

INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO CIÊNCIA E TECNOLOGIA
DE MINAS GERAIS - *CAMPUS* SÃO JOÃO EVANGELISTA
BACHARELADO EM ENGENHARIA FLORESTAL

Karine Nunes de Oliveira

**INFERÊNCIA BAYESIANA NA PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO
HIPSOMÉTRICO DE STOFFELS-SOEST PARA EUCALIPTO**

São João Evangelista

2026

KARINE NUNES DE OLIVEIRA

**INFERÊNCIA BAYESIANA NA PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO
HIPSOMÉTRICO DE STOFFELS-SOEST PARA EUCALIPTO**

Trabalho de Conclusão de Curso apresentado
ao curso bacharelado em Engenharia Florestal
do Instituto Federal de Minas Gerais - *Campus*
São João Evangelista para obtenção do grau de
bacharel em Engenharia Florestal.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Oliveira Lafetá

São João Evangelista

2026

O48i Oliveira, Karine Nunes de.
Inferência bayesiana na parametrização do modelo hipsométrico
de Stoffels-Soest para eucalipto/ Karine Nunes de Oliveira – 2026.
20f.: il.

Orientador: Dr. Bruno Oliveira Lafetá.
Trabalho de Conclusão de Curso (bacharelado em Engenharia
Florestal) – Instituto Federal Minas Gerais. *Campus* São João
Evangelista, 2026.

1. Abordagem probabilística. 2. Estimativa de altura. 3. Inferência
estatística. 4. Modelagem. I. Oliveira, Karine Nunes de. II. Instituto
Federal de Minas Gerais *Campus* SJE. III. Título.

CDD 634.9285

Catálogo: Esther Soares Cunha - CRB-6/4333

Karine Nunes de Oliveira

**INFERÊNCIA BAYESIANA NA PARAMETRIZAÇÃO DO MODELO
HIPSOMÉTRICO DE STOFFELS-SOEST PARA EUCALIPTO**

Trabalho de conclusão de curso, apresentado
ao Curso Bacharelado em Engenharia
Florestal do Instituto Federal de Educação
Ciência e Tecnologia de Minas Gerais –
Campus São João Evangelista para obtenção
do grau de Bacharel em Engenharia Florestal.

Aprovado em: 15/07/2026

BANCA EXAMINADORA

Documento assinado digitalmente
 **BRUNO OLIVEIRA LAFETA**
Data: 15/07/2026 08:13:09-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Bruno Oliveira Lafetá (Orientador)

Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* São João

Evangelista

Documento assinado digitalmente
 **EDGARD GERALDO BERTOLI TRINDADE**
Data: 15/07/2026 08:08:09-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Dr. Edgard Geraldo Bertoli Trindade

Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* São João

Evangelista

Documento assinado digitalmente
 **MARIA RITA RAMOS MAGALHÃES**
Data: 15/07/2026 08:01:55-0300
Verifique em <https://validar.iti.gov.br>

Ma. Maria Rita Ramos Magalhães

Instituto Federal de Educação Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – *Campus* São João

Evangelista

RESUMO

A modelagem hipsométrica é amplamente utilizada em inventários florestais, porém a parametrização dos modelos ainda depende majoritariamente de métodos frequentistas, com limitada exploração de abordagens probabilísticas alternativas. Neste contexto, avaliou-se a inferência Bayesiana na parametrização do modelo de Stoffels e Soest para estimar a altura total de um povoamento clonal de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake na região central de Minas Gerais. O inventário foi realizado aos 60 meses de idade, com 100 árvores amostradas em 10 parcelas. O modelo foi ajustado por mínimos quadrados ordinários (MQO) e abordagem Bayesiana com diferentes números de iterações (500 a 4.000), utilizando o diâmetro à altura do peito como variável preditora. Os resultados indicaram desempenho preditivo equivalente entre as abordagens, sem ganhos com o aumento do número de iterações após a convergência. A inferência Bayesiana, contudo, permitiu representar explicitamente a incerteza dos parâmetros por meio de distribuições posteriores, ampliando a interpretação probabilística das estimativas. Assim, mostrou-se uma alternativa complementar ao MQO para a parametrização de modelos hipsométricos, agregando a quantificação explícita da incerteza sem comprometer o desempenho preditivo.

Palavras chave: Abordagem probabilística. Estimativa de altura. Inferência estatística. Modelagem.

