



MODELAGEM HIPSOMÉTRICA PARA *Eucalyptus urograndis* EM CONDIÇÕES AMAZÔNICAS: VALIDAÇÃO INTEGRADA DE MODELOS ALTURA-DIÂMETRO

Adenilda Ribeiro de Moura¹, Jadson Coelho de Abreu², Adelilson Chagas Rodrigues³

¹Bióloga, Dra. Em Ciências Florestais pelo do Programa de Pós-Graduação em Ciências Florestais, Universidade Federal Rural de Pernambuco-UFRPE. E-mail: adenilda@unifap.br; ²Engenheiro Florestal, Professor Dr. do Colegiado de Engenharia Florestal, Universidade do Estado do Amapá, Macapá, AP. E-mail: jadson.abreu@ueap.edu.br; ³Biólogo, Mestrando pelo Programa de Pós-Graduação em Biodiversidade Tropical, PPGBio-UNIFAP. E-mail: adelilsonrodrigues78@gmail.com

Manejo Florestal: Dendrometria e Inventário Florestal

RESUMO

Este estudo comparou seis modelos hipsométricos para *Eucalyptus urograndis* na Amazônia utilizando dados de 733 árvores da AMCEL (2014-2020). Foram testados os modelos de Schumacher, Curtis, Stoffels, Logarítmico Inverso, Polinomial e Petterson, avaliados através de critérios estatísticos e validação gráfica. O modelo Logarítmico Inverso apresentou desempenho superior ($R^2_{aj} = 0,719$; $Syx\% = 0,474\%$), seguido por Stoffels e Schumacher. Os modelos logarítmicos demonstraram superioridade absoluta sobre os não-logarítmicos, com diferenças dramáticas no erro padrão ($< 0,5\%$ versus $> 9\%$). Os resultados confirmaram a confiabilidade dos modelos logarítmicos para manejo florestal amazônico.

Palavras-chave: Relação altura-diâmetro; Inventário florestal; Eucaliptocultura amazônica; Modelos de regressão; Validação estatística.

1. INTRODUÇÃO

O cultivo de eucalipto na região amazônica tem ganhado crescente importância, especialmente no Amapá, onde a AMCEL desenvolve plantios comerciais em larga escala. A expansão da eucaliptocultura nesta região tropical úmida apresenta desafios únicos relacionados às condições edafoclimáticas específicas da Amazônia (ALMEIDA e VIEIRA, 2022), demandando estudos sobre o comportamento silvicultural em ambiente equatorial.

A modelagem altura-diâmetro assume particular relevância nos plantios amazônicos, onde as condições tropicais podem influenciar significativamente os padrões de crescimento (FERRAZ FILHO et al., 2018). O desenvolvimento de modelos hipsométricos específicos para o Amapá torna-se fundamental, considerando que modelos tradicionais podem não capturar adequadamente as

particularidades do crescimento em condições tropicais úmidas (ANDRADE et al., 2023). A determinação acurada da altura constitui informação fundamental para estimativas de volume e produtividade (ACOSTA et al., 2020).

Este trabalho objetivou ajustar, validar e comparar seis modelos hipsométricos para *Eucalyptus urograndis* na Amazônia brasileira, mediante análise estatística integrada, visando identificar o modelo mais adequado para estimativas confiáveis em condições amazônicas.

2. MATERIAL E MÉTODOS

2.1 Área de Estudo

A pesquisa foi realizada em plantios da AMCEL S/A – Amapá Florestal e Celulose, situada no município de Porto Grande, estado do Amapá, região Norte do Brasil, nas coordenadas geográficas 08°53'76" S e 51°19'41" W. O clima da região é caracterizado como equatorial úmido, com temperatura média anual de 27°C, precipitação média de 2.300 mm anuais e umidade relativa superior a 80%.

2.2 Coleta de dados

Os dados foram coletados entre 2014-2020 em 40 parcelas de *Eucalyptus urograndis*, totalizando 733 árvores mensuradas em cinco idades (24-84 meses). As variáveis incluíram DAP e altura total, com cubagem em 166 árvores.

2.3. Análise dos dados

Para o ajuste da relação hipsométricas, utilizaram-se dados de Ht e D obtidos pelo inventário florestal e na cubagem. Os modelos matemáticos ajustados neste trabalho foram selecionados na literatura e estão descritos na Tabela 1.

