



UNIVERSIDADE FEDERAL DE SÃO JOÃO *DEL-REI*
PRÓ-REITORIA DE ENSINO DE GRADUAÇÃO
BACHARELADO EM ENGENHARIA FLORESTAL
CAMPUS SETE LAGOAS

JOÃO LUIZ DE OLIVEIRA FILHO

**DESENVOLVIMENTO DE MODELOS HIPSOMÉTRICOS PARA
POVOAMENTOS COMERCIAIS DE *Eucalyptus spp.* EM MINAS
GERAIS**

Sete Lagoas, MG

2025

JOÃO LUIZ DE OLIVEIRA FILHO

**DESENVOLVIMENTO DE MODELOS HIPSOMÉTRICOS PARA
POVOAMENTOS COMERCIAIS DE *Eucalyptus spp.* EM MINAS
GERAIS**

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de Engenharia de Florestal da Universidade Federal de São João del-Rei, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Florestal.

Orientador: Prof. Renato Vinicius Oliveira Castro

Sete Lagoas, MG

2019

JOÃO LUIZ DE OLIVEIRA FILHO

**DESENVOLVIMENTO DE MODELOS HIPSOMÉTRICOS PARA
POVOAMENTOS COMERCIAIS DE *Eucalyptus spp.* EM MINAS
GERAIS**

Trabalho de Conclusão apresentado ao Curso de Engenharia de Florestal da Universidade Federal de São João del-Rei, como requisito parcial para obtenção do grau de Bacharel em Engenharia de Florestal.

Sete Lagoas, 14 de mês julho de 2025.

Banca avaliadora:

Dr. Renato Vinicius Oliveira Castro, Orientador — DEFLO/UFSJ

Dra. Mayra Luiza Marques da Silva— DEFLO/UFSJ

Me. Lucas Gabriel Souza Santos — DEF/UFVJM

DESENVOLVIMENTO DE MODELOS HIPSOMÉTRICOS PARA POVOAMENTOS COMERCIAIS DE *Eucalyptus spp.* EM MINAS GERAIS

Resumo

O objetivo deste estudo foi desenvolver duas novas equações hipsométricas para estimar a altura total das árvores de *Eucalyptus spp.*, utilizando variáveis dendrométricas e de povoamento como diâmetro a altura do peito (D), altura dominante (HD), diâmetro dominante (DD), diâmetro predominante (DP) e volume dominante (VD). Os dados para metodologia vieram do inventário florestal por amostragem, estruturado para garantir representatividade e precisão estatística. Os modelos propostos neste trabalho apresentaram melhor ajuste que modelos hipsométricos tradicionais. O quarto modelo atingiu o melhor ajuste, com R^2_{aj} de até 0,880 e Syx% de apenas 1,87%. Apesar de não existir diferenças estatisticamente significativas em relação ao observado pelo teste t pareado a ($p > 0,05$), observou melhoria substancial nas estimativas de altura para florestas com maior heterogeneidade.

Palavras-chave:

Equação hipsométrica; altura dominante; diâmetro dominante; diâmetro predominante e volume dominante.

1. INTRODUÇÃO

Os plantios comerciais de *Eucalyptus spp.* representam uma das bases da produção florestal brasileira, com impactos diretos na economia e na sustentabilidade ambiental. Devido à sua alta produtividade, adaptabilidade e rápido crescimento, o gênero é amplamente utilizado na produção de celulose, papel, madeira serrada e carvão vegetal, promovendo geração de empregos e renda em diversas regiões (SCHNEIDER, 2008). Além disso, quando manejado de forma sustentável, contribui para a restauração de áreas degradadas, redução da pressão sobre florestas nativas e sequestro de carbono, colaborando com metas ambientais globais (FERREIRA; ALMEIDA, 2022).

A altura total das árvores representa uma variável chave nos inventários florestais e de elevado custo de mensuração. Ela exerce influência direta na estimativa do volume de madeira, um dado essencial para o planejamento da colheita, a análise de crescimento dos povoamentos e a avaliação do potencial produtivo das florestas plantadas (SILVA, 2016).

A medição da altura total das árvores, realizada por meio de relações trigonométricas e com o uso de instrumentos como clinômetros ópticos ou hipsômetros eletrônicos, é uma etapa essencial para a obtenção de dados precisos. Apesar de sua importância, essa atividade enfrenta diversos desafios operacionais em campo, o que justifica a prática comum de mensurar diretamente a altura total de aproximadamente 20% das árvores em cada unidade amostral nos inventários florestais. A realização dessa atividade demanda profissionais capacitados e equipamentos específicos, cuja aquisição e manutenção podem representar um custo elevado para projetos de inventário florestal, especialmente em larga escala (SILVA et al., 2012). Além disso, a visibilidade da copa nem sempre é adequada devido à densidade do povoamento, à irregularidade do terreno ou à presença de sub-bosque, o que pode comprometer a precisão das leituras e aumentar o tempo necessário para as medições (COUTO; BASTOS, 1988).