ABSTRACT

Height–diameter modelling is widely used in forest inventories; however, model parameterization still relies predominantly on frequentist methods, with limited exploration of alternative probabilistic approaches. In this context, Bayesian inference was evaluated for parameterizing the Stoffels and Soest model to estimate total height in a clonal *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake stand in central Minas Gerais, Brazil. The inventory was conducted at 60 months of age, with 100 trees sampled across 10 plots. The model was fitted using ordinary least squares (OLS) and a Bayesian approach with different numbers of iterations (500 to 4,000), using diameter at breast height as the predictor variable. The results indicated equivalent predictive performance between the approaches, with no improvement from increasing the number of iterations after convergence. However, Bayesian inference explicitly represented parameter uncertainty through posterior distributions, enhancing the probabilistic interpretation of the estimates. Thus, it proved to be a complementary alternative to OLS for the parameterization of height–diameter models, providing explicit uncertainty quantification without compromising predictive performance.

Keywords: Probabilistic approach. Height estimation. Statistical inference. Modelling.

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	6
2. METODOLOGIA.....	9
2.1 Área de estudo e amostragem.....	9
2.2 Modelagem hipsométrica e análise estatística.....	9
3. RESULTADOS.....	11
4. DISCUSSÃO	14
5. CONCLUSÕES.....	17
REFERÊNCIAS	18

1. INTRODUÇÃO

A estimativa acurada da altura das árvores constitui um dos componentes fundamentais dos inventários florestais, convencionalmente utilizada para a quantificação do volume, da biomassa, do estoque de carbono e da avaliação do crescimento e da produtividade de povoamentos. Embora o diâmetro do fuste à 1,30m de altura do solo (DAP, diâmetro à altura do peito) possa ser obtido de forma rápida e direta em levantamentos de campo, a mensuração da altura total demanda maior tempo operacional, equipamentos específicos e maior experiência da equipe técnica.

A modelagem hipsométrica consolidou-se como uma das principais estratégias para reduzir custos operacionais e aumentar a eficiência dos inventários florestais (Batista *et al.*, 2024; Binoti *et al.*, 2017; Campos; Leite, 2017). Isso ocorre porque o DAP é mensurado para todos os fustes das parcelas, enquanto a altura total é geralmente obtida apenas em uma subamostra de indivíduos dentro dessas unidades amostrais, sendo posteriormente estimada para os demais a partir de informações diamétricas. Essa abordagem é particularmente útil em condições em que características estruturais do povoamento, como densidade, arquitetura das copas, inclinação dos fustes e variabilidade ambiental, dificultam a mensuração direta da altura e aumentam a incerteza das observações.

Ao longo das últimas décadas, diversos modelos hipsométricos foram desenvolvidos, incluindo formulações não lineares, modelos de efeitos mistos e abordagens baseadas em aprendizado de máquina (Crecente-Campo *et al.*, 2010; Campos; Leite, 2017; Vieira *et al.*, 2018; Raptis *et al.*, 2021; Lafetá *et al.*, 2024). Entretanto, a incorporação de novas estruturas matemáticas não reduziu a importância dos modelos clássicos, que permanecem amplamente utilizados em inventários devido à simplicidade de implementação, facilidade de interpretação dos parâmetros, baixo custo computacional e desempenho satisfatório em diferentes condições de povoamento. Entre esses modelos, o proposto por Stoffels e Soest (1953) continua sendo uma alternativa de interesse por apresentar uma formulação parcimoniosa, comportamento biológico consistente e ampla aplicabilidade na estimativa da altura a partir exclusivamente do diâmetro.

Tradicionalmente, a parametrização de modelos hipsométricos é realizada pelo método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO), cuja aplicação pressupõe independência das observações, homogeneidade de variâncias, normalidade dos resíduos e correta especificação da estrutura do modelo (Gujarati; Porter, 2011). Todavia, dados provenientes de inventários florestais frequentemente apresentam características que dificultam o atendimento

integral desses pressupostos, especialmente em razão da heterogeneidade estrutural dos povoamentos e da dependência espacial entre árvores amostradas dentro das parcelas (Özçelik *et al.*, 2018; Raptis *et al.*, 2021; Zhou *et al.*, 2023).

