parâmetros β_0 e β_1 , respectivamente;

$S(\beta_i)$: erro padrão do parâmetro.

Considerando um modelo ideal, o valor observado (O) é igual ao estimado (E), quando $\beta_0 = 0$ e $\beta_1 = 1$. Assim, foram verificadas pelo teste T a 1% de significância, as hipóteses $\beta_0 = 0$ e $\beta_1 = 1$, indicando um tratamento adequado do modelo aos processos envolvidos.

4. RESULTADOS E DISCUSSÃO

4.1 Condições Ambientais

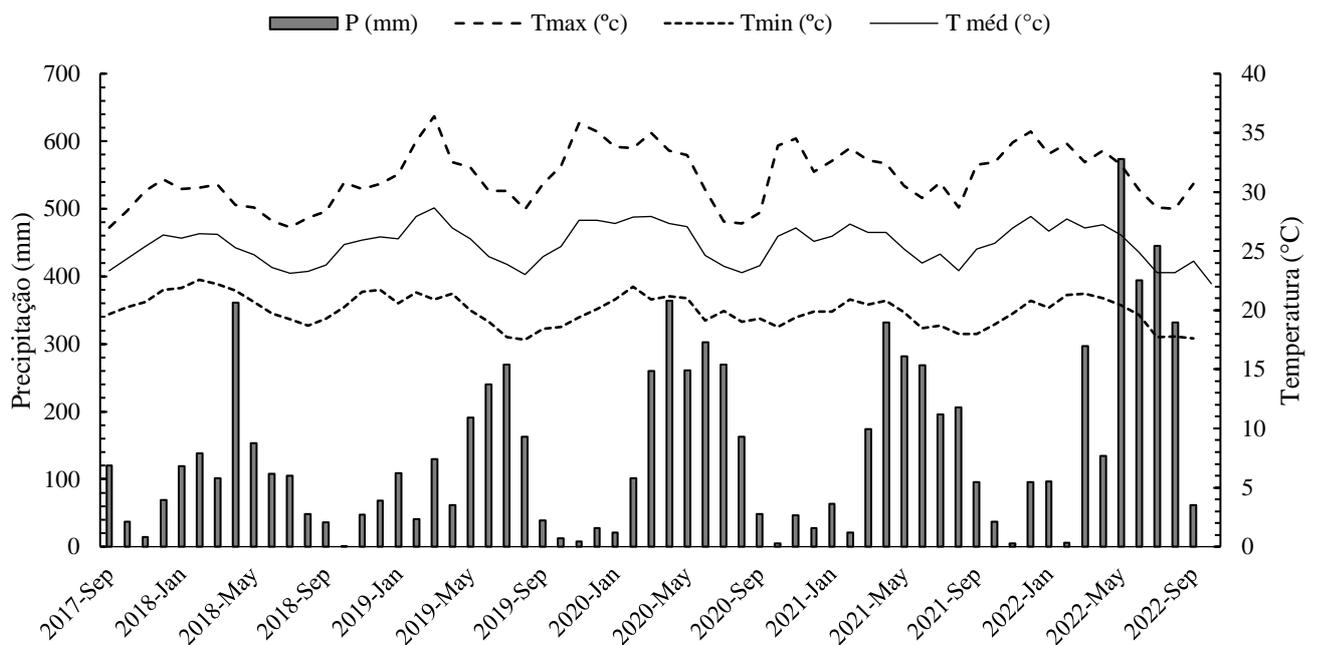


Figura 7. Distribuição mensal das variáveis precipitação, temperatura máxima (°C) e temperatura mínima (°C) para o município de Rio Largo – AL. Fonte: Autor.

A caracterização climática da região durante o período de crescimento pode ser observada na Figura 6. A temperatura máxima variou entre 26,98 a 36,4 °C enquanto a temperatura mínima de 17,5 a 22,5°C, temperaturas estas que estão dentro da amplitude ótima para o crescimento do eucalipto em regiões tropicais (ALMEIDA et al, 2004; SILVA, 2006).

A maior quantidade de precipitação pluvial concentrou-se entre os meses de março e agosto, uma característica natural da região, e que também foi observada por Souza et al. (2003). A quantidade de chuva precipitada para os 5 anos de crescimento do povoamento foram de 1410, 1359, 1836, 1717 e 2447mm, respectivamente.

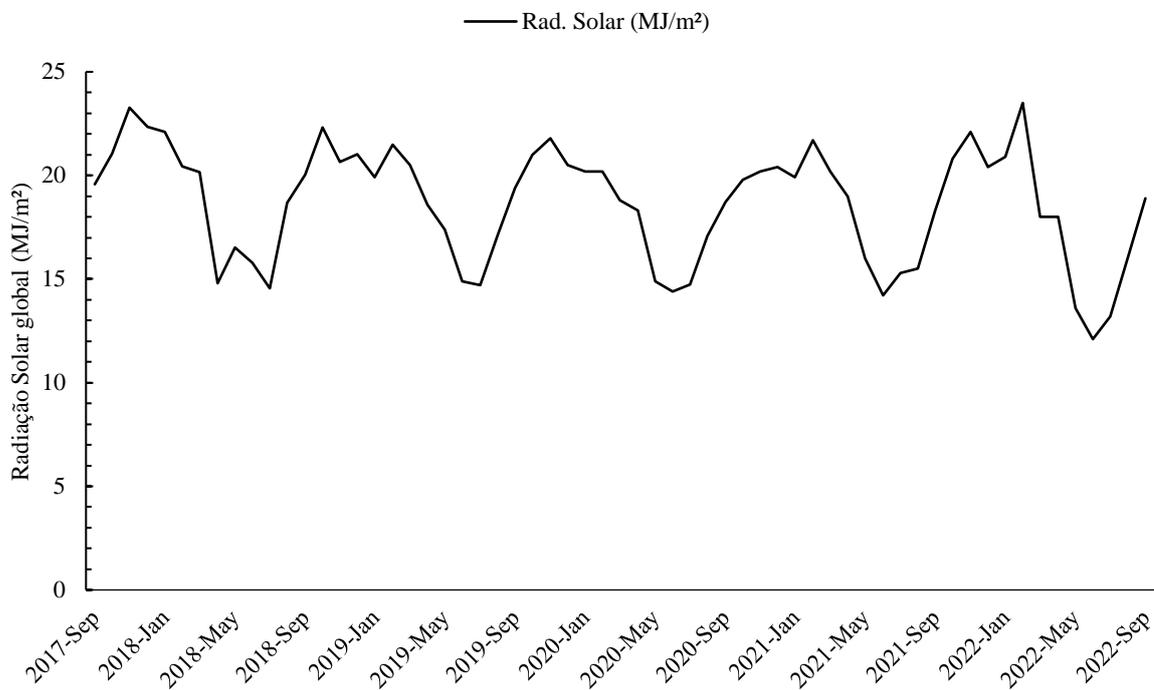


Figura 8. Distribuição mensal da radiação solar global (MJ/m²) para o município de Rio Largo – AL. Fonte:Autor.

A distribuição da radiação solar apresenta picos mais altos entre os meses de setembro a fevereiro do ano posterior, período em que há cessão das chuvas. Já no período mais úmido do ano a radiação tende a ser menor, gerando uma flutuação anual característica (Figura 7).

A capacidade de água disponível (CAD) aumentou linearmente, de 32,94 à 291 mm até 16 meses, conforme o desenvolvimento do sistema radicular, que foi estabilizado em uma profundidade média de 2,0 metros (Figura 8). A CAD, em plantios florestais, especialmente os compostos por eucalipto, é considerada alta, variando em torno de 150 a 300 mm (PEREIRA; ANGELOCCI; SENTELHAS, 2002).

O período de estiagem verificado nos meses entre setembro e fevereiro é natural da região e que reduz a água armazenada no solo. A pouca ou nenhuma ocorrência de chuva acarretou em uma alta diminuição, chegando a alcançar 32,04 mm. Essa dinâmica pode estar associada à interdependência dos processos que compõem o fluxo de água no solo, como a infiltração, redistribuição, evaporação e absorção de água pelas árvores que, na maioria das vezes, ocorrem simultaneamente (PREVEDELLO, 2012), apresentando rápidas reações no ambiente. Situações semelhantes foram observadas em estudos realizados na região Sudeste do país, uma das maiores detentoras das florestas de eucalipto (IBÁ, 2019). Nos municípios de Aracruz – ES e Belo Oriente – MG, Reis et al. (2012) e Souza et al. (2006), respectivamente, observaram que o ARM chegou próximo a zero em meses mais secos, chegando a atingir a capacidade máxima de armazenamento quando houve precipitação em grandes volumes.