Em florestas plantadas de interesse comercial, como povoamentos homogêneos de *Eucalyptus spp.*, o processo de estimativa de volume segue uma rotina prática que equilibra precisão estatística e viabilidade operacional. Segundo Canavesi et al. (2010), tudo começa com a amostragem representativa da área total, sendo definida por parcelas, distribuídas aleatoriamente ou sistematicamente no talhão. Dentro dessas parcelas, realiza-se a coleta do diâmetro a altura do peito (D) de todas as árvores, com esses dados aplica-se modelagem hipsométrica, utilizando equações que relacionam o (D) com a altura (HD) dessas árvores restantes da parcela (CARVALHO; MELO, 2011).

Um fator limitante para as medições das alturas é que, mesmo em áreas acessíveis, é necessário garantir uma distância adequada entre o observador e a árvore-alvo para que os

ângulos medidos sejam confiáveis, muitas vezes inviável em ambientes naturais ou de relevo acidentado (SILVA et al., 2012). Erros sistemáticos podem ocorrer principalmente em árvores muito altas, onde variações na habilidade do operador ou nas condições de iluminação influenciam diretamente o resultado. Por essas razões, tem-se recorrido à medição da altura de um subconjunto das árvores nas parcelas e à utilização de modelos hipsométricos que estimem a altura das demais com base em variáveis como o diâmetro à altura do peito (D), minimizando custos e otimizando o trabalho de campo (LEITE; ANDRADE, 2003).

Com o avanço da pesquisa florestal, surgiram modelos que incorporam variáveis adicionais, como a altura dominante (HD), com o objetivo de aumentar a precisão das estimativas. Um exemplo é o modelo log-linear múltiplo proposto por Campos e Leite (1984), que tem sido amplamente utilizado em estudos florestais por sua simplicidade na estimativa da altura total da árvore (H) com base em variáveis de fácil mensuração, como (D) e a (HD). Essa abordagem tem se mostrado eficaz em povoamentos homogêneos, especialmente de *Eucalyptus spp.*, sendo referenciada em trabalhos, como o de Leite e Andrade (2003), que destacam sua aplicabilidade em inventários florestais.

Além dos modelos tradicionais, abordagens mais recentes têm explorado o uso de algoritmos de aprendizado de máquina, como Random Forest, redes neurais artificiais e máquinas de vetor de suporte. Essas técnicas permitem incorporar múltiplas variáveis e capturar padrões complexos nos dados, resultando em ganhos significativos de precisão e redução da intensidade amostral. Segundo Montañó (2016), os modelos baseados em aprendizado de máquinas apresentam correlações superiores a 98 % na predição de volume biomassa, destacando-se pela capacidade de generalização e flexibilidade. Da mesma forma, Vendruscolo et al. (2009) demonstraram que esses algoritmos apresentaram menor viés na dispersão dos resíduos e melhor desempenho estatístico em análises estratificadas por idade e estrutura dos povoamentos. No entanto, apesar da superioridade estatística, esses métodos ainda enfrentam desafios quanto à interpretabilidade e aplicabilidade operacional no campo (SILVA et al., 2022; Paula, 2023).

Dessa forma, embora os modelos baseados em inteligência artificial estejam em ascensão, os modelos hipsométricos tradicionais especialmente aqueles que incorporam variáveis como (HD) continuam sendo amplamente utilizados pela sua simplicidade e facilidade de implementação em florestas comerciais de *Eucalyptus spp.* no Brasil. A escolha do modelo ideal deve considerar não apenas o desempenho estatístico, mas também a realidade operacional do inventário florestal e os objetivos do manejo (CAMPOS e LEITE, 2017).

Diante das variações observadas e no desempenho de diferentes formas funcionais de equações hipsométricas com a inclusão de novas variáveis independentes, este estudo tem como objetivo propor dois novos modelos hipsométricos, testar e compara-los com modelos tradicionais para estimar a altura total de árvores em povoamentos comerciais de *Eucalyptus spp.*

2. MATERIAL E MÉTODOS

Os dados utilizados neste estudo referem-se a talhões de clones e híbridos de *Eucalyptus spp.* não desbastados, pertencentes a uma empresa florestal localizada na região noroeste do estado de Minas Gerais (17°36' S e 46°42' W), conduzidos para produção de carvão vegetal sob regime de alto fuste. O clima da região é de savana tropical úmida, com inverno seco e verão chuvoso, do tipo Aw, segundo a classificação de Köppen. A temperatura média anual é de 22,6 °C, com média mensal de 18 °C na estação mais fria e 29,1 °C na mais quente. A precipitação média anual é de 1.450 mm, com médias mensais abaixo de 60 mm nos meses mais secos. A vegetação remanescente é composta por Cerrado, representado por suas diversas fitofisionomias, desde campos até formações florestais e matas ciliares (MACEDO et al., 2005).

A Tabela 1 apresenta as principais características dos talhões avaliados, abrangendo informações sobre área plantada, número de parcelas amostradas, área por parcela, datas de plantio e realização do inventário florestal. Os talhões estão distribuídos em diferentes blocos operacionais, totalizam aproximadamente 230 hectares de plantios clonais de *Eucalyptus spp.*, instalados entre janeiro de 2012 e outubro de 2013.