Tabela 1 - Modelos de relação hipsométricas testados para a espécie do gênero *Eucalyptus urograndis*

Nº	Modelo	Autores
1	$\ln(Ht) = \beta_0 + \beta_1 \times \ln(D) + \varepsilon_i$	Schumacher
2	$Ht = \beta_0 \times D^{\beta_1} + \varepsilon_i$	Curtis
3	$\ln(Ht) = \beta_0 + \beta_1 \times \ln(D) + \beta_2 \times [\ln(D)]^2 + \varepsilon_i$	Stoffels
4	$\ln(Ht) = \beta_0 + \beta_1 \times (1/D) + \varepsilon_i$	Logarítmico Inverso
5	$Ht = \beta_0 + \beta_1 \times D + \beta_2 \times D^2 + \varepsilon_i$	Polinomial de 2º Grau
6	$1/Ht - 1,3 = \beta_0 + \beta_1 \times (1/D) + \varepsilon_i$	Petterson

Em que: $\ln$ = logaritmo neperiano; D = diâmetro medido à 1,3 m do solo (cm); H_t = altura total (m); β_0 , β_1 e β_2 = parâmetros a serem estimados e ϵ_i = erro aleatório.

Os modelos foram avaliados através de: (i) Estatísticas numéricas: coeficiente de determinação ajustado (R^2_{aj}), erro padrão da estimativa ($Syx\%$), erro médio quadrático (EMQ), critério de informação de Akaike (AIC) e teste F de significância; (ii) Validação gráfica: análise de resíduos versus valores preditos, gráficos quantil-quantil (Q-Q plots) para normalidade e histogramas de distribuição de frequências. As análises foram realizadas no software R versão 4.3.0.

3. RESULTADOS E DISCUSSÃO

Os resultados revelaram diferenças marcantes no desempenho dos modelos testados (Tabela 1). O modelo Logarítmico Inverso apresentou desempenho superior com $R^2_{aj} = 0,719$, $Syx\% = 0,474\%$ e $AIC = -309,88$, seguido pelos modelos de Stoffels ($R^2_{aj} = 0,715$; $Syx\% = 0,477\%$) e Schumacher ($R^2_{aj} = 0,709$; $Syx\% = 0,483\%$).

Tabela 2 - Estatísticas de ajuste dos modelos hipsométricos para clones de *Eucalyptus urograndis*

Autores	Coeficientes			EMQ	Syx%	R^2_{aj}	AIC	F-valor
	β_0	β_1	β_2					
Schumacher	1.744	0.479		0.009	0.483	0.709	-304.24	401.56
Curtis	5.898	0.469		3.339	9.329	0.698	673.19	190.62
Stoffels	0.807	1.244	-0.153	0.009	0.477	0.715	-306.70	207.24
Logarítmico Inverso	3.423	-5.563		0,009	0.474	0.719	-309.88	421.18
Polinomial de 2º Grau	7.046	1.213	-0.018	3.368	9.399	0.695	676.64	188.25
Petterson	0.026	0.3571		3.335	9.399	0.696	676.64	126.51

β_0 , β_1 e β_2 = parâmetros estimados; EMQ = Erro médio quadrático; $Syx\%$ = erro padrão da estimativa em percentual; R^2_{aj} = Coeficiente de determinação ajustado; AIC e F-valor. Fonte: Moura, 2025.

A análise gráfica dos resíduos (Figura 1) revelou padrões distintos entre os grupos de modelos. Os modelos logarítmicos apresentaram distribuição aproximadamente aleatória dos resíduos em torno de zero, com variância relativamente constante (homocedasticidade). A linha LOESS permaneceu próxima ao zero, confirmando ausência de tendências sistemáticas.

Em contraste, os modelos não-logarítmicos exibiram violações claras das premissas de regressão: o modelo Curtis apresentou heterocedasticidade evidente,

com variância crescente dos resíduos; o Polinomial mostrou padrão em "U", indicando forma funcional inadequada; e o Petterson revelou dispersão irregular dos resíduos.