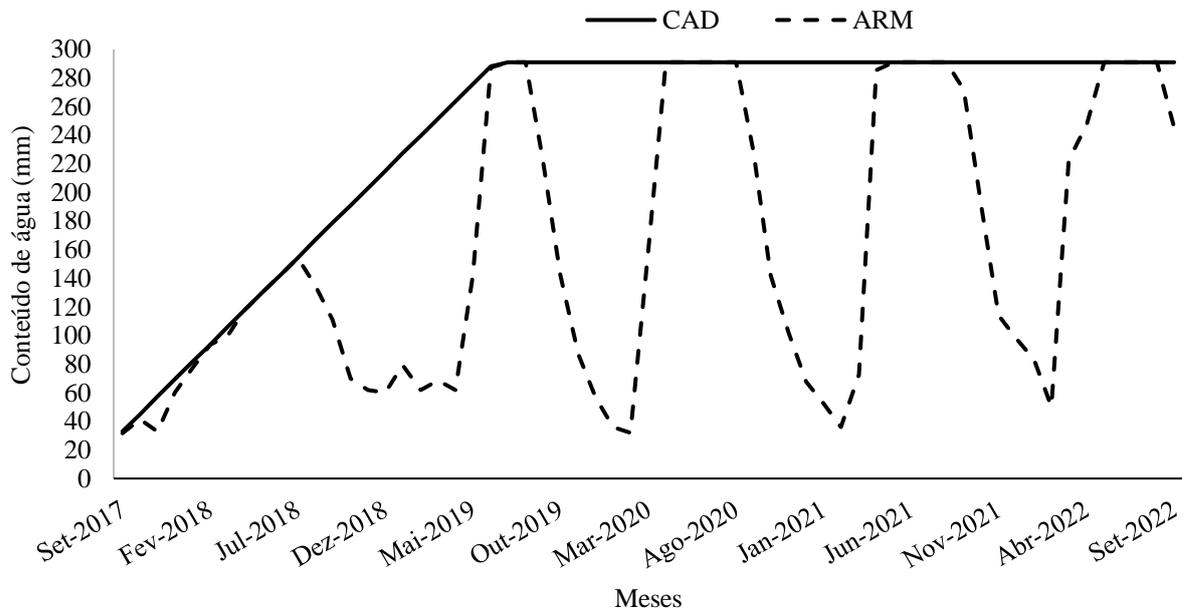


Figura 9. Variação mensal do armazenamento de água no solo (ARM) e capacidade de água disponível (CAD) para área de estudo no município de Rio Largo – AL. Fonte:Autor.

4.2 Equações alométricas ajustadas

De modo geral as equações de relacionamento entre diâmetro e as variáveis altura total média e volume de madeira, mostraram adequação entre os valores observados, com coeficientes de determinação superiores a 90%, considerando cada tratamento (Tabela 7).

Através destas equações (Tabela 7), foram obtidos os parâmetros: constante de relacionamento entre altura e $d(a_H)$, potência de relacionamento entre altura e $d(nHB)$,

constante de relacionamento entre volume e $d(a_V)$, potência de relacionamento entre volume e $d(nVB)$, que são *inputs* necessários para inicialização do modelo.

Tabela 8. Equações alométricas ajustadas para utilização no modelo 3-PG. Fonte:Autor.

Densidade Populacional (arv.ha ⁻¹)	Clone	Equação	R ²	n
1.666	I144	$h = 0,8791 * DAP^{1,1326}$	0,9883	15
		$v = 0,1222 * DAP^{2,7920}$	0,9797	5
	VE41	$h = 0,8976 * DAP^{1,1674}$	0,9893	15
		$v = 0,1252 * DAP^{2,8387}$	0,9843	5
1.111	I144	$h = 0,9992 * DAP^{1,0529}$	0,9912	15
		$v = 0,3353 * DAP^{2,2279}$	0,9294	5
	VE41	$H = 1,0011 * DAP^{1,0666}$	0,9849	15
		$V = 0,0855 * DAP^{2,7655}$	0,9897	5
833	I144	$H = 1,0670 * DAP^{0,9775}$	0,9828	15
		$V = 0,2064 * DAP^{2,2661}$	0,9749	5
	VE41	$H = 0,9115 * DAP^{1,0986}$	0,9840	15
		$V = 0,0738 * DAP^{2,7195}$	0,9770	5

Em que: h = altura total; v = volume de madeira com casca; d = diâmetro a altura do peito, R² = coeficiente de determinação, n = número de pares observados; utilizando o p-valor < 0,01: nível de significância de 99%.

4.3 Simulações para variável Altura (h)

Entre os meses de abril a agosto (quadra chuvosa), observou-se redução de cerca de 2°C na temperatura média da região, o que pode reduzir o desempenho fisiológico das plantas, já que o modelo considera que a temperatura do ar é uma variável que regula a atividade fotossintética por meio do modulador f_T , por outro lado, entre os meses de setembro a março (do ano posterior) há um aumento médio de 2°C em relação a temperatura média local. Essa variação térmica na temperatura média diminui as taxas de crescimento em altura entre esses meses conforme observado na Figura 9.

Graficamente, as estimativas da altura total durante o período simulado na DP de 1.666 arv.ha⁻¹ (Figura 9.a e 9.b) ficaram muito próximas das observações de campo, para ambos os

clones. Durante a simulação do crescimento da altura para o I144, as estimativas atingiram, 5,46, 9,06, 13,93, 16,11 e 18,42m (Figura 9.a), valores estes que estão muito próximos das observações de campo que foram de 5,59, 9,48, 13,30, 16,61 e 19,97m, respectivamente. Para o clone VE41, as estimativas foram 5,50, 9,42, 14,75, 17,16 e 19,72m e os valores medidos foram 5,16, 9,88, 14,92, 18,39 e 20,38m (Figura 9.b). Londero et al. (2015) estudando povoamentos de *E. Saligna* no município de Guaíba – RS, observou valores de 10,9, 16,7, 20,0, 24,0m de altura nas idades de 2 a 5 anos, respectivamente. Já Borges (2009), estudando híbridos de *E. grandis* x *E. Urophylla* na região de Itacambira-MG, observou 10,40, 15,60, 22,0m no 2°, 3° e 5° ano, respectivamente. A acurácia do modelo pode ser observada através das estatísticas de precisão descritas na Tabela 8, onde a correlação linear (R), coeficiente de determinação (R^2), erro padrão da estimativa (Sxy) e erro padrão relativo (Sxy%) alcançaram 0,9825, 0,9812, 0,76m e 8,21% para o clone I144, enquanto para VE41 foram de 0,9809, 0,9794, 0,88m e 9,03%.

Na DP de 1.111 arv.ha⁻¹ (Figura 9.c e 9.d) houve superestimativa no 1°ano de crescimento, logo após observou-se adequação dos valores estimados em relação aos observados. Para o clone I144 as estimativas foram 5,94, 9,44, 14,47, 16,78 e 19,16m (Figura 9.c) enquanto os medidos em campo foram 5,18, 9,61, 14,56, 17,77 e 18,91m. Já para o VE41 as estimativas atingiram 5,81, 9,57, 14,71, 17,09 e 19,56m enquanto as observações foram 4,87, 9,55, 13,56, 17,37, 21,20m (Figura 9.d). As estatísticas de precisão foram de 0,9828, 0,9814, 0,77m e 8,14% para o clone I144, enquanto para o VE41, 0,9812, 0,9798, 0,84m e 8,91%.

Na DP de 833 arv.ha⁻¹ (Figura 9.e e 9.f) também houve superestimativa no 1°ano de crescimento, logo após observou-se adequação dos valores estimados em relação aos observados. Para o clone I144 os valores estimados foram 6,07, 9,55, 14,19, 16,32 e 18,48m enquanto os medidos foram 4,60, 9,21, 14,02, 17,39 e 20,44m. Para o clone VE41 as estimativas atingiram 5,16, 9,07, 14,01, 16,41 e 18,86m enquanto os observados foram 5,04, 8,73, 13,03, 17,51, 20,03m. As estatísticas de precisão foram: 0,9687, 0,9663, 1,01m e 11,06% para o clone I144, enquanto para o clone VE41 foram: 0,9864, 0,9854, 0,71m e 7,81% nesta densidade de plantio.