Tabela 1 - Área de estudo e características dos talhões avaliados

Talhão	Área do Talhão (ha)	Parcelas (Un)	Área (m²)	Data de Plantio	Data do Inventário
57	17,44	12	201,06	out-13	jun-22
58	17,58	12	201,06	out-13	jun-22
3	40,51	28	201,06	mar-12	abr-22
12	2,30	2	201,06	fev-12	abr-22
13	43,39	29	201,06	fev-12	abr-22
14	20,57	14	201,06	fev-12	abr-22
15	21,24	15	201,06	fev-12	abr-22
16	23,50	16	201,06	fev-12	abr-22
17	20,23	14	201,06	jan-12	abr-22

18 23,47 16 201,06 jan-12 abr-22

Fonte: Elaborado pelo autor.

Foram ajustados quatro modelos hipsométricos distintos (Equações 1 a 4) apresentados na Tabela 2. O primeiro modelo corresponde ao proposto por Curtis (1967) (Equação 1); o segundo, uma versão de Campos e Leite (1984) (Equação 2); já os modelos 3 e 4 foram desenvolvidos neste trabalho, incorporando variáveis dendrométricas e de povoamento.

Tabela 2 - Equações hipsométricas para estimativa de altura total de clones de *Eucalyptus spp.* na região de Minas Gerais.

Autor	Modelo	Nº
Curtis (1967)	$\ln(H) = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{1}{D}\right) + \varepsilon_i$	(1)
Campos e Leite, (1984)	$\ln(H) = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{1}{D}\right) + \beta_2 \ln(HD) + \varepsilon_i$	(2)
Este trabalho (1)	$\ln(H) = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{DP}{D}\right) + \beta_2 \ln(HD) + \beta_3 \ln(VD) + \beta_4 (DP) + \varepsilon_i$	(3)
Este trabalho (2)	$\log(H) = \beta_0 + \beta_1 \left(\frac{DP}{D}\right) + \beta_2 \log(HD) + \beta_3 \log(VD) + \beta_4 (DP) + \varepsilon_i$	(4)

Em que: H = altura total (m); D = diâmetro (cm); DD = diâmetro dominante (cm), DP = diâmetro predominante (cm), HD = altura dominante (m); VD = volume dominante (m³); β_i = coeficientes de regressão a serem estimados; ε = erro.

As variáveis utilizadas nos modelos foram selecionadas com base na facilidade de obtenção em levantamentos de campo. O diâmetro (D), medido a 1,30 metros do solo, representa uma medida amplamente adotada em inventários florestais por estar fortemente correlacionada ao volume das árvores. A altura dominante (HD), definida como a média das maiores árvores (100 maiores por hectare), é considerado uma estimativa representativa da qualidade do sítio e das condições locais de crescimento.

Com as informações dos indivíduos dominantes (HD), calculou-se o diâmetro dominante (DD), correspondente à média dos diâmetros (D) dessas mesmas árvores dominantes. Por sua vez, o diâmetro predominante (DP) é obtido pela média dos valores dos diâmetros dominantes (DD) das parcelas dentro de cada talhão, representando uma medida agregada da dominância silvicultural para o talhão. A razão entre essas duas variáveis, expressa como (DP/D), é um índice de competição da árvore avaliada. Valores superiores a 1 sugerem que a árvore se encontra em posição suprimida na estrutura do povoamento, enquanto valores inferiores a 1 indicam que o indivíduo está entre os mais vigorosos da parcela, destacando-se no estrato superior.

Já o volume dominante (VD) representa o volume estimado para as árvores dominantes da parcela, funcionando como um indicador direto do potencial produtivo da área e da eficiência no aproveitamento do espaço pelas árvores de maior porte. Com essa variável inserida na mensuração e proveniente das árvores cubadas, entrado diretamente na equação para melhorar as estimativas das alturas. No presente estudo, o volume das árvores foi estimado por meio de equação volumétrica ajustada a partir de dados obtidos pela cubagem direta, método que consiste na medição rigorosa de seções ao longo do fuste e determinação dos volumes pela fórmula de Smalian (HUSCH et al., 2003). A forma funcional adotada segue o modelo de dupla entrada proposto por Schumacher e Hall, conforme apresentado por Campos e Leite (2009), expresso na forma logarítmica como:

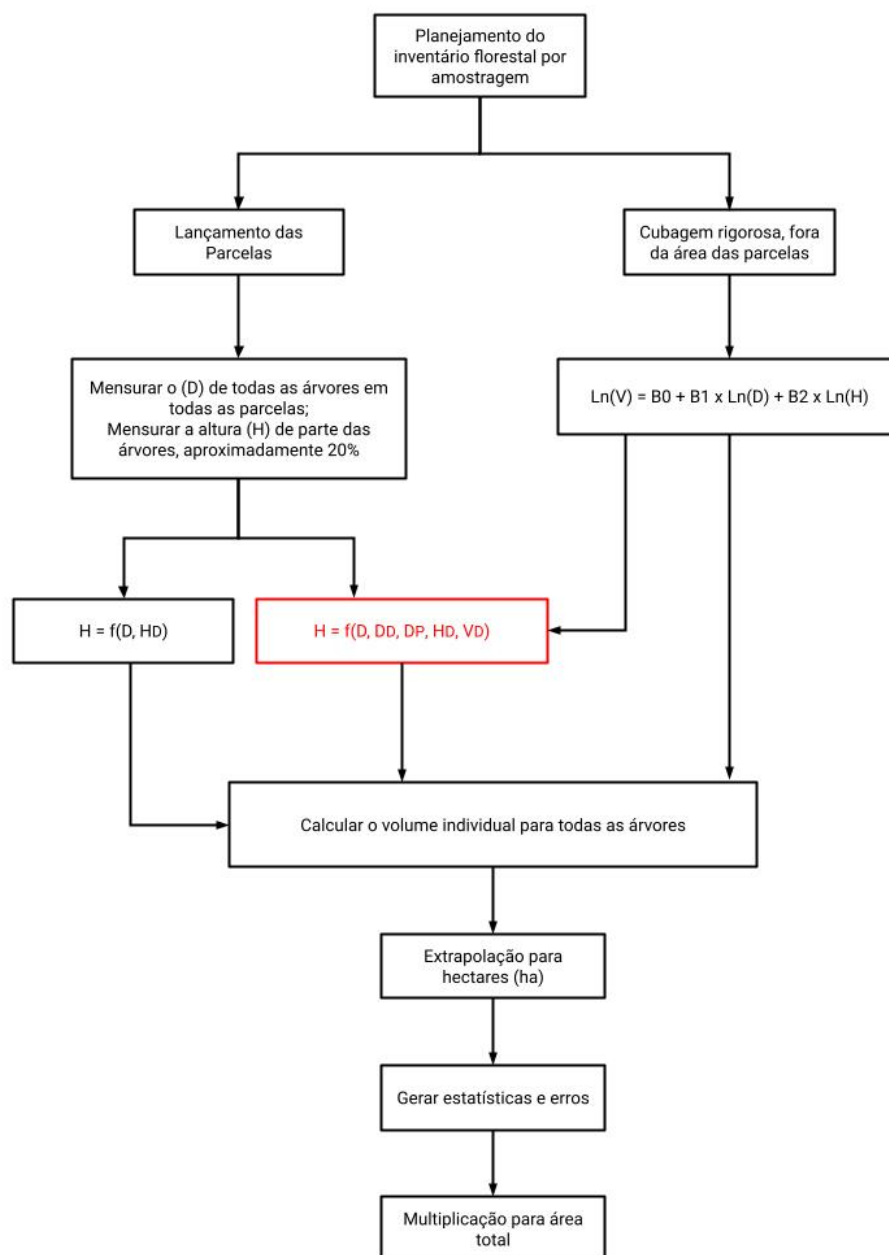
$$\ln(V) = \beta_0 + \beta_1 \ln(D) + \beta_2 \ln(H) + \varepsilon_i \quad (5)$$

Em que: V = volume (m³); D = diâmetro a 1,30 metros do solo (cm); H = altura total (m); β_i = coeficientes de regressão a serem estimados; ε = erro.

Esse modelo é amplamente utilizado na mensuração florestal por apresentar bom desempenho estatístico e por incorporar variáveis de fácil obtenção em campo, como o diâmetro a altura do peito (D) e a altura total (H), permitindo a estimativas precisas do volume individual das árvores.

A Figura 1 sintetiza o fluxo metodológico adotado para realização de inventários florestais por amostragem, destacando cada etapa desenvolvida no processo. Desde o planejamento inicial, com definição da área e objetivos, até a extrapolação dos dados para estimativas de produção na área total, cada fase é cuidadosamente estruturada para garantir precisão estatística e representatividade dos resultados. A mensuração do diâmetro (D) e da altura total das árvores (H), associada ao uso de equações volumétricas ajustadas, permite o cálculo das variáveis independente como a altura dominante (H_D), diâmetro dominante (D_D), diâmetro predominante (D_P) e volume dominante (V_D).

Figura 1 – Fluxograma do planeamento para o inventário florestal



A performance dos modelos ajustados foi avaliada por meio das seguintes estatísticas: coeficiente de determinação (R^2) (Equação 6), obtido pela razão entre a soma de quadrados dos resíduos (SQ_{res}) (Equação 7) e a soma de quadrados totais (SQ_{tot}) (Equação 8); coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}) (Equação 9); erro padrão da estimativa (Sy_x) (Equação 10); erro padrão da estimativa percentual ($Sy_x\%$) (Equação 11); e análise gráfica dos resíduos relativos ($Res\%$) (Equação 12). Todos os coeficientes dos modelos foram avaliados ao nível de 95% de

probabilidade, por meio do teste t ($p \leq 0,05$). Caso algum coeficiente não fosse significativo, o modelo era refeito sem a variável correspondente.