Essas limitações evidenciam que o desempenho de um modelo não depende exclusivamente de sua formulação matemática, mas também da estratégia empregada para estimar seus parâmetros. Assim, além do desenvolvimento de novas equações, o aperfeiçoamento dos métodos de parametrização de modelos amplamente difundidos constitui uma oportunidade para aumentar sua robustez estatística, melhorar a quantificação das incertezas e ampliar sua confiabilidade em aplicações práticas, preservando as vantagens operacionais desses modelos.

Nesse contexto, a inferência Bayesiana tem recebido crescente atenção em diferentes áreas das ciências agrárias e florestais por oferecer uma estrutura probabilística capaz de incorporar explicitamente as incertezas associadas à estimação dos parâmetros. Diferentemente da abordagem frequentista, a inferência Bayesiana combina as informações provenientes dos dados observados com distribuições de probabilidade definidas a priori, produzindo distribuições posteriores para os parâmetros do modelo. Essa característica proporciona maior flexibilidade analítica, especialmente em situações envolvendo tamanhos amostrais reduzidos, elevada variabilidade dos dados ou potenciais violações dos pressupostos da regressão clássica (Lindley; Smith, 1972). Além disso, a abordagem Bayesiana permite expressar diretamente a incerteza das estimativas, aspecto particularmente relevante para subsidiar decisões relacionadas ao manejo e ao planejamento florestal.

Apesar da crescente utilização da inferência Bayesiana em problemas de modelagem florestal, incluindo estudos de crescimento, produção e viabilidade econômica (Salles *et al.*, 2019), sua aplicação à parametrização de modelos hipsométricos clássicos permanece limitada. Especificamente para o modelo de Stoffels e Soest, a literatura disponível ainda oferece poucas evidências sobre o potencial da inferência Bayesiana para estimar seus parâmetros, bem como sobre a influência de aspectos computacionais, como o número de iterações, na estabilidade das estimativas e no desempenho preditivo do modelo.

Mediante exposto, as seguintes hipóteses foram testadas: (i) a inferência Bayesiana é capaz de produzir estimativas consistentes dos parâmetros do modelo de Stoffels e Soest para a modelagem hipsométrica de povoamentos comerciais de eucalipto; (ii) o desempenho preditivo obtido pela inferência Bayesiana é semelhante ou superior ao alcançado pelo método dos Mínimos Quadrados Ordinários; e (iii) o aumento do número de iterações não promove ganhos substanciais na qualidade preditiva após a convergência das estimativas. O objetivo

deste estudo foi avaliar o desempenho da inferência Bayesiana na parametrização do modelo hipsométrico de Stoffels e Soest para estimar a altura total de um povoamento comercial de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake com 60 meses de idade.

2. METODOLOGIA

2.1 Área de estudo e amostragem

A pesquisa foi conduzida em uma unidade de manejo florestal de 77,21ha localizada na porção central do estado de Minas Gerais, sob as coordenadas planas (Datum SIRGAS 2000, UTM, zona 23 S) 567041 de longitude e 7957427 de latitude. O clima na região é do tipo Cwa pelo sistema de classificação internacional de Köppen, com médias anuais de precipitação e temperatura de 1043 mm e 23,4°C, respectivamente. O solo da região é do tipo Latossolo Vermelho-Amarelo com presença do horizonte B textural.

O plantio clonal de *E. urophylla* foi estabelecido no arranjo espacial 3,0 × 2,5 m (7,5 m²). O inventário foi conduzido aos 60 meses de idade, sendo distribuídas aleatoriamente 10 parcelas de 20 × 20 m (400 m²). Mensurou-se o diâmetro com casca à altura do peito (DAP, à altura de 1,30 m do solo, cm) e a altura total (H, m) dos dez primeiros fustes por parcela.

2.2 Modelagem hipsométrica e análise estatística

O modelo linear hipsométrico de Stoffels e Soest foi adotado como referência para a estimativa da altura total em função exclusivamente do diâmetro. O modelo foi ajustado para todo o banco de dados pelo método MQO e por abordagem Bayesiana, com função de densidade probabilística Gaussiana. A abordagem Bayesiana foi avaliada com adoção de 500, 1.000, 2.000 e 4.000 iterações.

Modelo de Stoffels e Soest:

$$\ln(H) = \beta_0 + \beta_1 \ln(DAP) + \ln(\varepsilon)$$

Em que: β_0 e β_1 = parâmetros dos modelos de regressão e ε = erro aleatório.