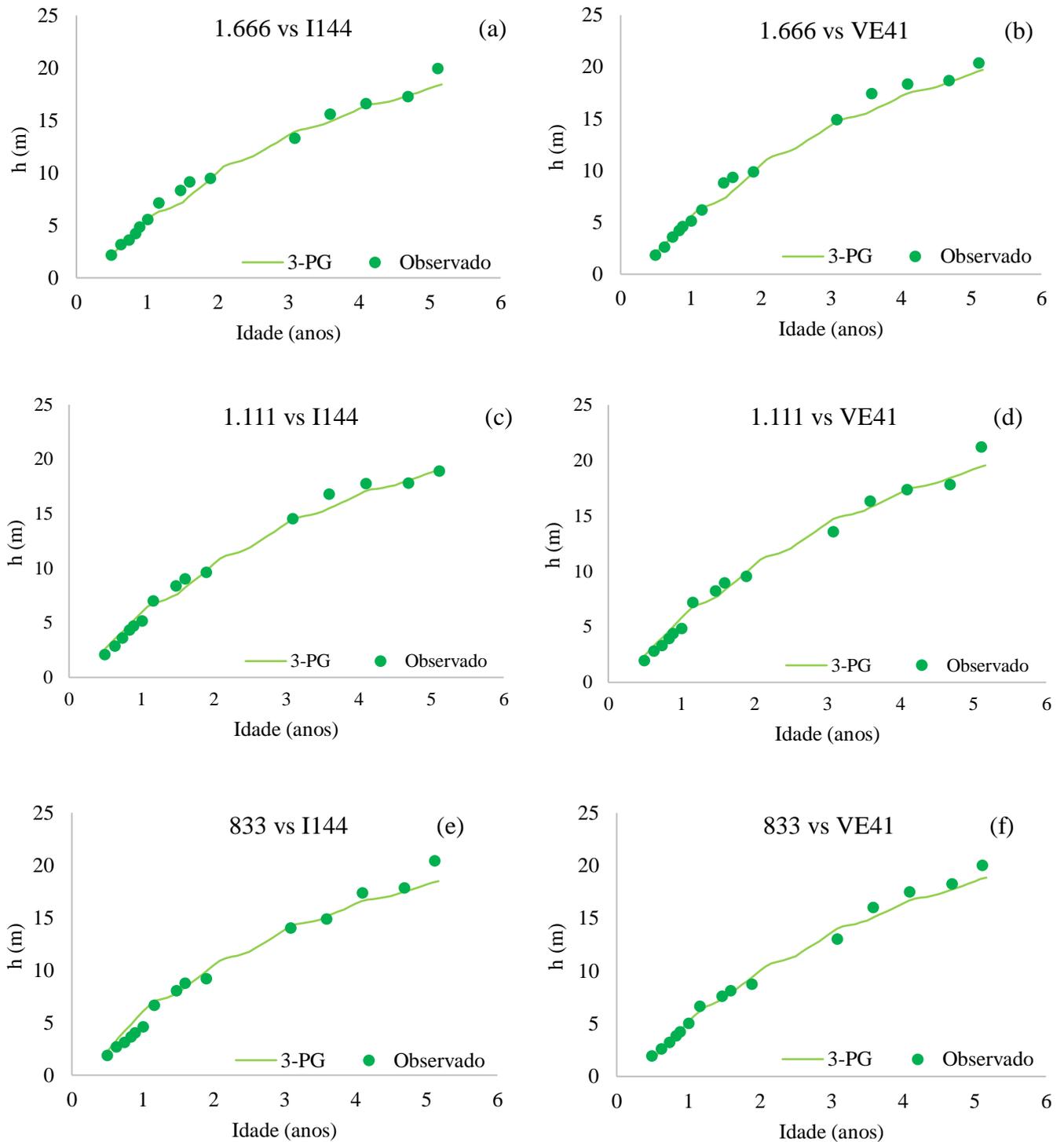


Figura 10. Valores observados e estimados(3-PG) para a variável altura total média para os clones I144 e VE41 cultivados nas densidades de populacionais 1.666, 1.111 e 833 árvores por hectare. Fonte:Autor.

4.4 Simulações para variável diâmetro a altura do peito (d)

A densidade de plantio ou espaçamento, tem forte influência sobre as taxas de crescimento, forma do tronco, qualidade da madeira produzida, idade de corte, época de realização de desbastes, práticas de manejo e, conseqüentemente, nos custos de produção. Além disso, considera-se que a DP se torna mais expressiva no diâmetro do que na altura das árvores. Esta influência foi observada tanto nos dados de inventário florestal quanto estimativas do modelo 3-PG, mostrando que em plantios mais adensados o diâmetro foi numericamente menor que em plantios de densidades menores, corroborando com a capacidade do modelo em considerar também a influência da competição.

Graficamente, as simulações do crescimento em diâmetro a altura do peito também ficaram muito próximas dos valores medidos na DP de 1.666 arv.ha⁻¹ (Figura 10.a e 10.b). As estimativas para o clone I144 foram de 5,02, 7,84, 11,47, 13,04 e 14,68cm valores próximos dos observados (5,39, 8,92, 11,66, 13,60, 14,90 cm) e semelhantes aos encontrados por Borges (2009) 8,44, 13,34 e 16,55cm. Para o VE41 as estimativas foram de 4,73, 7,49, 11,0, 12,52 e 14,11cm enquanto as medições foram de 5,17, 8,20, 10,91, 12,95, 14,66cm. As estatísticas de precisão foram de 0,9877, 0,9868, 0,49cm e 6,18% para o clone I144, enquanto para o clone VE41, foram: 0,9864, 0,9854, 0,50cm e 6,63%.

Na DP de 1.111 arv.ha⁻¹ (Figura 10.c e 10.d) houve superestimativa até o primeiro ano de crescimento para esta variável, logo após observou-se adequação dos valores estimados em relação aos observados para os dois clones, assim como na variável altura. Os valores estimados pelo modelo foram de 5,44, 8,44, 12,66, 14,57, 16,53cm e as observações de campo 5,29, 9,57, 13,50, 14,88, 15,98cm para o I144. Já para o VE41, as estimativas atingiram 5,20, 8,30, 12,43, 14,30, 16,23cm e as medições 4,92, 9,23, 12,26, 14,43, 16,35cm. Na região de Guaíba, *E. Saligna*, atingiu 9,4, 14,0, 16,4 e 18,4cm (LONDERO et al., 2015), no 2°, 3°, 4° e 5° ano. Apesar do maior desvio entre os valores medidos e estimados no primeiro ano de crescimento, as estatísticas de precisão foram de 0,9819, 0,9805, 0,67cm, 7,98% e 0,9856, 9845, 0,59cm, 7,34% para os clones I144 e VE41, respectivamente.

Na DP de 833 arv.ha⁻¹ (Figura 10.e e 10.f) também houve superestimativa no 1°ano de crescimento, logo após observou-se subestimativa acentuada para o clone I144. Em contrapartida, para o VE41 houve uma diminuição dos desvios. As estimativas foram de 5,92, 9,42, 14,11, 16,29 e 18,49cm enquanto os observados 5,00, 10,12, 14,67, 17,40 e 18,37cm para o I144. Já para o VE41 os estimados foram 4,84, 8,10, 12,03, 13,89 e 16,76cm enquanto os observados 4,82, 9,24, 12,42, 14,26 e 15,64cm. As estatísticas de precisão foram de 0,9675, 0,9650, 1,04cm, 11,52% e 0,9867, 0,9857, 0,57cm e 7,23%.

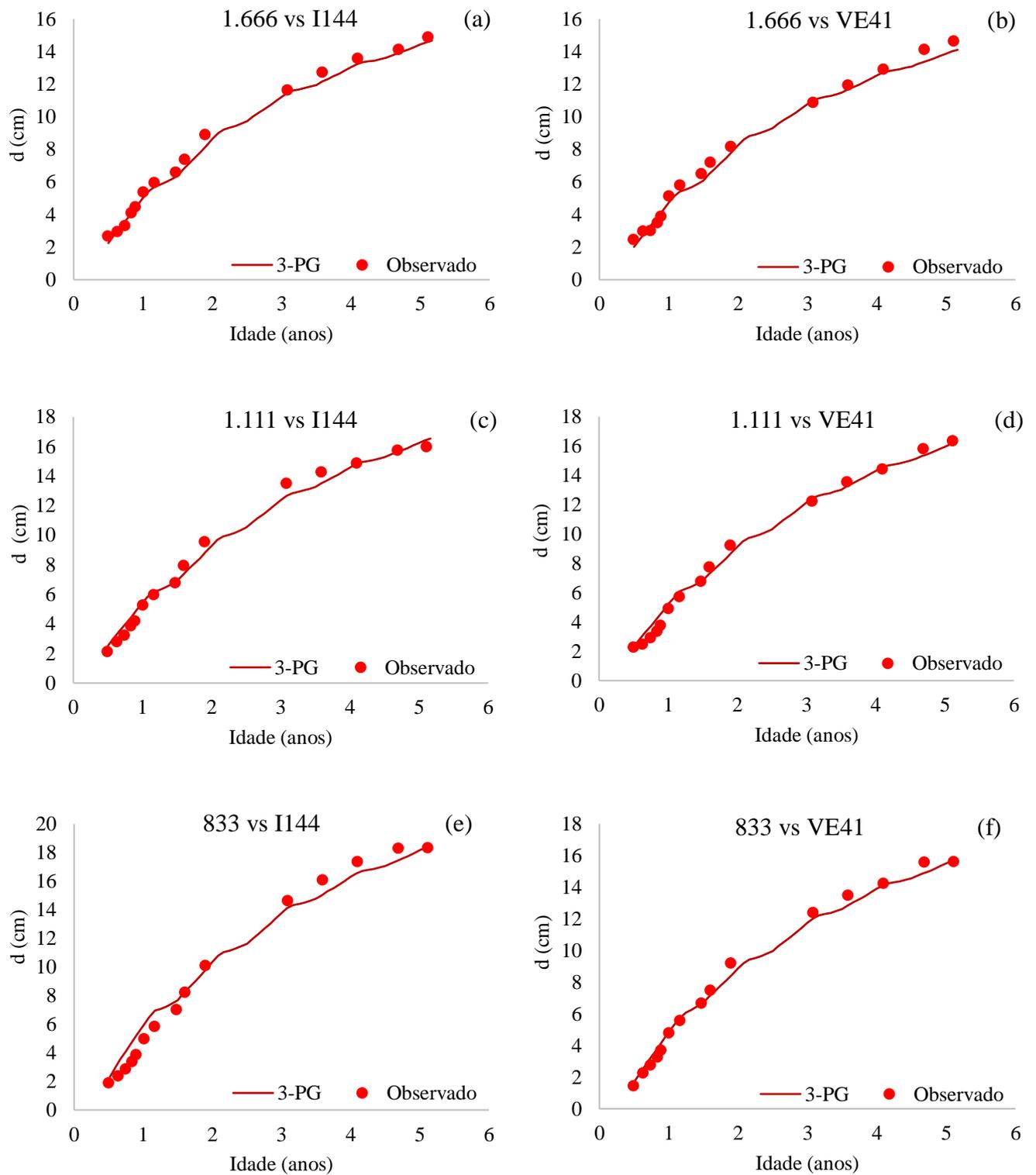


Figura 11. Valores observados e estimados(3-PG) para a variável diâmetro altura do peito médio para os clones I144 e VE41 cultivados nas densidades de populacionais 1.666, 1.111 e 833 árvores por hectare. Fonte:Autor.