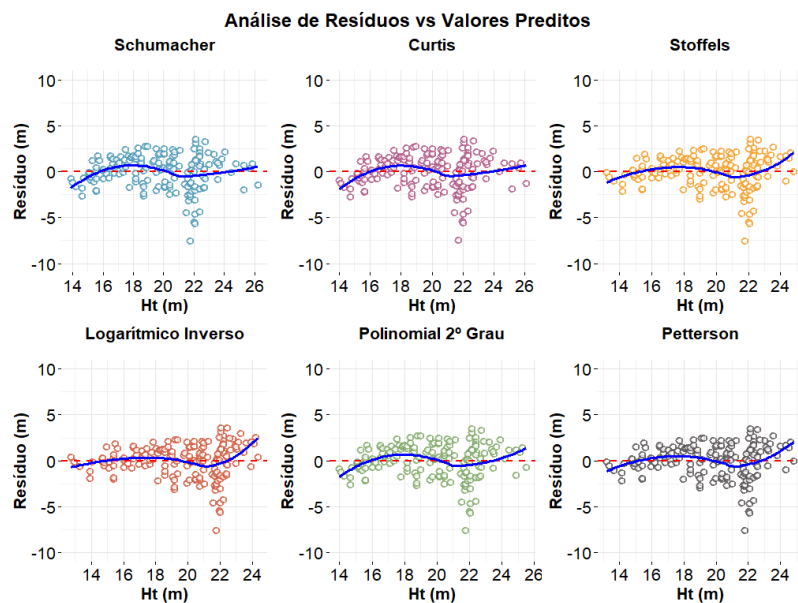


Figura 1 - Distribuição dos resíduos em função dos valores preditos de altura para os seis modelos hipsométricos avaliados em plantio de eucalipto.

Os gráficos quantil-quantil (Figura 2) confirmaram a adequação dos modelos logarítmicos às premissas de normalidade. O modelo de Stoffels destacou-se pela excelente aderência dos pontos à linha diagonal, seguido pelos modelos Schumacher e Logaritmico Inverso, que apresentaram pequenos desvios apenas nas caudas da distribuição. Os modelos não-logarítmicos violaram premissas de normalidade, explicando seus desempenhos inferiores e comprometendo a confiabilidade.

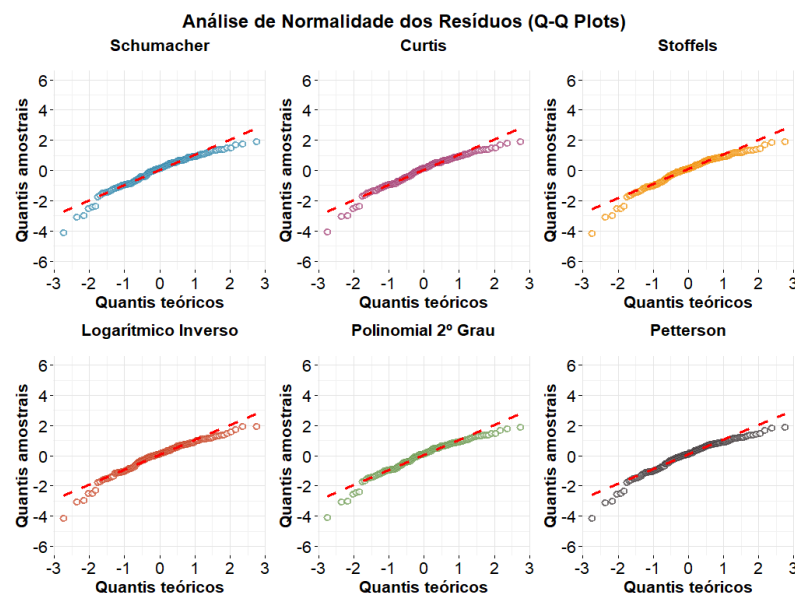


Figura 2 - Validação da normalidade dos resíduos dos modelos hipsométricos através de análise quantil-quantil.

A análise dos histogramas (Figura 3) completou a validação das premissas, mostrando que os modelos logarítmicos apresentaram distribuições aproximadamente normais, com formato de sino bem definido e centralização adequada no zero. O Logarítmico Inverso e Stoffels exibiram as distribuições mais simétricas e concentradas.

Os modelos não-logarítmicos revelaram distribuições claramente não-normais: o Polinomial apresentou distribuição bimodal e fortemente assimétrica, Curtis mostrou distribuição achatada com maior dispersão, e Petterson exibiu assimetria pronunciada. Estes padrões explicam os erros elevados e validam as conclusões das análises numéricas.

