

**INSTITUTO FEDERAL DE MINAS GERAIS
CAMPUS SÃO JOÃO EVANGELISTA
BACHARELADO EM ENGENHARIA FLORESTAL
IVELTON ALVES PIMENTA**

**ALTERNATIVAS DE MODELAGEM PARA A ESTIMATIVA DA ALTURA DE
EUCALIPTO**

**SÃO JOÃO EVANGELISTA
2022**

IVELTON ALVES PIMENTA

**ALTERNATIVAS DE MODELAGEM PARA A ESTIMATIVA DA ALTURA DE
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: Dr. Bruno Oliveira Lafetá

SÃO JOÃO EVANGELISTA

2022

REDE DE BIBLIOTECAS

FICHA CATALOGRÁFICA PARA TRABALHO DE CONCLUSÃO DE CURSO

FICHA CATALOGRÁFICA

P644a Pimenta, Ivelton Alves.

Alternativas de modelagem para a estimativa da altura de eucalipto. / Ivelton Alves Pimenta. - 2022.
20 p.:il.

Orientador: Prof. Dr. Bruno Oliveira Lafetá.

Trabalho de Conclusão de Curso (Graduação em Engenharia Florestal) - Instituto Federal de Minas Gerais. *Campus* São João Evangelista, 2022.

1. Competição. 2. Generalização. 3. Relação hipsométrica.
4. Regressão linear. I. Instituto Federal de Minas Gerais. II. Título.

CDD 634.97342

Catálogo: Rejane Valéria Santos - CRB-6/2907

IVELTON ALVES PIMENTA

**ALTERNATIVAS DE MODELAGEM PARA A ESTIMATIVA DA ALTURA DE
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.

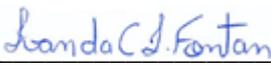
Orientador: Prof. Dr. Bruno Oliveira Lafetá

Aprovada em 12 /01/2022

BANCA EXAMINADORA


Orientador Prof. Dr. Bruno Oliveira Lafetá
Instituição: Instituto Federal de Minas Gerais


Prof^a. Ma. Ana Carolina Ferraro
Instituição: Instituto Federal de Minas Gerais


Prof. Me. Ivan da Costa Ilhéu Fontan
Instituição: Instituto Federal de Minas Gerais

AGRADECIMENTOS

A Deus, pela vida que Ele me concedeu, pelos dons que me deu e que serviram na realização deste projeto, por sempre me mostrar o caminho certo e que me deu saúde e força para chegar até o final.

Aos meus pais Isabel e Itamar, meus maiores exemplos, por todo apoio e incentivo que sempre me deram durante toda minha vida e que serviram de alicerce para as minhas realizações, por todo o esforço investido na minha educação, e por acreditarem que eu seria capaz de superar os obstáculos que a vida me apresentou.

Ao meu professor e orientador Bruno, pela confiança depositada na minha proposta de projeto, pelo seu conhecimento e as inúmeras e valiosas contribuições dadas no presente trabalho, pela dedicação e paciência durante o projeto. Obrigado por me manter motivado durante todo o processo.

Aos professores, pelas correções e ensinamentos que me permitiram apresentar um melhor desempenho no meu processo de formação profissional ao longo do curso, por todos os conselhos, pela ajuda e pela paciência com a qual guiaram o meu aprendizado.

À minha querida namorada Stela, pelo seu amor incondicional e que sempre esteve ao meu lado durante o meu percurso acadêmico e que jamais me negou apoio, carinho e incentivo.

À todos os meus amigos do curso de graduação e toda comunidade acadêmica pelas trocas de ideias e ajuda mútua e que juntos conseguimos avançar e ultrapassar todos os obstáculos.

Aos meus amigos deixo aqui minha gratidão, pois foram eles que fizeram com que eu seguisse sempre de cabeça erguida.

Aos funcionários e colaboradores do Instituto Federal de Minas Gerais que contribuíram de forma direta ou indireta para a conclusão deste trabalho, bem como de todo meu percurso acadêmico.

Ao Instituto Federal de Minas Gerais que me deu a oportunidade de estudar nesta instituição renomada, pela demonstração de comprometimento com a qualidade e excelência do ensino e por ter me proporcionado a estrutura necessária para que pudesse crescer academicamente e pessoalmente.

Por fim, agradeço a todos de coração, os que foram aqui mencionados e os que não, porque não dá para falar de todos em particular, mas todos foram imensamente importantes para meu percurso.