4.5 Simulações para a variável volume de madeira (v)

Assim como nas variáveis diâmetro médio e altura total, ao analisar o comportamento da curva de produção de madeira (Figura 11), observa-se oscilações de acréscimo e decréscimo da taxa de produção ao longo do tempo, isso está relacionado dentre outros fatores, com a disponibilidade de água no solo e a temperatura, que influenciam os processos fisiológicos da floresta. Entre os meses de abril a agosto, há uma maior concentração de água precipitada, não havendo restrições pelo modulador de água (f_A). Por outro lado, quando se inicia o período seco, há um comprometimento significativo do armazenamento de água no solo (Figura 8), assim como um aumento na temperatura média, acima da temperatura ótima para o crescimento (25°C). Isso corrobora com as observações feitas por Borges (2009) e Attia *et al.* (2020), onde mencionam que em regiões de clima tropical, quando há uma má distribuição das chuvas durante o ano e diminuição de água no solo, conseqüentemente haverá queda nas taxas de crescimento, por outro lado, em regiões de clima subtropical, onde não há o déficit hídrico, a sazonalidade da temperatura foi a responsável por quedas na produção.

Graficamente, os valores estimados de volume ficaram muito próximos dos observados em campo para o clone I144 na DP de 1.666 arv.ha⁻¹ (Figura 11.a) enquanto que para o clone VE41 (Figura 11.b), houve superestimativa a partir do segundo ano. As estimativas para o clone I144 atingiram 44,1, 60,2, 86,0, 118,8 e 146,0 m³.ha⁻¹ enquanto as observações foram de 42,3, 53,7, 83,9, 113,3 e 154,18 m³.ha⁻¹. Para o VE41, as estimativas foram de 43,8, 60,4, 87,2, 121,6 e 150,2 m³.ha⁻¹ enquanto os valores medidos 41,3, 48,7, 80,5, 111,7 e 146,6 m³.ha⁻¹. As estatísticas de precisão foram de 0,9794, 0,9725, 7,0 m³.ha⁻¹, 7,82% e 0,9635, 0,9514, 9,9 m³.ha⁻¹ e 11,58%, para o I144 e VE41 respectivamente.

Na DP 1.111 arv.ha⁻¹ (Figura 11.c e 11.d) houve superestimativa para o I144 até o segundo ano de crescimento, enquanto que para o VE41 o modelo manteve a tendência de superestimar. As estimativas para o clone I144 atingiram 35,6, 48,4, 72,1, 103,3 e 129,0 m³.ha⁻¹ enquanto as observações foram de 30,7, 39,9, 74,8, 103,5 e 128,9 m³.ha⁻¹. Para o VE41, as estimativas foram de 34,0, 46,0, 68,4, 98,0 e 122,5 m³.ha⁻¹ enquanto os valores medidos 29,6, 37,7, 68,7, 83,3 e 118,6 m³.ha⁻¹. As estatísticas de precisão foram de 0,9829, 0,9771, 5,8 m³.ha⁻¹, 7,79% e 0,9453, 0,9271, 10,3 m³.ha⁻¹ e 15,27%, para o I144 e VE41 respectivamente.

Na DP de 833 arv.ha⁻¹ (Figura 11.e e 11.f) também houve superestimativa entre o 1° e 3° ano de crescimento, logo após observou-se subestimativa para o clone I144, enquanto que para o VE41, apesar dos valores serem maiores, ficaram próximos dos medidos. As estimativas

para o clone I144 atingiram 37,2, 47,5, 65,0, 88,3 e 106,5 $\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ enquanto as observações foram de 24,0, 31,8, 48,1, 88,0 e 113,6 $\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$. Para o VE41, as estimativas foram de 24,7, 32,9, 48,0, 69,1 e 86,4 $\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ enquanto os valores medidos 20,7, 26,4, 44,0, 65,3 e 90,3 $\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$. As estatísticas de precisão foram de 0,8260, 0,7680, 15,84 $\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$, 25,91% e 0,9629, 0,9505, 5,8 $\text{m}^3\cdot\text{ha}^{-1}$ e 11,81%, para o I144 e VE41 respectivamente.

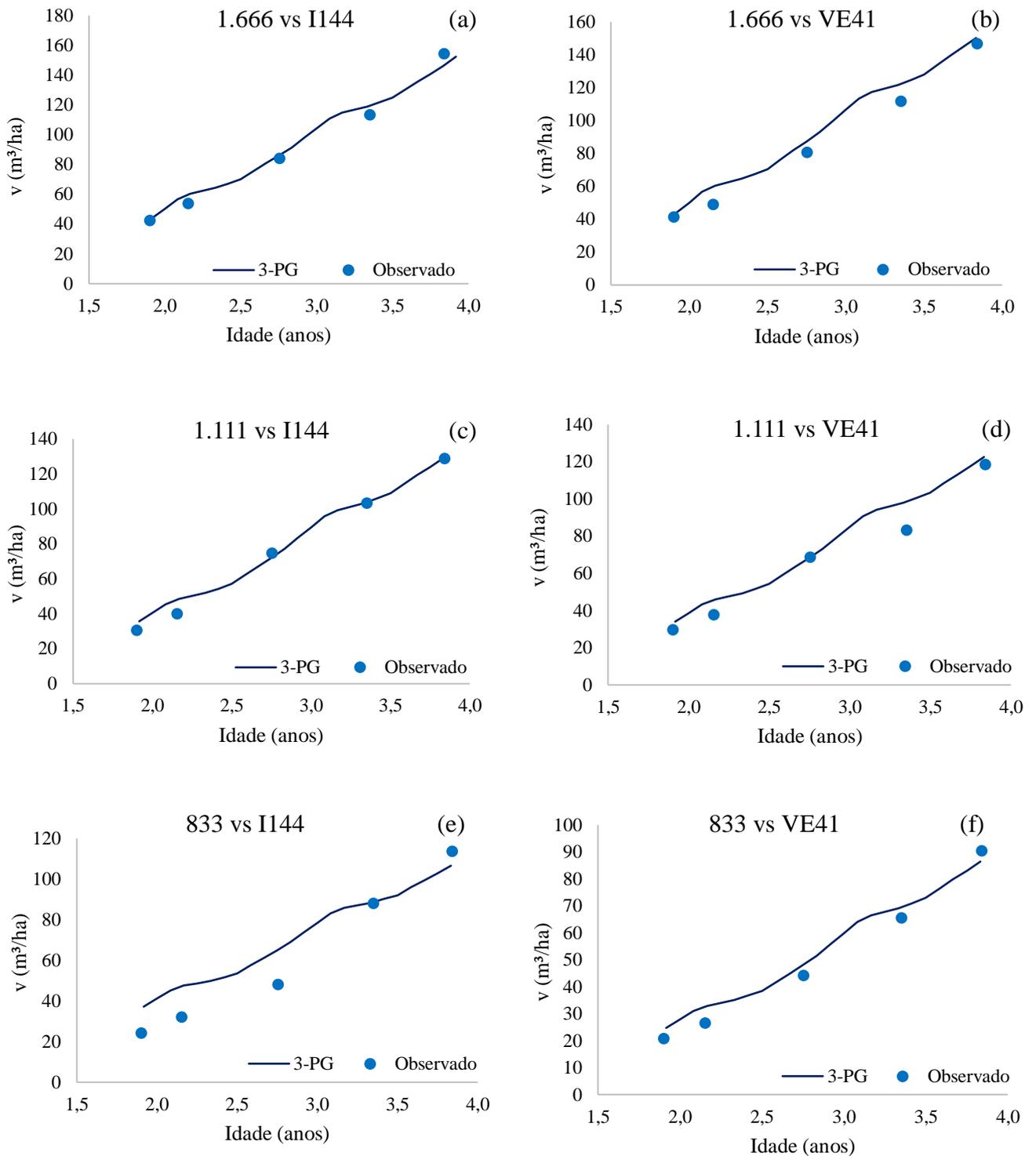


Figura 12. Valores observados e estimados(3-PG) para a variável volume de madeira para os clones I144 e VE41 cultivados nas densidades de populacionais 1.666, 1.111 e 833 árvores por hectare. Fonte:Autor.