$$R^2 = 1 - \frac{SQ_{res}}{SQ_{tot}} \quad (6)$$

$$SQ_{res} = \sum_{i=1}^n (y_i - \hat{y}_i)^2 \quad (7)$$

$$SQ_{tot} = \sum_{i=1}^n (y_i - \bar{y})^2 \quad (8)$$

$$R^2_{aj} = 1 - (1 - R^2) \cdot \left(\frac{n-1}{n-p} \right) \quad (9)$$

$$S_{yx} = \sqrt{\frac{SQ_{res}}{n-p}} \quad (10)$$

$$S_{yx}(\%) = \left(\frac{S_{yx}}{\bar{y}} \right) \quad (11)$$

$$Res\% = \left(\frac{y_i - \hat{y}_i}{y_i} \right) \cdot 100 \quad (12)$$

Em que: y_i = Variável dependente observada na i -ésima árvore; $\hat{y}_i$ = Estimativa da variável dependente na i -ésima árvore; $\bar{y}$ = Valor médio dos valores observados na i -ésima árvore; p = Número de coeficientes do modelo; n = Número de observações; SQ_{res} = Soma de quadrados de resíduos; SQ_{tot} = Soma de quadrados total.

3. RESULTADOS E DISCUSSÕES

Os quatro modelos testados para estimar a altura total (H) de clones de *Eucalyptus spp.* foram ajustados com base em diferentes variáveis independentes, conforme apresentado na Tabela 3. Esses modelos variam em complexidade, desde equações com apenas uma variável explicativa até expressões que combinam múltiplas variáveis dendrométricas e de povoamento. As formas funcionais envolvem transformações logarítmicas da variável dependente, contribuindo para a estabilização da variância dos resíduos e melhoria do desempenho estatístico.

Tabela 3 – Parâmetros estatísticos dos modelos

Modelo	β_0	β_1	β_2	β_3	β_4	R^2_{aj}	Syx%
Curtis, (1967)	3,8260	-8,8997	-	-	-	0,767	6,02
Campos e Leite, (1984)	2,0728	-8,7007	0,5105	-	-	0,853	4,78
Este trabalho (1)	0,3455	-0,3875	0,8701	-0,1263	0,0190	0,880	4,31
Este trabalho (2)	0,1501	-0,1683	0,8701	-0,1263	0,0082	0,880	1,87

β_i = coeficientes dos modelos; R^2_{aj} = coeficiente de determinação ajustado; Syx% = erro padrão da estimativa relativo.

Os coeficientes de determinação ajustados (R^2_{aj}) para os modelos testados variaram de 0,767 a 0,880, enquanto o erro padrão de estimativa relativo (Syx%) oscilou entre 1,87% e 6,02%, conforme demonstrado na Tabela 3. Estes valores indicam potencial de aplicação de todas as equações para determinar a relação hipsométrica.

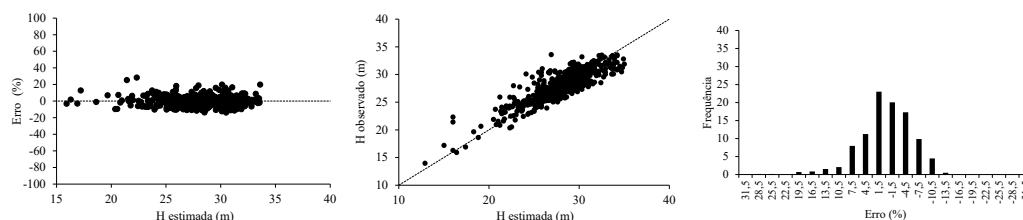
Em especial, os modelos propostos neste trabalho, Modelos 3 e 4 da Tabela 2, que incorporam múltiplas variáveis combinadas por meio de logaritmos e quocientes relativos, apresentaram os melhores desempenhos estatísticos. O Modelo 4, com estrutura logarítmica completa, destacou-se com o R^2_{aj} (0,880) e menor Syx% (1,87%), evidenciando alta precisão nas estimativas de altura.

A adequação dos modelos ajustados reforça a importância de considerar múltiplas variáveis na predição da altura em plantios de *Eucalyptus spp.* A inclusão de fatores como HD, DD, DP e VD permitiu capturar melhor a heterogeneidade estrutural entre os talhões. Além disso, a transformação logarítmica da variável resposta mostrou-se eficaz na modelagem, contribuindo para minimizar o efeito de outliers e heterocedasticidade.

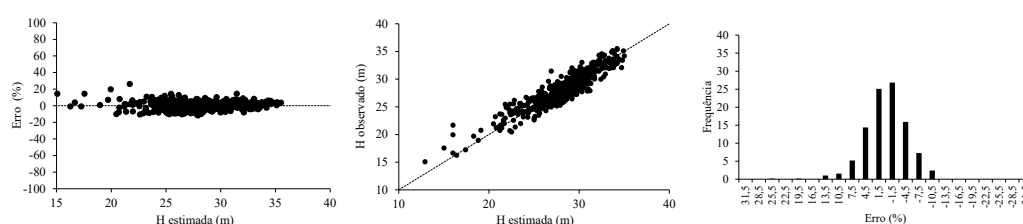
Todos os coeficientes dos modelos foram estatisticamente significativos pelo teste t ($p \leq 0,05$), o que reforça a confiabilidade das equações estimadas e sua aplicabilidade prática em estudos de inventário florestal.