Na abordagem Bayesiana, os parâmetros β_0 e β_1 foram estimados por simulação Monte Carlo via Cadeias de Markov (MCMC), na qual foram geradas amostras sucessivas da distribuição posterior dos parâmetros a partir da combinação entre as informações dos dados observados e as distribuições a priori adotadas. As amostras obtidas foram utilizadas para caracterizar a incerteza paramétrica por meio de intervalos de credibilidade posterior de 95%, definidos pelos percentis 2,5% e 97,5% das distribuições posteriores.

Para o ajuste pelo método MQO, a incerteza dos parâmetros foi representada por intervalos de confiança de 95%, calculados a partir da distribuição amostral dos estimadores. Dessa forma, os intervalos apresentados para a abordagem frequentista representam a incerteza associada ao procedimento de estimação, enquanto na abordagem Bayesiana a incerteza dos parâmetros foi obtida a partir da distribuição posterior de probabilidade (distribuição atualizada dos possíveis valores dos parâmetros após a incorporação dos dados observados).

O desempenho da modelagem foi avaliada de acordo com os valores da Raiz Quadrada do Erro Médio (RQEM), Média dos Desvios Absolutos (MDA) e coeficiente de correlação de Pearson ($r_{Y\hat{Y}}$). Menores valores de RQEM e MDA implicaram em melhor qualidade preditiva. Realizaram-se análises de inspeção gráfica dos valores estimados e observados de altura em função do diâmetro, com intervalos de confiança de 95% de probabilidade definidos somente para a metodologia MQO.

As análises estatísticas foram efetuadas com auxílio do software R versão 4.6.0 (R Core Team, 2026), ao nível de significância de 5%.

3. RESULTADOS

O inventário florestal amostrou 100 fustes com amplitudes de 5,03 a 16,55 cm de DAP e de 10,7 a 26,4 m de altura. Os parâmetros estimados do modelo de Stoffels e Soest e os indicadores de qualidade de ajuste obtidos pelas diferentes estratégias de parametrização são apresentados na Tabela 1.

Tabela 1 - Coeficientes e qualidade de ajuste do modelo de Stoffels e Soest pelo método dos mínimos quadrados ordinários (MQO) e abordagens Bayesianas (B) para a estimativa da altura de fustes de eucalipto com 60 meses de idade.

Modelo	β_0	LI95	LS95	β_1	LI95	LS95	MDA	RQEM	$r_{Y\hat{Y}}$
MQO	1,4986	1,2400	1,4114	0,6232	0,4405	0,4976	1,1122	1,3313	0,8405*
B - 500 iterações	1,5025	1,2365	1,4198	0,6212	0,4386	0,4992	1,1129	1,3313	0,8406*
B - 1.000 iterações	1,4990	1,2444	1,4080	0,6226	0,4421	0,4963	1,1135	1,3317	0,8405*
B - 2.000 iterações	1,5001	1,2400	1,4108	0,6222	0,4403	0,4981	1,1134	1,3316	0,8405*
B - 4.000 iterações	1,4991	1,2412	1,4121	0,6229	0,4404	0,4975	1,1126	1,3314	0,8405*

β_0 e β_1 = parâmetros dos modelos lineares de regressão; LI95 e LS95 = limites inferior e superior do intervalo de 95% de confiança para MQO e intervalo de credibilidade posterior de 95% para as abordagens Bayesianas; RQEM = raiz quadrada do erro médio; MDA = média dos desvios absolutos; e $r_{Y\hat{Y}}$ = coeficiente de correlação de Pearson; * significativo a 5% de probabilidade pelo teste t.

Fonte: Elaborado pela autora, 2026

Os valores dos parâmetros β_0 e β_1 foram semelhantes entre o método MQO e as abordagens Bayesianas, indicando estabilidade da parametrização independentemente do número de iterações adotado. Entre as diferentes configurações Bayesianas, β_0 variou de 1,4990 a 1,5025, enquanto β_1 apresentou amplitude reduzida, entre 0,6212 e 0,6229. Essa pequena variação entre as estimativas posteriores evidencia baixa sensibilidade dos parâmetros ao aumento do número de iterações após a estabilização das simulações MCMC.