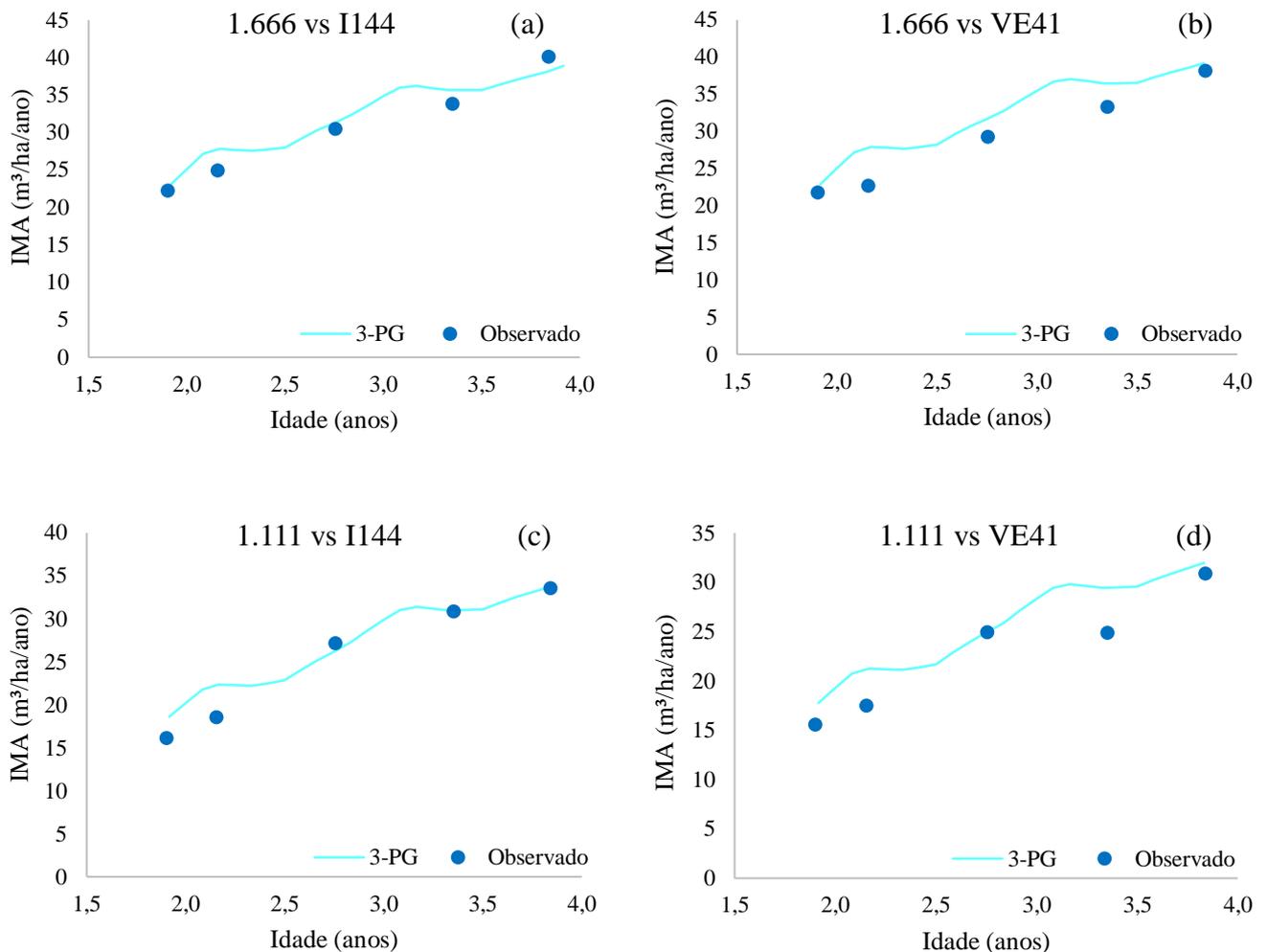
4.6 Simulações para a variável incremento médio anual (IMA)

Graficamente, as estimativas para o incremento médio anual (IMA) na DP de 1.666 arv.ha⁻¹ ficaram próximas das observações para o clone I144 (Figura 12.a). observou-se que o modelo superestimou levemente o IMA do clone VE41 (Figura 12.b). As estimativas para o clone I144 atingiram 23,0, 27,8, 31,2, 35,6 e 38,0 m³.ha⁻¹.ano⁻¹ enquanto as observações foram de 22,2, 24,9, 30,4, 33,8 e 40,1 m³.ha⁻¹.ano⁻¹. Para o VE41, as estimativas foram de 22,8, 27,8, 31,7, 36,4 e 39,1 m³.ha⁻¹.ano⁻¹ enquanto os valores medidos 21,7, 22,6, 29,2, 33,3 e 38,1 m³.ha⁻¹.ano⁻¹. As estatísticas de precisão foram de 0,8968, 0,8624, 2,39 m³.ha⁻¹.ano⁻¹, 7,88% e 0,8165, 0,7554, 3,91 m³.ha⁻¹ e 13,5%, para o I144 e VE41 respectivamente.

Os valores observados e estimados neste estudo, estão próximos do incremento médio anual nacional (FIEA, 2018), sendo que o clone I144 teve uma produtividade média semelhante a encontrada pela parametrização de Borges (2009) para Minas Gerais que foi de 42,78 m³.ha⁻¹.ano⁻¹ enquanto o VE41 teve uma produtividade estimada próxima a encontrada por Oliveira et al. (2018) e Lemos et al. (2012) para os estados de Minas Gerais e São Paulo, respectivamente. Além disso, Silva (2021) comparando 16 parametrizações que abrangeu os estados de Minas Gerais, Bahia, Pará, Amapá, Espírito Santo e Rio Grande do Sul, encontrou uma produtividade média global de 41,6 m³.ha⁻¹.ano⁻¹ para idade de 7 anos, mostrando o potencial produtivo da região de estudo numa idade em que o plantio ainda se encontra em pleno crescimento.

Na DP de 1.111 arv.ha⁻¹ (Figura 12.c e 12.d) houve superestimativa entre o 1° e 2° ano de crescimento, logo após observou-se subestimativa para o clone I144, enquanto para o VE41, o modelo manteve tendência de superestimar. As estimativas para o clone I144 atingiram 18,6, 22,3, 26,2, 30,9 e 33,6 m³.ha⁻¹.ano⁻¹ enquanto as observações foram de 16,1, 18,5, 27,1, 30,8 e 33,5 m³.ha⁻¹.ano⁻¹. Para o VE41, as estimativas foram de 17,7, 21,2, 24,8, 29,4 e 31,9 m³.ha⁻¹.ano⁻¹ enquanto os valores medidos 15,5, 17,5, 24,8, 24,9 e 30,8 m³.ha⁻¹.ano⁻¹. As estatísticas de precisão foram de 0,8790, 0,8387, 2,68 m³.ha⁻¹.ano⁻¹, 10,6% e 0,7976, 0,7302, 3,6 m³.ha⁻¹ e 16,20%, para o I144 e VE41 respectivamente.

Na DP de 833 arv.ha⁻¹ (Figura 12.e e 12.f) também houve superestimativa entre o 1º e 3º ano de crescimento, logo após observou-se adequação entre a curva estimada e as observações, para o clone I144. Já para o clone VE41, o modelo superestimou levemente o IMA até próximo dos 3 anos e 6 meses, logo após, houve subestimativa desta variável. As estimativas do IMA para o clone I144 atingiram 19,4, 21,9, 23,6, 26,5 e 27,8 m³.ha⁻¹.ano⁻¹ enquanto as observações foram de 12,6, 14,8, 17,4, 26,2 e 29,5 m³.ha⁻¹.ano⁻¹. Para o VE41, as estimativas foram de 12,9, 15,1, 17,4, 20,7 e 22,5 m³.ha⁻¹.ano⁻¹ enquanto os valores medidos 10,8, 12,2, 16,0, 19,5 e 23,5 m³.ha⁻¹.ano⁻¹. As estatísticas de precisão foram de 0,4538, 0,2717, 6,7 m³.ha⁻¹.ano⁻¹, 33,6% e 0,8058, 0,7411, 2,3 m³.ha⁻¹ e 14,5%, para o I144 e VE41 respectivamente.



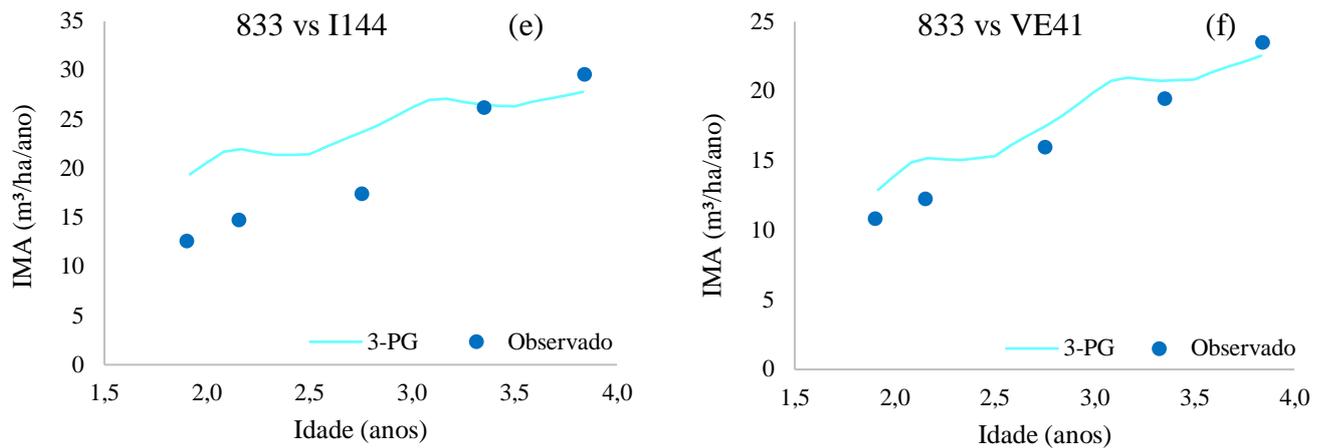


Figura 13. Valores observados e estimados(3-PG) para a variável incremento médio anual para os clones I144 e VE41 cultivados nas densidades de populacionais 1.666, 1.111 e 833 árvores por hectare. Fonte:Autor.