Nos gráficos são apresentados a distribuição dos resíduos para os quatros modelos testados (Figura 2). A análise comparativa dos gráficos de resíduos dos quatro modelos hipsométricos ajustados para clones de *Eucalyptus spp.* na região de Minas Gerais revelou diferenças no desempenho preditivo das equações testadas. Os gráficos representam visualmente a distribuição dos erros percentuais; os valores estimados versus os valores observados da altura total das árvores; e sua distribuição em classes de erros, respectivamente, para os quatro modelos, sendo essenciais para avaliar a qualidade e a estabilidade dos ajustes realizados.

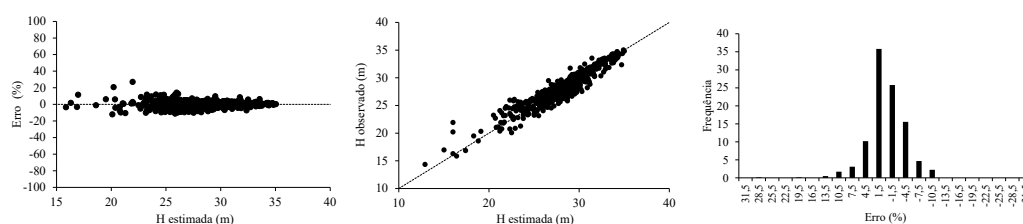
Curtis (1967) (1)



Campos e Leite, (1984) (2)



Este trabalho (1) (3)



Este trabalho (1) (4)

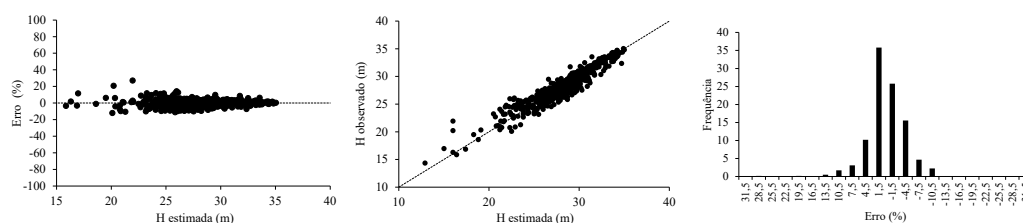


Figura 2 – Gráfico de resíduos das estimativas de altura total de árvores de plantios comerciais de *Eucalyptus* spp.

O modelo de Curtis (1967) (1), apesar de apresentar estrutura simples e tradicional, demonstrou menor desempenho estatístico e distribuição dos resíduos. Seu coeficiente de determinação ajustado foi o menor dentre os modelos analisados ($R^2_{aj} = 0,767$), com erro padrão de estimativa relativo elevado (6,02%). O gráfico correspondente exibiu dispersão acentuada dos resíduos, com presença significativa de valores variando de -13,83% a +28,31%. Esse padrão evidencia ainda imprecisão nas estimativas e indica a possível ocorrência de

heterocedasticidade, o que compromete a confiabilidade do modelo em diferentes faixas de valores estimados.

O modelo de Campos e Leite, (1984) (2), por sua vez, apresentou melhora estatística ($R^2_{aj} = 0,853$; $Syx\% = 4,78\%$), refletida em distribuição gráfica dos resíduos mais simétrica. Entretanto, ainda se observaram outliers e leve expansão da variância nos maiores valores de altura estimada, o que pode sinalizar heterocedasticidade. Apesar de mais robusto que o modelo de Curtis, seus resultados são inferiores aos obtidos pelos modelos mais complexos.

Os dois modelos propostos neste trabalho, modelos 3 e 4, foram os que apresentaram melhor desempenho, tanto nas métricas estatísticas quanto na avaliação visual dos resíduos. O Modelo 3 obteve $R^2_{aj} = 0,880$ e $Syx\%$ de 4,31%, com concentração dos erros entre $\pm 20\%$ e ausência de padrão de heterocedasticidade. Já o Modelo 4 destacou-se como o mais eficiente, com menor erro padrão de estimativa relativo (1,87%) e explicação estatística do Modelo 3 ($R^2_{aj} = 0,880$). Seu gráfico apresentou distribuição concentrada dos resíduos e mais próximo de 0%, baixa variabilidade e raros outliers, indicando alto grau de precisão e estabilidade.

Leite e Andrade (2003) avaliaram a relevância da altura dominante (HD) em equações hipsométricas e concluíram que esta variável é muito importante para melhorar a precisão de equações hipsométricas em inventários florestais, especialmente com diferentes capacidades produtivas.

Segundo Schmitt e Andrade (2019), o modelo regional por classe de altura dominante (CHD) para plantios apresentou melhor desempenho estatísticos, com menor erro e maior estabilidade residual para um plantio clonal de *Eucalyptus spp.* na região sul do Tocantins.