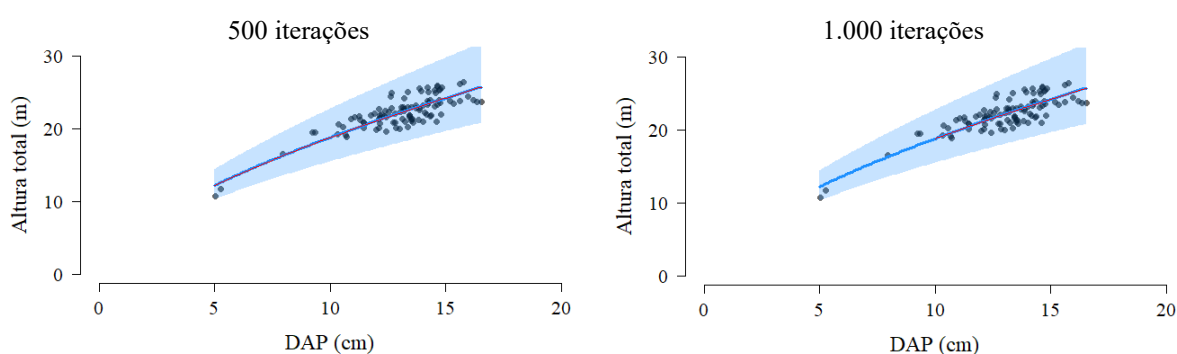
Os intervalos de confiança de 95% obtidos pelo MQO e os intervalos de credibilidade posterior de 95% estimados pelas abordagens Bayesianas apresentaram amplitudes próximas, indicando comportamento semelhante da incerteza associada aos coeficientes do modelo. As equações ajustadas apresentaram baixos desvios, com valores de MDA próximos a 1,11 m e RQEM próximos a 1,33 m em todas as estratégias avaliadas. Além disso, os coeficientes de correlação entre valores observados e estimados foram elevados e significativos ($r_{Y\hat{Y}} > 0,84$; $p \leq 0,05$), demonstrando forte associação entre as alturas mensuradas e estimadas.

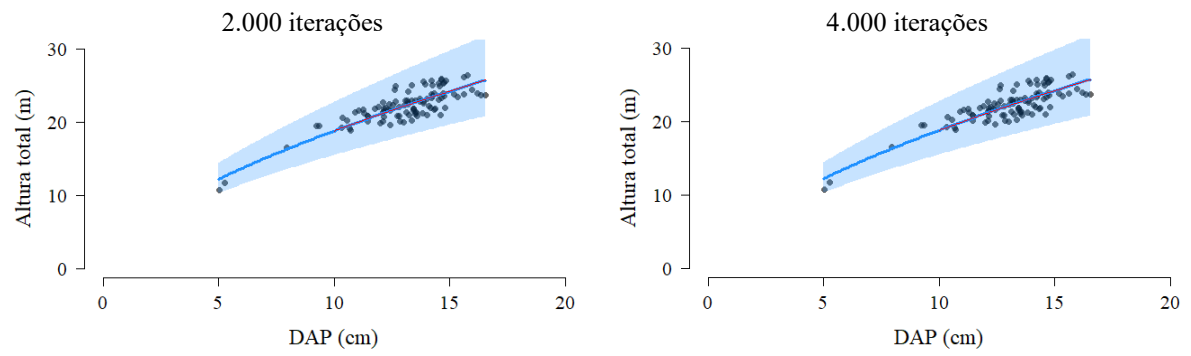
A abordagem Bayesiana apresentou desempenho preditivo equivalente ao MQO, com diferenças inferiores a 0,1% nas métricas de erro avaliadas (Tabela 1). O aumento do

número de iterações de 500 para 4.000 não promoveu melhoria consistente da capacidade preditiva, indicando que a estabilização das estimativas foi alcançada nas primeiras configurações avaliadas. Por outro lado, embora as estimativas pontuais tenham sido semelhantes entre os métodos, a abordagem Bayesiana permitiu representar a incerteza dos parâmetros por meio das distribuições posteriores obtidas pelas simulações MCMC, possibilitando a obtenção de intervalos de credibilidade posterior de 95% condicionados aos dados observados. Essa característica diferencia essa abordagem do MQO, em que a incerteza dos parâmetros é expressa por intervalos de confiança derivados da distribuição amostral dos estimadores.