Tabela 9. Estatísticas de precisão do modelo 3-PG ao simular a altura total, diâmetro a altura do peito, volume e incremento médio anual de madeira. Fonte:Autor.

Densidade Populacional (arv.ha ⁻¹)	Clone	Variável	Raj. ²	Syx	Syx%	n
1.666	I144	h	0,9812	0,76	8,21%	15
		d	0,9868	0,49	6,18%	15
		v	0,9725	7,00	7,82%	5
		IMA	0,8624	2,39	7,88%	5
	VE41	h	0,9794	0,88	9,03%	15
		d	0,9854	0,50	6,63%	15
		v	0,9514	9,93	11,58%	5
		IMA	0,7554	3,91	13,50%	5
1.111	I144	h	0,9814	0,77	8,14%	15
		d	0,9805	0,67	7,98%	15
		v	0,9771	5,88	7,79%	5
		IMA	0,8387	2,68	10,63%	5
	VE41	h	0,9798	0,84	8,91%	15
		d	0,9845	0,59	7,34%	15
		v	0,9271	10,32	15,27%	5
		IMA	0,7302	3,68	16,20%	5
		h	0,9663	1,01	11,06%	15
		d	0,9650	1,04	11,52%	15

833	I144	v	0,7680	15,84	25,91%	5
		IMA	0,2717	6,78	33,69%	5
	VE41	h	0,9854	0,71	7,81%	15
		d	0,9857	0,57	7,23%	15
		v	0,9505	5,83	11,81%	5
		IMA	0,7411	2,38	14,53%	5

Em que: h = altura total; v = volume de madeira com casca; d = diâmetro a altura do peito médio, R = correlação linear; R^2_{aj} = coeficiente de determinação ajustado; Sxy = erro padrão absoluto; Sxy% = erro padrão relativo; n = número de pares observados; utilizando o p-valor < 0,01: nível de significância de 99%.

4.7 Eficiência estatística do Modelo 3-PG

Na Tabela 10 está o resumo estatístico da eficiência do modelo para cada tratamento, na qual foram confrontados os valores estimados (3-PG) com os observados em campo, usados na modelagem do crescimento de eucalipto. Observa-se que nos tratamentos envolvendo as DP de 1.666 e 1.111 arv.ha^{-1} todas as variáveis analisadas tiveram hipótese nula (H_0) aceita, ou seja, $\beta_0 = 0$ e $\beta_1 = 1$ mostrando que os valores estimados pelo modelo 3-PG são estatisticamente iguais aos observados em campo.

Na densidade de plantio de 833 arv.ha^{-1} com o clone I144, apenas as variáveis volume e incremento médio anual não diferiram estatisticamente dos valores medidos (Tabela 10). Em contrapartida, as variáveis d e h tiveram hipótese nula rejeitada, ou seja, o parâmetro β_1 foi diferente de 1, assim como β_0 foi diferente de 0. Ressalta-se que o embasamento teórico do Teste T para os parâmetros, é de que para modelos processuais o mais importante é que β_1 não seja estatisticamente diferente de 1, o que resultaria em adequado tratamento aos processos envolvidos. Já para a DP de 833 arv.ha^{-1} com o clone VE41, todas as variáveis estimadas não diferiram estatisticamente dos valores observados. O resumo estatístico do presente estudo teve valores de correlação linear e coeficiente de determinação superiores a 90%, mostrando que o modelo conseguiu explicar mais de 90% das variações dos dados observados em campo, mostrando a acurácia do modelo em estimar as variáveis estudadas. Os parâmetros estatísticos deste trabalho foram superiores aos observados por Oliveira (2016), testando a parametrização realizada por Borges (2009).

Tabela 10. Análise estatística da eficiência do modelo 3-PG ao simular o crescimento em h, d, v e IMA. Fonte:Autor.

Densidade Populacional (arv.ha ⁻¹)	Clone	Variável	n	β_0	β_1	R ² aj
1.666	I144	h	15	0,006 ^{ns}	1,041 ^{ns}	0,9798
		d	15	0,018 ^{ns}	1,034 ^{ns}	0,9879
		v	5	-9,267 ^{ns}	1,084 ^{ns}	0,9795
		IMA	5	-5,527 ^{ns}	1,149 ^{ns}	0,9016
	VE41	h	15	-0,287 ^{ns}	1,070 ^{ns}	0,9817
		d	15	-0,048 ^{ns}	1,046 ^{ns}	0,9882
		V	5	-7,367 ^{ns}	1,005 ^{ns}	0,9841
		IMA	5	-3,827 ^{ns}	1,038 ^{ns}	0,8838
1.111	I144	h	15	-0,646 ^{ns}	1,068 ^{ns}	0,9781
		d	15	-0,582 ^{ns}	1,067 ^{ns}	0,9765
		v	5	-3,973 ^{ns}	1,023 ^{ns}	0,9798
		IMA	5	-6,898 ^{ns}	1,219 ^{ns}	0,9311
	VE41	h	15	-0,843 ^{ns}	1,073 ^{ns}	0,9771
		d	15	-0,713 ^{ns}	1,073 ^{ns}	0,9853
		v	5	-4,247 ^{ns}	0,973 ^{ns}	0,9525
		IMA	5	-2,832 ^{ns}	1,021 ^{ns}	0,8208
833		h	15	-1,595 ^{**}	1,144 ^{**}	0,9851
		d	15	-1,506 ^{**}	1,135 ^{**}	0,9808
		v	5	-30,48 ^{ns}	1,329 ^{ns}	0,9678
		IMA	5	-30,39 ^{ns}	2,118 ^{ns}	0,8945
		h	15	-0,335 ^{ns}	1,060 ^{ns}	0,9842
		d	15	-0,495 ^{ns}	1,072 ^{ns}	0,9866
		v	5	-9,286 ^{ns}	1,123 ^{ns}	0,9868
		IMA	5	-6,678 ^{ns}	1,300 ^{ns}	0,9525

Em que: n = número de pares observado/estimado usados no ajuste da equação; β_0 e β_1 = coeficientes da equação de regressão ajustada pelo modelo Observado = $\beta_0 + \beta_1$ *Estimado; ** significativo pelo teste t ($p < 0,01$); ns = não significativo pelo teste t ($p < 0,01$).

Portanto, as simulações realizadas para estas variáveis, mostrou-se satisfatória, uma vez que, as estimativas do modelo ficaram próximas dos valores observados no inventário florestal, e apesar do modelo apresentar oscilações que geraram maiores desvios, a eficiência do modelo mostrou que não houve diferença significativa, sendo assim os valores estimados são iguais aos observados, do ponto de vista estatístico, a um nível de confiança de 99%, assim como nos

estudos de Borges (2009), Londero et al. (2015), Almeida et al. (2004), Caldeira (2019), Oliveira (2016), desta forma, o modelo 3-PG demonstrou ser capaz de estimar as variáveis estudadas.

5. CONCLUSÃO

Considerando as boas estimativas e o resultado da eficiência do modelo para as variáveis estudadas, conclui-se que a parametrização e a calibração do modelo 3-PG para os dois clones e três densidades de populacionais foi eficiente para a região de Rio Largo – AL.

REFERÊNCIAS BIBLIOGRÁFICAS

ALBER, J.D.; FEDERER, C.A. A generalized, lumped-parameter model of photosynthesis, evapotranspiration and net primary production in temperate and boreal forest ecosystems. *Oecologia*, 92:462-474, 1992.

ALMEIDA, A.C. et al. Mapping the effect of spatial and temporal variation in climate and soils on Eucalyptus plantation production with 3-PG, a process-based growth model. *Forest Eco.Management*, Amsterdam, v. 259, p.1730-1740, 2010.

ALMEIDA, A. C. et al. Parameterisation of 3-PG model for fast-growing Eucalyptus grandis plantations. *For. Ecol. Manage.*, v. 193, p. 179– 195, 2004b.

ALVARES, C. A. Mapeamento e modelagem edafoclimática da produtividade de plantações de Eucalyptus no sul do Estado de São Paulo. 2011. 279 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – ESALQ-USP, Piracicaba, 2011.

ATTIA, A.; NOUVELLON, Y.; CUADRA, S.; CABRAL, O.; LACLAU, J. P.; GUILLEMOT, J.; CAMPOE, O.; STAPE, J. L.; GALDOS, M.; LAMPARELLI, R. Modelling carbon and water balance of Eucalyptus plantations at regional scale: effect of climate, soil and genotypes. *Forest Ecology and Management*, Amsterdam, v. 449, p. 117460, July 2019.

BINKLEY, D. et al. The interactions of climate, spacing and genetics on clonal Eucalyptus plantations across Brazil and Uruguay. *Forest Ecology and Management* v. 405, p. 271-283, 2017.

BORGES, J. S. Parametrização, calibração e validação do modelo 3-PG para eucalipto na região do cerrado de Minas Gerais. 2009. 89 f. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2009.

CARVALHO, O. M. Classificação e característica físico-hídrica de solos de Rio Largo, cultivados com cana-de-açúcar. 2003. 74 p. Dissertação (Mestrado em Agronomia) - Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2003.

CADALTO, S. L.; SCHUMACHER, M. V. O uso da água em plantações florestais - Uma revisão. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v.23, n.3, p.507-516, 2013.