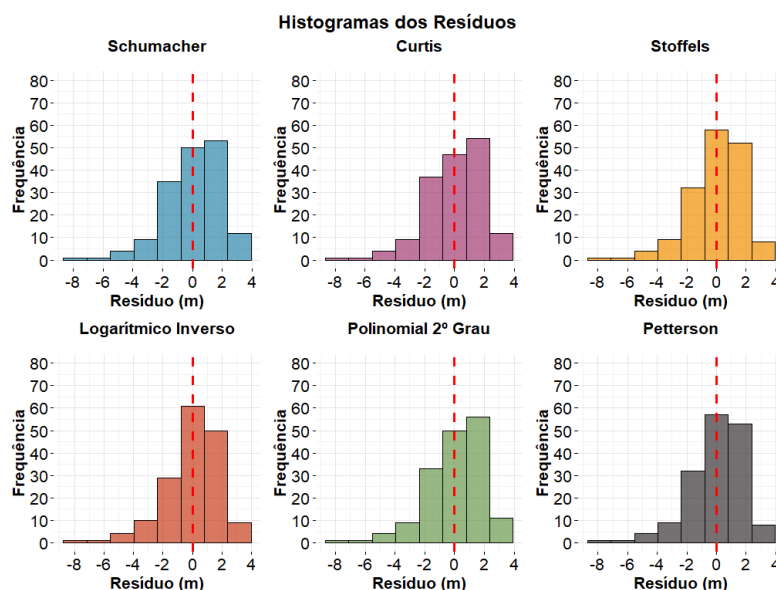


Figura 3 - Histogramas dos resíduos para avaliação da distribuição de frequências dos modelos hipsométricos ajustados.

Os resultados obtidos são consistentes com estudos anteriores em plantios de eucalipto no Brasil. Ferraz Filho et al. (2018) reportaram R^2 entre 0,65-0,85 para modelos hipsométricos em eucalipto, valores próximos aos encontrados neste estudo. Segundo Pereira, et al., (2023) também propuseram outros modelos hipsométricos para *Eucaliptos Urograndis*, com foco em compreender o comportamento ecológico da espécie, fornecendo novas informações para o manejo da espécie.

4. CONCLUSÃO

A análise integrada confirmou a superioridade dos modelos logarítmicos para *Eucalyptus urograndis* na Amazônia, com o modelo Logarítmico Inverso apresentando desempenho superior ($R^2_{aj} = 0,719$; $Syx\% = 0,474\%$). A diferença dramática no erro padrão entre modelos logarítmicos e não-logarítmicos ($< 0,5\%$ versus $> 9\%$) estabelece base científica sólida para recomendações práticas em plantios amazônicos.

4. AGRADECIMENTOS

A Empresa Amapá Florestal e Celulose AMCEL S/A, por fornecer os dados do inventário florestal contínuo realizado entre os anos de 2014 e 2020.

5. REFERÊNCIAS

ACOSTA, H. A. B., WATZLAWICK, L. F., STEPKA, T. F. Identidade de modelos hipsométricos para clones de eucalipto na região oriental do Paraguai. **Scientia Forestalis**, v.48, n.125, p.1-12, 2020. <https://doi.org/10.18671/scifor.v48n125.16>.

AKAIKE, H. A new look at the statistical model identification. **Automatic Control, IEEE Transactions on**, v. 19, n. 6, p. 716-723, 1974.

ALMEIDA C. A., VIEIRA, I. C. G. Expansão territorial da monocultura do eucalipto na Amazônia oriental. **Novos Cadernos NAEA**. v. 25 n. 3, p. 127-145, 2022.

ANDRADE, V. C. L. et al. Modelos regionais de relação hipsométrica avaliados para eucalipto clonal. **Ciência Florestal**, v. 33, n. 1, p. 1-20, 2023. <https://doi.org/10.5902/1980509867995>.

FERRAZ FILHO, A. C., MOLA-YUDEGO, B., RIBEIRO, A., SCOLFORO, J. R. S., LOOS, R. A., & SCOLFORO, H. F. Height-diameter models for *Eucalyptus* sp. plantations in Brazil. **Cerne**, v.24, n.1, p.9-17, 2018. <https://doi.org/10.1590/01047760201824012466>.

PEREIRA, A. et al. Ajuste de modelos hipsométricos em povoamento de *Eucalyptus* sp. no Cerrado amapaense. In: ANDRADE, Jaily Kerller Batista (Org.). **Estudos em Ciências Biológicas e Florestais**. Campina Grande: Licuri, 2023, p. 68-76. DOI: 10.58203/Licuri.20416.

R CORE TEAM R: A language and environment for statistical computing R foundation for Statistical Computing. Vienna, 2014. Disponível em: R Core Team (2024). <https://www.R-project.org/>.