A inspeção gráfica das curvas ajustadas evidenciou elevada proximidade entre as estimativas hipsométricas obtidas pelo MQO e pelas abordagens Bayesianas, independentemente do número de iterações empregado (Figura 1). As curvas permaneceram praticamente sobrepostas ao longo da amplitude diamétrica avaliada, indicando comportamento preditivo equivalente entre as estratégias de estimação.

Figura 1 - Representações gráficas do modelo de Stoffels e Soest ajustado pelo método dos mínimos quadrados ordinários (MQO, linha azul) e abordagens Bayesianas com diferentes quantidades de iterações (linha vermelha) para a estimativa da altura de fustes de eucalipto com 60 meses de idade. Margem de confiança a 95% de probabilidade em azul, gerada para o MQO.





Fonte: Elaborado pela autora, 2026

4. DISCUSSÃO

As relações funcionais estabelecidas com base no modelo de Stoffels e Soest confirmaram a consistência biológica esperada entre diâmetro e altura em povoamentos clonais de eucalipto. O parâmetro angular positivo reforça a relação alométrica clássica entre crescimento diamétrico e incremento em altura, amplamente descrita em espécies florestais sob condições de manejo (Enquist *et al.*, 1998; Lafetá *et al.*, 2024). Esse padrão reflete a coordenação fisiológica do crescimento, na qual o aumento do diâmetro acompanha o aumento da capacidade de suporte hidráulico e estrutural da árvore, permitindo maiores alturas em ambientes competitivos.

A maior dispersão observada nos intervalos de confiança do modelo ajustado por MQO nas classes diamétricas superiores pode ser parcialmente explicada pela menor frequência de árvores dominantes na amostra ($DAP \geq 14$ cm). Essa assimetria estrutural é recorrente em inventários florestais e contribui para maior incerteza nas extremidades da distribuição diamétrica. Além disso, árvores dominantes tendem a apresentar maior variabilidade morfológica devido à competição assimétrica por luz e recursos, bem como efeitos microambientais mais expressivos (Forrester *et al.*, 2013; Resende *et al.*, 2018), o que amplia a variabilidade residual nas relações hipsométricas (Vanclay, 1994; Lafetá *et al.*, 2023). Esse comportamento reflete a plasticidade fenotípica típica de sistemas florestais sob competição intraespecífica.

Do ponto de vista metodológico, a abordagem Bayesiana apresentou desempenho semelhante ao método MQO na previsão da altura das árvores. Isso indica que, em povoamentos clonais relativamente homogêneos de *E urophylla* com 60 meses de idade, o tipo de método estatístico utilizado tem pouca influência sobre o valor médio das estimativas de altura. Em outras palavras, quando as árvores apresentam características relativamente uniformes dentro do povoamento, diferentes métodos de estimação tendem a produzir resultados similares. No entanto, a principal contribuição da abordagem Bayesiana observada neste estudo esteve relacionada à representação probabilística da incerteza associada aos parâmetros do modelo, permitindo interpretar os coeficientes estimados considerando suas distribuições posteriores condicionadas aos dados observados.

Em outras palavras, ambos os métodos produzem resultados muito próximos quando os dados são consistentes e apresentam baixa variação estrutural. Não obstante, a principal vantagem da abordagem Bayesiana é permitir medir de forma explícita a incerteza das estimativas, o que torna as previsões mais informativas em situações de decisão que envolvem

risco, como a estimativa de volume, biomassa e carbono. A ausência de melhoria preditiva com o aumento do número de iterações indica que a convergência das estimativas foi atingida já nas cadeias mais curtas (500 iterações). Após a convergência, o aumento do número de iterações não alterou substancialmente a distribuição posterior, apenas melhorou sua aproximação numérica. Esse resultado tem implicações práticas relevantes, pois sugere que configurações computacionalmente mais econômicas podem ser suficientes para aplicações operacionais em inventários florestais, especialmente em larga escala.

Do ponto de vista biológico, os resultados reforçam a estabilidade estrutural das relações hipsométricas em povoamentos clonais homogêneos, mesmo sob diferentes abordagens estatísticas. Isso corrobora a robustez de modelos alométricos clássicos em sistemas florestais manejados, nos quais a variabilidade ambiental e genética é parcialmente controlada (Campos; Leite, 2017). Contudo, a maior variabilidade observada em árvores de maior diâmetro evidencia que processos competitivos continuam exercendo influência relevante sobre a dinâmica de crescimento, especialmente em estágios mais avançados do desenvolvimento do povoamento.