CALDEIRA, D. et al. Forest Ecology and Management Multisite evaluation of the 3- PG model for the highest phenotypic plasticity Eucalyptus clone in Brazil. *Forest Ecology and Management*, [s. l.], v. 462, n. November 2019, p. 117989, 2020. acesso: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2020.117989>, 12 de janeiro de 2023.

CASTRO, R. V. O, et al. Crescimento e produção de plantios comerciais de eucalipto estimados por duas categorias de modelos. *Pesquisa Agropecuária Brasileira*, vol. 48, no 3, março de 2013, p. 287–95.

COOPS, N. C.; WARING, R. H. Estimating forest productivity in the eastern Siskiyou Mountains of southwestern Oregon using a satellite driven process model, 3-PGS. *Canadian Journal of Forest Research*, [s. l.], v. 31, n. 1, p. 143–154, 2001.

FERREIRA, J. M. A. – Ganho de produtividade de plantações clonais de *Eucalyptus urophylla* e suas correlações com variáveis edafoclimáticas e silviculturais. 2007, 84p. Dissertação (Mestrado em Recursos Florestais), Escola Superior de Agricultura “Luiz de Queiroz”, Universidade de São Paulo, Piracicaba, 2007.

FERREIRA, O.C (2005). ECONOMIA & ENERGIA REVISTA, Emissões de Gases de Efeito Estufa na Produção e no Uso do Carvão Vegetal na Siderurgia.

FIEA – Federação da Indústrias do Estado de Alagoas. 2018. Eucalipto é alternativa para diversificação econômica de Alagoas. acesso: <http://www.fiea.org.br/noticias/eucalipto-e>, 09 de janeiro de 2023.

FLORIANO, E. P. INVENTÁRIO FLORESTAL. Rio Largo: Edição do autor, 2021. 110 p.

FLORIANO, E. P. Potencialidades de produção florestal em Alagoas. Rio Largo: Edição do autor, 2018. 182 p.

GONZALEZ-BENECKE, C. A., et al. Parameterization of the 3-PG Model for *Pinus Elliottii* Stands Using Alternative Methods to Estimate Fertility Rating, Biomass Partitioning and Canopy Closure. *Forest Ecology and Management*, vol. 327, setembro de 2014, p. 55–75.

GENTIL, M. S. Transpiração e eficiência do uso da água em árvores clonais de *Eucalyptus* aos 4 anos em áreas com e sem irrigação em Eunápolis, Bahia. Dissertação de Mestrado: Silvicultura e Manejo, ESALQ/USP, 71p., 2010.

GRUPTA, R., SHARMA L. K. The Process-Based Forest Growth Model 3-PG for Use in Forest Management: A Review. *Ecological Modelling*, vol. 397, abril de 2019, p. 55–73.

HUSCH, B.; MILLER, C.I; KERSHAW, J. *Forest mensuration*. 4. ed. New Jersey: John Willey e Sons, Inc, 2003. 443 p.

IBGE. Site institucional do Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. [Rio de Janeiro, 2005. Disponível em: Acesso em: 26/03/2023.

LEMOS, C. C. Z. Aprimoramentos, teste e uso do modelo 3-PG em plantios clonais de *Eucalyptus* no nordeste do estado de São Paulo. 2011, 171 p. Tese (Doutorado em Recursos Florestais) – ESALQ/USP, Piracicaba, 2011.

LEITE, F. P. et al., Relações hídricas em povoamento de eucalipto com diferentes densidades populacionais. *Revista Brasileira de Ciência do Solo*, Viçosa, v. 23, p. 9-16, 1999.

LEMOS et al. Estimativa, zoneamento e análise de sensibilidade da produtividade florestal de *Eucalyptus* no Nordeste do Estado de São Paulo através do modelo 3-PG. *Scientia Florestalis*, Piracicaba, v. 46, n. 119, p. 459-471, set. 2018.

LONDERO, E. K. et al. Calibração do modelo 3-PG para *Eucalyptus saligna* Smith na região de Guaíba – RS. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 25, n. 2, p. 293-305, abr.-jun., 2015.

LANDSBERG, J. J.; WARING, R. H. A generalized model of forest productivity using simplified concepts of radiation-use efficiency, carbon balance and partitioning. *Forest Ecology and Management*, 95: p. 209 – 228, 1997.

LANDSBERG, J. J.; WARING, R. H.; COOPS, N. C. Performance of the forest productivity model 3-PG applied to a wide range of forest types. *Forest Ecology and Management*, 172: p. 199 – 214, 2003.

OLIVEIRA, C. M. M., et al. MODELO 3-PG NA PREVISÃO DO POTENCIAL PRODUTIVO DE ÁREAS PARA PLANTIOS COMERCIAIS DE *Eucalyptus* spp. *Ciência Florestal*, vol. 28, no 1, abril de 2018, p. 249–62.

PREVEDELLO, J. Dinâmica do armazenamento e da disponibilidade de água em argissolo sob eucalipto e campo nativo. 2012. 120 p. Tese (Doutorado em Silvicultura) – Universidade Federal de Santa Maria, Santa Maria – RS, 2012.

PONTES, M. S. PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO 3-PG PARA TECA (*Tectona grandis* L.f.) E DOS SISTEMAS FERTI-UFV E NUTRI-UFV PARA SUBSIDIAR O SEU MANEJO NUTRICIONAL. 2011. Dissertação (Mestrado) – Universidade Federal de Viçosa, Viçosa, 2011.

REIS, M. G.; RIBEIRO, A.; BAESSO, R. C. E.; SOUZA, W. G.; FONSECA, S.; LOOS, R. A. Balanço hídrico e de energia para plantios de eucalipto com cobertura parcial do solo. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 24, n. 1, p. 117-126, jan.-mar., 2014.

RODRÍGUEZ-SUÁREZ, J. A.; IGLESIAS, M. L.; DIAZ-FIERROS, F. Application of the 3PG forest growth model to a *Eucalyptus globulus* plantation in Northwest Spain. *European Journal of Forest Research*, v. 129, n. 4, p. 573-583, 2010.

RUNNING, S. W.; GOWER, S.T. FOREST-BGC, a general model of forest ecosystem process for regional application, II. Dynamic carbon allocation and nitrogen budgets. *Tree Physiology*, 9:147-160, 1991.

SANTOS, M. A. Balanço de radiação, energia e água em cana-de-açúcar na região dos tabuleiros costeiros de Alagoas. 2010. 69 p. Trabalho de Conclusão de Curso – Universidade Federal de Alagoas, Rio Largo, 2010.

SAMPAIO, T. Cultivo de eucalipto em alagoas ganha mercado nacional. *Jornal de Alagoas*, Maceió, 02, novembro e 2021. Disponível em: <<https://www.jornaldealagoas.com.br/agro/2021/11/02/2791-cultivo-de-eucalipto-em-alagoas-ganha-mercado-nacional>>. Acesso em: 18, janeiro de 2023.

SOUZA, J.L.; MOURA FILHO, G.; LYRA, R.F.F. TEODORO, I.; SANTOS, E.A.; SILVA, J.L.; SILVA, P.R.T.; CARDIM, A.H.; AMORIN, E.C. Análise da precipitação pluvial e temperatura do ar na região do tabuleiro costeiro de Maceió, AL, período de 1972-2001. *Revista Brasileira de Agrometeorologia*. Santa Maria, v.12, n.1, p.131-141, 2004.

STAPE, J.L., BINKLEY, D., RYAN, M.G. Eucalyptus production and the supply, use and efficiency of use of water, light and nitrogen across a geographic gradient in Brazil. *Forest Ecology and Management*, Amsterdam, v. 193, p.17–31, 2004.

STAPE, J. L.; RYAN, M. G.; BINKLEY, D. Testing the utility of the 3-PG model for growth of *Eucalyptus grandis* x *urophylla* with natural and manipulated supplies of water and nutrients. *Forest Ecology and Management*, Amsterdam, v. 193, n. 1-2, p. 219-234, May. 2004.

STAPE, J.L.; MOREIRA, R.M. Similarity of nutrient limitation ranking effects on forest productivity among distinct genetic materials in a Sandy soil in Brazil. In: INTERNATIONAL IUFRO CONFERENCE, 2004, Aveiro. INTERNATIONAL IUFRO CONFERENCE OF THE

WP2.08.03 ON SILVICULTURE AND IMPROVMENT OF EUCALYPTUS, 2004. v.1. p. 595-596.

WANG, Y, P.; JARVIS, P.G. Description and validation of na array model – MAESTRO. *Agric. For. Meteorol.* 51, 257-280. 1990.

WEINSTEIN, D.A.; BELOIN, R. M.; YANAI, R. D. Modeling changes in red spruce carbono balance and allocation in response to interacting ozone and nutriende stresses. *Tree Physiology*, 9:127-146, 1991.

WEI, L, et al. 3-PG Simulations of Young Ponderosa Pine Plantations under Varied Management Intensity: Why Do They Grow so Differently. *Forest Ecology and Management*, vol. 313, fevereiro de 2014, p. 69–82.

VILLA NOVA, N. A.; MOREIRA, P. R.; PEREIRA, A. B. Eficiência de captura de energia solar por um dossel de Eucalyptus sob várias densidades de plantio. *Revista Brasileira de Agrometeorologia, Sete Lagoas*, v. 11, n. 2, p. 63-68, 2003.