Podemos inferir que segundo Schmitt e Andrade (2019), e Leite e Andrade (2003) em comparação com este trabalho temos uma variável em comum a altura dominante (HD), dentre os trabalhos ela foi fundamental para os ajustes e precisão dos modelos, obtendo melhores resultados expressando a capacidade produtiva dos povoamentos. Neste trabalho a altura dominante (HD) é uma das variáveis independentes dos modelos propostos, complementando toda equação e seus ajustes, sendo importante para os resultados obtidos pelos modelos.

Apesar de não existirem diferenças estatisticamente significativas em relação ao observado pelo teste t pareado a ($p > 0,05$) neste estudo, observou-se melhoria substancial nas estimativas de altura para florestas com maior heterogeneidade. Essa melhoria é particularmente relevante em talhões com ampla variação de crescimento entre os indivíduos, onde modelos mais complexos demonstram maior capacidade de ajuste. Além disso, os modelos propostos permitem a aplicação de uma única equação para diferentes talhões, uma vez que incorpora variáveis que capturam a competição intra-talhão, como indicadores de dominância e densidade relativa.

A superioridade do Modelo 4 é atribuída à inclusão de múltiplas variáveis explicativas, como o quociente (DP/D), logaritmos de altura dominante (HD), logaritmos de volume dominante (VD), e diâmetro predominante (DP) por talhão. Essa estrutura permite capturar com maior fidelidade as variações na arquitetura das árvores, resultando em estimativas mais confiáveis e coerentes. Além disso, a ausência de heterocedasticidade e a estabilidade dos resíduos reforçam a recomendação de uso do Modelo 4 em contextos de inventário florestal e manejo de povoamentos clonais de *Eucalyptus spp.* Mesmo sabendo que modelos mais simples, com menos parâmetros (princípio da parcimônia), devem ser priorizados, o ganho nas estimativas de altura observadas nesse estudo, justificam a aplicação de modelos como esse.

Diante dos resultados encontrados neste estudo, o Modelo 4 se mostrou mais eficiente para estimar alturas em povoamentos clonais de *Eucalyptus spp.* A combinação dessas novas variáveis proposta fez com que o modelo estimasse de forma precisa a altura das árvores. Além da precisão estatística, os gráficos reforçam essa superioridade, com a distribuição concentrada e baixa variabilidade.

4. CONCLUSÕES

Os modelos hipsométricos ajustados neste estudo demonstraram bom desempenho estatístico na estimativa da altura total de árvores de *Eucalyptus spp.* Os altos valores de coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}) e os baixos erros padrão de estimativa relativos ($Syx\%$) evidenciam a eficácia dos modelos em representar a relação entre altura e variáveis dendrométricas como diâmetro (D), e variáveis de povoamento como altura dominante (HD), diâmetro dominante (DD), diâmetro predominante (DP) e volume dominante (VD).

Dentre os modelos avaliados, destacam-se o modelo 4, com maior número de variáveis explicativas, especialmente os propostos neste trabalho, que atingiu o melhor ajuste, com R^2_{aj} de até 0,880 e $Syx\%$ de apenas 1,87%. Apesar de não existir diferenças estatisticamente significativas em relação ao observado pelo teste t pareado a ($p > 0,05$), observou melhoria substancial nas estimativas de altura para florestas com maior heterogeneidade.

Além disso, a significância estatística dos coeficientes estimados confirma a robustez dos modelos e sua aplicação prática em inventários florestais, manejo de povoamentos clonais e estimativas de crescimento.

5. REFERÊNCIAS

BELCHIOR, C. A. F. *Cubagem de madeira: fundamentos e aplicações*. Brasília: Embrapa-CNPq, 1996.

- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. *Mensuração florestal: perguntas e respostas*. 2. ed. Viçosa, MG: Editora UFV, 2009.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. *Mensuração florestal: perguntas e respostas*. 4. ed. Viçosa, MG: UFV, 2009. 647 p.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. *Mensuração florestal: perguntas e respostas*. 5. ed. Viçosa: UFV, 2017.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. *Mensuração Florestal*. Viçosa: Universidade Federal de Viçosa, 1984.
- CANAVESI, V.; PONZONI, F. J.; VALERIANO, M. M. Estimativa de volume de madeira em plantios de *Eucalyptus spp.* utilizando dados hiperespectrais e dados topográficos. *Revista Árvore*, v. 34, n. 3, p. 567–575, 2010.
- CARVALHO, J. L. N.; MELO, A. A. Estimativa de altura total de árvores usando regressão. *Revista Floresta*, Curitiba, v. 41, n. 2, p. 267–276, 2011.
- CARVALHO, J. P.; MELO, A. C. de. Utilização de equações hipsométricas em povoamentos homogêneos de *Eucalyptus spp.* *Revista Floresta*, v. 41, n. 3, p. 557–564, 2011.
- CARVALHO, J. P.; MELO, A. C.; SOUZA, A. L. Modelagem do volume comercial de árvores em povoamentos de eucalipto. *Revista Árvore*, v. 39, n. 4, p. 753–761, 2015.
- COUTO, H. T. Z.; BASTOS, N. L. M. Erros de medição de altura em povoamentos de *Eucalyptus* em região plana. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, n. 39, p. 21–31, 1988.
- COUTO, H. T. Z.; BASTOS, N. L. M. Modelos de equações de volume e relações hipsométricas para plantações de *Eucalyptus* no Estado de São Paulo. *Scientia Forestalis*, n. 37, p. 33–44, 1987.
- CURTIS, R. O. Height-diameter relationships for Douglas-fir in western Oregon. *Forest Science*, v. 13, n. 1, p. 35–45, 1967.
- CURTIS, R. O. Estimativa da relação hipsométrica em clones de *Eucalyptus sp.* com o modelo de Curtis ajustado por métodos bayesianos empíricos. *Scientia Forestalis*, v. 48, n. 125, p. 89–102, 2021.
- EUFRADE JUNIOR, H. Equações hipsométricas para sistemas florestais de curta rotação. *Revista Brasileira de Ciências Florestais*, Santa Maria, v. 15, n. 2, p. 123–135, 2020.
- FELIPE, R. F. et al. Equações hipsométricas em povoamentos de *Eucalyptus*. *Scientia Forestalis*, Piracicaba, v. 47, n. 124, p. 519–528, 2019.
- FERREIRA, L. G.; ALMEIDA, C. A. Estimativa de altura e desempenho de modelos de relação hipsométrica em um gradiente topográfico. *Revista Brasileira de Engenharia Florestal*, Curitiba, v. 22, n. 3, p. 211–225, 2022.
- HUSCH, B.; BEERS, T. W.; KERSHAW JR., J. A. *Forest mensuration*. 4. ed. New York: John Wiley & Sons, 2003.

- LEITE, H. G.; ANDRADE, V. C. L. de. Importância das variáveis altura dominante e altura total em equações hipsométricas e volumétricas. *Revista Árvore*, Viçosa, MG, v. 27, n. 3, p. 301–310, 2003.
- LEITE, H. G.; OLIVEIRA, A. D. Formas alternativas de se avaliar a qualidade de equações hipsométricas. *Revista Árvore*, Viçosa-MG, v. 26, n. 5, p. 555–561, 2002.
- MACHADO, S. A.; FIGUEIREDO FILHO, A.; LEITE, H. G. *Mensuração florestal: fundamentos e métodos*. 2. ed. Curitiba: UFPPR, 2002.
- MONTAÑO, R. A. N. R. Aplicação de técnicas de aprendizado de máquina na mensuração florestal. 2016. Dissertação (Mestrado em Engenharia Florestal) – Universidade Federal do Paraná, Curitiba, 2016.
- PAULA, A. F. de. Estratificação de equações hipsométricas em povoamento de eucalipto. 2023. Monografia (Graduação em Engenharia Florestal) – Universidade Federal Rural do Rio de Janeiro, Seropédica, RJ.
- SCHMITT, T.; ANDRADE, V. C. L. de. Identidade de modelos hipsométricos para um plantio de eucalipto clonal. *Advances in Forestry Science*, Cuiabá, v. 6, n. 2, p. 583–587, 2019.
- SCHNEIDER, P. R. Equações hipsométricas para espécies florestais nativas. *Revista Árvore*, Viçosa, MG, v. 32, n. 4, p. 679–688, 2008.
- SILVA, A. C. et al. Avaliação da precisão do algoritmo Random Forest e regressões para estimar altura total de árvores clonais de seringueira. *Anais do Congresso Florestal Brasileiro*, 2022.
- SILVA, F. F. Inventário florestal e estimativa de volume: abordagem prática. *Cadernos de Silvicultura*, Belo Horizonte, v. 4, p. 45–60, 2016.
- SILVA, G. F. da et al. Avaliação de métodos de medição de altura em florestas naturais. *Revista Árvore*, Viçosa, MG, v. 36, n. 2, p. 341–348, 2012.
- SILVA, J. C. da. Métodos de medição da altura e do volume comercial de árvores no bioma amazônico. 2016. 69 f. Dissertação (Mestrado em Ciências Florestais) – Universidade Federal do Espírito Santo, Jerônimo Monteiro, ES.
- SOARES, C. P. B.; SILVA, A. C. Modelos hipsométricos para povoamentos de *Eucalyptus spp.* em Minas Gerais. *Revista Árvore*, v. 25, n. 1, p. 65–72, 2001.
- SOUZA, H. S. et al. Modelos hipsométricos para eucalipto em sistema de integração lavoura-pecuária-floresta. *Nativa*, Sinop, v. 4, n. 1, p. 11–14, 2016.
- VENDRUSCOLO, D. G.; PELLICAN, F.; VIEIRA, M. et al. Configuração de algoritmos de aprendizado de máquina na modelagem florestal: um estudo de caso na modelagem da relação hipsométrica. *Ciência Florestal*, Santa Maria, v. 29, n. 4, p. 1343–1357, out./dez. 2019.