Sob a perspectiva operacional, os resultados sustentam a aplicabilidade contínua de modelos simples como o de Stoffels e Soest em inventários florestais rotineiros, devido à sua interpretabilidade e baixo custo computacional. Em sistemas produtivos, a simplicidade do modelo pode ser uma vantagem decisiva frente a abordagens mais complexas, desde que o objetivo principal seja a predição média da altura. Por outro lado, a abordagem Bayesiana agrega valor ao permitir inferência probabilística completa, o que pode ser particularmente relevante em inventários orientados à certificação florestal, avaliação de risco e contabilização de estoques de carbono.

Apesar dos resultados obtidos, algumas limitações devem ser consideradas. Primeiramente, o estudo foi conduzido em um único povoamento clonal de eucalipto, em uma única idade (60 meses), o que restringe a generalização dos resultados para outras condições edafoclimáticas, materiais genéticos e estágios de desenvolvimento. Relações hipsométricas são sensíveis à idade e ao sítio, podendo apresentar mudanças estruturais ao longo do ciclo de crescimento (Campos; Leite, 2017; Burkhardt; Tomé, 2012).

Em segundo lugar, o tamanho amostral (100 árvores) e a estrutura amostral baseada em parcelas podem introduzir dependência espacial entre observações, o que não foi explicitamente modelado. Essa dependência pode levar à subestimação da variabilidade real dos parâmetros e ao excesso de confiança nas estimativas, especialmente sob abordagens que assumem independência condicional.

Por fim, a avaliação do desempenho foi baseada principalmente em métricas tradicionais de erro e correlação. Embora amplamente utilizadas em estudos de biometria florestal, essas métricas não exploram integralmente as possibilidades oferecidas pela inferência Bayesiana, especialmente aquelas relacionadas à análise da distribuição posterior preditiva, intervalos preditivos e avaliação probabilística dos erros de estimativa.

Em síntese, os resultados indicam que a inferência Bayesiana não proporcionou ganhos de precisão pontual em relação ao MQO nas condições avaliadas, mas representou uma alternativa metodológica relevante por permitir uma representação probabilística da incerteza associada aos parâmetros do modelo hipsométrico. Assim, sua principal contribuição não está na substituição dos métodos tradicionais de estimação, mas na ampliação da capacidade interpretativa das estimativas, especialmente em aplicações florestais nas quais a incorporação da incerteza pode auxiliar processos de avaliação, planejamento e tomada de decisão.

5. CONCLUSÕES

A inferência Bayesiana aplicada ao modelo hipsométrico de Stoffels e Soest apresentou desempenho preditivo equivalente ao método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) em um povoamento clonal de *E. urophylla* com 60 meses de idade, indicando que, em condições de relativa homogeneidade estrutural, a escolha do método de estimação tem impacto limitado sobre a acurácia pontual das estimativas de altura.

Embora não tenha proporcionado ganhos expressivos em termos de precisão preditiva, a abordagem Bayesiana demonstrou maior potencial analítico ao permitir a quantificação explícita da incerteza associada aos parâmetros e às previsões, o que amplia sua utilidade em aplicações florestais orientadas à tomada de decisão sob risco, como estimativas de volume, biomassa e estoque de carbono.

De forma geral, o modelo de Stoffels e Soest mantém sua relevância operacional para a modelagem hipsométrica em inventários de eucalipto, enquanto a inferência Bayesiana se destaca como uma alternativa complementar para incorporar incerteza de forma estruturada, especialmente em contextos mais complexos ou heterogêneos.