APÊNDICE

Tabela 11. Detalhamento dos dados de inventário florestal contínuo utilizados na análise da eficiência do modelo 3-PG e estimativas geradas após as simulações das variáveis diâmetro a altura do peito (d) e altura total (h) na DP de 1.666 árvores por hectare. Fonte:Autor.

Densidade Populacional (arv.ha ⁻¹)	Clone	Idade	d (cm)	3-PG (cm)	h (m)	3-PG (m)
1.666	I144	0,5	2,70	2,35	2,21	2,31
		0,6	2,96	3,32	3,17	3,42
		0,7	3,33	3,75	3,62	3,93
		0,8	4,12	4,19	4,24	4,45
		0,9	4,49	4,68	4,88	5,04
		1,0	5,39	5,15	5,59	5,62
		1,2	5,97	5,84	7,15	6,48
		1,5	6,62	6,55	8,37	7,38
		1,6	7,41	7,31	9,17	8,37
		1,9	8,92	8,02	9,48	9,29
		3,1	11,66	11,67	13,30	14,20
		3,6	12,75	12,07	15,62	14,76
		4,1	13,60	13,21	16,61	16,35
		4,7	14,14	14,04	17,28	17,52
5,1	14,90	14,74	19,97	18,51		
1.666	VE41	0,5	2,50	2,12	1,88	2,16
		0,6	3,00	3,06	2,63	3,31
		0,7	3,04	3,49	3,59	3,86
		0,8	3,51	3,92	4,23	4,42
		0,9	3,90	4,40	4,63	5,06
		1,0	5,17	4,87	5,16	5,69
		1,2	5,84	5,55	6,21	6,63
		1,5	6,52	6,24	8,82	7,61
		1,6	7,23	6,98	9,38	8,68
		1,9	8,20	7,66	9,88	9,67
		3,1	10,91	11,24	14,92	15,12
		3,6	11,97	11,62	17,44	15,73
		4,1	12,95	12,79	18,39	17,58
		4,7	14,14	13,62	18,69	18,93
5,1	14,66	14,40	20,38	20,20		

Tabela 12. Detalhamento dos dados de inventário florestal contínuo utilizados na análise da eficiência do modelo 3-PG e estimativas geradas após as simulações das variáveis volume (v) e incremento médio anual (IMA) na DP de 1.666 árvores por hectare. Fonte:Autor.

Densidade Populacional (arv.ha ⁻¹)	Clone	Idade	v (m ³ .ha ⁻¹)	3-PG (m ³ .ha ⁻¹)	IMA (m ³ .ha ⁻¹)	3-PG (m ³ .ha ⁻¹ .ano ⁻¹)
1.666	I144	1,9	42,4	46,9	22,3	24,5
		2,2	53,8	63,9	24,9	29,5
		2,8	84,0	90,8	30,5	33,0
		3,4	113,3	125,0	33,8	37,5
		3,8	154,2	152,2	40,1	39,7
1.666	VE41	1,9	41,4	46,8	21,7	24,4
		2,2	48,8	64,3	22,6	29,7
		2,8	80,6	92,7	29,2	33,7
		3,4	111,7	129,1	33,3	38,7
		3,8	146,7	159,4	38,2	41,6

Tabela 13. Detalhamento dos dados de inventário florestal contínuo utilizados na análise da eficiência do modelo 3-PG e estimativas geradas após as simulações das variáveis diâmetro a altura do peito (d) e altura total (h) na DP de 1.111 árvores por hectare. Fonte:Autor.

Densidade Populacional (arv.ha ⁻¹)	Clone	Idade	d (cm)	3-PG (cm)	h (m)	3-PG (m)
1.111	I144	0,5	2,14	2,62	2,09	2,76
		0,6	2,81	3,65	2,88	3,90
		0,7	3,24	4,10	3,60	4,41
		0,8	3,88	4,56	4,35	4,94
		0,9	4,23	5,08	4,72	5,53
		1,0	5,29	5,58	5,18	6,10
		1,2	5,99	6,31	7,03	6,95
		1,5	6,80	7,06	8,38	7,83
		1,6	7,96	7,88	9,03	8,78
		1,9	9,57	8,62	9,61	9,66
		3,1	13,50	12,93	14,56	14,80
		3,6	14,29	13,42	16,82	15,39
		4,1	14,88	14,88	17,77	17,15
		4,7	15,75	15,92	17,83	18,41
		5,1	15,98	16,88	18,91	19,59
1.111	VE41	0,5	2,30	2,40	1,97	2,54
		0,6	2,51	3,40	2,81	3,69
		0,7	2,92	3,86	3,32	4,23
		0,8	3,39	4,32	3,93	4,77
		0,9	3,79	4,84	4,39	5,39
		1,0	4,92	5,35	4,87	5,98
		1,2	5,74	6,24	7,18	7,06
1,5	6,78	6,95	8,23	7,91		
		1,6	7,74	7,73	8,94	8,87

1,9	9,23	8,46	9,55	9,76
3,1	12,26	12,68	13,56	15,03
3,6	13,57	13,16	16,33	15,64
4,1	14,43	14,60	17,37	17,47
4,7	15,84	15,62	17,82	18,78
5,1	16,35	16,57	21,20	19,99

Tabela 14. Detalhamento dos dados de inventário florestal contínuo utilizados na análise da eficiência do modelo 3-PG e estimativas geradas após as simulações das variáveis volume (v) e incremento médio anual (IMA) na DP de 1.111 árvores por hectare. Fonte:Autor.

Densidade Populacional (arv.ha ⁻¹)	Clone	Idade	v (m ³ .ha ⁻¹)	3-PG (m ³ .ha ⁻¹)	IMA (m ³ .ha ⁻¹ .ano ⁻¹)	3-PG (m ³ .ha ⁻¹ .ano ⁻¹)
1.111	I144	1,9	30,7	37,9	16,1	19,8
		2,2	40,0	51,4	18,5	23,7
		2,8	74,8	76,5	27,2	27,8
		3,4	103,5	109,5	30,9	32,9
		3,8	128,9	136,8	33,6	35,7
1.111	VE41	1,9	29,6	35,9	15,6	18,7
		2,2	37,8	48,6	17,5	22,4
		2,8	68,8	72,3	25,0	26,3
		3,4	83,4	103,7	24,9	31,1
		3,8	118,7	129,6	30,9	33,8

Tabela 15. Detalhamento dos dados de inventário florestal contínuo utilizados na análise da eficiência do modelo 3-PG e estimativas geradas após as simulações das variáveis diâmetro a altura do peito (d) e altura total (h) na DP de 833 árvores por hectare. Fonte:Autor.

Densidade Populacional (arv.ha ⁻¹)	Clone	Idade	d (cm)	3-PG (cm)	h (m)	3-PG (m)
833	I144	0,5	1,91	2,58	1,88	2,70
		0,6	2,39	3,89	2,71	4,02
		0,7	2,90	4,45	3,15	4,59
		0,8	3,39	5,01	3,68	5,15
		0,9	3,88	5,63	4,04	5,78
		1,0	5,00	6,21	4,60	6,36
		1,2	5,86	6,97	6,65	7,12
		1,5	7,05	7,81	8,05	7,96
		1,6	8,27	8,74	8,77	8,89
		1,9	10,12	9,59	9,21	9,73
		3,1	14,67	14,35	14,02	14,42
		3,6	16,09	14,79	14,91	14,85
		4,1	17,40	16,52	17,39	16,55

		4,7	18,33	17,63	17,84	17,64
		5,1	18,37	18,69	20,44	18,67
		0,5	1,46	1,99	1,93	1,94
		0,6	2,28	3,09	2,60	3,14
		0,7	2,79	3,58	3,22	3,70
		0,8	3,28	4,06	3,83	4,25
		0,9	3,73	4,60	4,24	4,87
		1,0	4,82	5,11	5,04	5,47
		1,2	5,60	6,00	6,64	6,52
833	VE41	1,5	6,69	6,77	7,62	7,45
		1,6	7,49	7,52	8,14	8,36
		1,9	9,24	8,20	8,73	9,20
		3,1	12,42	12,17	13,03	14,20
		3,6	13,51	12,59	16,05	14,73
		4,1	14,26	14,02	17,51	16,59
		4,7	15,59	14,98	18,27	17,83
		5,1	15,64	15,87	20,03	18,99

Tabela 16. Detalhamento dos dados de inventário florestal contínuo utilizados na análise da eficiência do modelo 3-PG e estimativas geradas após as simulações das variáveis volume (v) e incremento médio anual (IMA) na DP de 833 árvores por hectare. Fonte:Autor.

Densidade Populacional (arv.ha ⁻¹)	Clone	Idade	v (m ³ .ha ⁻¹)	3-PG (m ³ .ha ⁻¹)	IMA (m ³ .ha ⁻¹ .ano ⁻¹)	3-PG (m ³ .ha ⁻¹ .ano ⁻¹)
833	I144	1,9	24,1	38,8	12,7	20,2
		2,2	31,9	48,6	14,8	22,4
		2,8	48,1	67,1	17,5	24,4
		3,4	88,0	90,3	26,3	27,1
		3,8	113,7	109,8	29,6	28,7
833	VE41	1,9	20,7	25,7	10,9	13,4
		2,2	26,5	33,4	12,3	15,4
		2,8	44,1	49,3	16,0	17,9
		3,4	65,4	70,2	19,5	21,1
		3,8	90,3	88,6	23,5	23,1