REFERÊNCIAS

- BATISTA, J. L. F.; COUTO, H. T. Z. do; SILVA FILHO, D. F. da. **Quantificação de recursos florestais: árvores, arvoredos e florestas**. São Paulo: Oficina de Textos, 2014.
- BINOTI, D. H. B.; DUARTE, P. J.; SILVA, M. L. M.; SILVA, G. F.; LEITE, H. G.; MENDONÇA, A. R.; ANDRADE, V. C. L.; VEGA, A. E. D. Estimation of height of Eucalyptus trees with neuroevolution of augmenting topologies (NEAT). *Revista Árvore*, v. 41, n. 3, e410314, 2017. Disponível em: <https://doi.org/10.1590/1806-90882017000300014>. Acesso em: 1 jul. 2026.
- BURKHART, H. E.; TOMÉ, M. **Modeling forest trees and stands**. Dordrecht: Springer, 2012.
- CAMPOS, J. C. C.; LEITE, H. G. **Mensuração florestal: perguntas e respostas**. 5. ed. Viçosa: UFV, 2017.
- CRECENTE-CAMPO, F.; TOMÉ, M.; SOARES, P.; DIÉGUEZ-ARANDA, U. A generalized nonlinear mixed-effects height–diameter model for Eucalyptus globulus L. in northwestern Spain. *Forest Ecology and Management*, v. 259, n. 5, p. 943–952, 2010. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2010.02.025>. Acesso em: 2 jul. 2026.
- ENQUIST, B. J.; BROWN, J. H.; WEST, G. B. Allometric scaling of plant energetics and population density. *Nature*, v. 395, p. 163–165, 1998. Disponível em: <https://doi.org/10.1038/25977>. Acesso em: 3 jul. 2026.
- FORRESTER, D. I.; ELMS, S. R.; BAKER, T. G. Tree growth–competition relationships in thinned Eucalyptus plantations vary with stand structure and site quality. *European Journal of Forest Research*, v. 132, n. 2, p. 241–252, 2013. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s10342-012-0671-0>. Acesso em: 4 jul. 2026.
- GUJARATI, D. N.; PORTER, D. C. **Econometria básica**. 5. ed. Porto Alegre: AMGH, 2011.
- LAFETÁ, B. O. *et al.* Aplicações de relações hipsométricas e volumetria em povoamento seminal de Eucalyptus cloeziana F. Muell. *Revista de Ciências Agroveterinárias*, v. 23, n. 3, p. 492–501, 2024. Disponível em: <https://doi.org/10.5965/223811712332024492>. Acesso em: 5 jul. 2026.
- LAFETÁ, B. O. *et al.* Modeling alternatives for height estimation in Eucalyptus tree species. *Revista Forestal Mesoamericana Kurú*, v. 20, n. 47, p. 1–8, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.18845/rfmk.v20i47.6816>. Acesso em: 6 jul. 2026.
- LINDLEY, D. V.; SMITH, A. F. M. Bayes estimates for the linear model. *Journal of the Royal Statistical Society: Series B*, v. 34, n. 1, p. 1–18, 1972.
- ÖZÇELİK, R. *et al.* Predicting tree height from tree diameter and dominant height using mixed-effects and quantile regression models for two species in Turkey. **Forest**

Ecology and Management, v. 419-420, p. 240–248, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2018.03.051>. Acesso em: 7 jul. 2026.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation, 2026. Disponível em: <https://www.R-project.org/>. Acesso em: 8 jul. 2026.

RAPTIS, D. I. *et al.* Mixed-effects height–diameter models for black pine. **Trees**, v. 35, p. 1167–1183, 2021. Disponível em: <https://doi.org/10.1007/s00468-021-02106-x>. Acesso em: 9 jul. 2026.

RESENDE, R. T. *et al.* Environmental uniformity, site quality and tree competition interact to determine stand productivity of clonal Eucalyptus. **Forest Ecology and Management**, v. 410, p. 76–83, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.foreco.2017.12.038>. Acesso em: 10 jul. 2026.

SALLES, T. T. *et al.* Bayesian approach and extreme value theory in economic analysis of forestry projects. **Forest Policy and Economics**, v. 105, p. 64–71, 2019. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.forpol.2019.05.021>. Acesso em: 11 jul. 2026.

STOFFELS, A.; VAN SOEST, J. The main problems in sample plots. **Nederlands Bosbouw Tijdschrift**, v. 25, p. 190–199, 1953.

VANCLAY, J. K. **Modelling forest growth and yield**: applications to mixed tropical forests. Wallingford: CAB International, 1994.

VIEIRA, G. C. *et al.* Prognoses of diameter and height of trees of Eucalyptus using artificial intelligence. **Science of the Total Environment**, v. 619-620, p. 1473–1481, 2018. Disponível em: <https://doi.org/10.1016/j.scitotenv.2017.11.138>. Acesso em: 12 jul. 2026.

ZHOU, X. *et al.* Determination of optimal tree height models... **Annals of Forest Science**, v. 80, art. 18, 2023. Disponível em: <https://doi.org/10.1186/s13595-023-01185-9>. Acesso em: 13 jul. 2026.