RESUMO

Investigações científicas sobre a modelagem da altura de árvores reduzem custos e o tempo em inventário florestais, aumentando o rendimento da amostragem. O objetivo do presente trabalho foi avaliar alternativas para a modelagem hipsométrica generalista de eucalipto via regressão linear, com a inclusão de índices de competição independentes da distância como variável preditora. Os dados utilizados foram provenientes de 34 parcelas distribuídas em quatro unidades de manejo florestal com 72 meses de idade. Calcularam-se 7 índices de competição independentes da distância. Avaliou-se o desempenho preditivo de 16 modelos hipsométricos generalistas, sendo propostos 14 modelos de dupla entrada (DAP e índice de competição). Todas as equações geradas foram biologicamente consistentes. Diante da ausência de informações da altura de árvores dominantes, a modelagem generalista pode ser melhor viabilizada com a inclusão do índice IC4, que representa a área basal de árvores vizinhas competidoras. Conclui-se que a inclusão de índices de competição em modelos hipsométricos ampliam a capacidade de generalização de equações para talhões de eucalipto com distintas capacidades produtivas. O índice de competição IC4 favorece a qualidade de ajuste e desempenho preditivo da modelagem hipsométrica nos sítios estudados.

Palavras-chave: competição. generalização. relação hipsométrica. regressão linear.

ABSTRACT

Scientific investigations on tree height modeling reduce costs and time in forest inventory, increasing sampling yield. This work aimed to evaluate alternatives for generalist hypsometric modeling of eucalypt via linear regression, with inclusion of distance-independent competition indices as a predictor variable. The data used came from 34 plots distributed in four 72-month-old forest management units. Seven distance-independent competition indices were calculated. The predictive performance of 16 generalist hypsometric models was evaluated, and 14 double-entry models (DAP and competition index) were proposed. All equations generated were biologically consistent. Given the information absence on the height of dominant trees, generalist modeling can be better employed with inclusion of the IC4 index, which represents basal area of neighboring competing trees. It is concluded that the inclusion of competition indices in hypsometric models increase generalization capacity of equations for eucalyptus stands with different productive capacities. The IC4 competition index favors fit quality and predictive performance of the hypsometric modeling in the studied sites.

Keywords: competition. generalization. hypsometric relationship. linear regression.

SUMÁRIO

1 INTRODUÇÃO	7
2 MATERIAL E MÉTODOS	9
3 RESULTADOS	12
4 DISCUSSÃO	15
5 CONCLUSÕES.....	17
REFERÊNCIAS	18

1 INTRODUÇÃO

O detalhamento e a qualidade de informações biométricas são essenciais para um adequado planejamento e prognóstico do crescimento e produtividade florestal. A busca por alternativas que forneçam estimativas exatas e reduzam o tempo das medições em campo são constantes, exigindo pesquisas que subsidiem o processamento de dados do inventário florestal (DANTAS et al., 2020).

A altura total de uma árvore se refere à distância linear do nível do solo até o ápice da copa. Trata-se de uma variável biométrica amplamente utilizada em cálculos volumétricos de fustes e de seus múltiplos sortimentos, classificação produtiva de sítios, caracterização de crescimento e orçamentos de carbono (FERRAZ FILHO et al., 2018). Por outro lado, sua medição é mais dispendiosa e demorada em comparação com aquela do diâmetro. A fim de se otimizar a mensuração em povoamentos equiâneos, é comum medir a altura de uma parte das árvores da parcela e adotar a modelagem hipsométrica para a estimativa de altura dos demais indivíduos, que tiveram somente o diâmetro medido.

A modelagem hipsométrica por sua vez, é uma técnica para o estabelecimento de relação funcional com vistas à estimativa da altura individual de árvores, processada frequentemente via regressão linear. A estimação da variável mais laboriosa em função daquela correlacionada de mais fácil e rápida medição, permite uma sensível redução nos custos e melhoria operacional de amostragem (SANQUETTA et al., 2015).

Os modelos hipsométricos podem ser classificados em duas categorias distintas de acordo com a aplicabilidade, tradicional (local) ou generalistas (geral). Modelos tradicionais são os mais simples, dependentes apenas do diâmetro e indicados para o ajustamento por talhão ou para um pequeno conjunto de talhões análogos e homogêneos em termos de capacidade produtiva. A forte correlação entre a altura e o diâmetro justifica o uso desta como variável preditora em modelos tradicionais. Contudo, diversos aspectos estão relacionados com a expressão do crescimento vegetal. É preciso a compreensão de que as árvores se encontram em contínuo estado de competição em um povoamento florestal, sendo o crescimento influenciado por aspectos genéticos, edáficos, fisiográficos, climáticos e demais mecanismos relacionados à complexidade de ecossistemas (VATRAZ et al., 2016; VERSACE et al., 2019).

A inclusão de características do povoamento aumenta a qualidade preditiva e realismo biológico dos modelos hipsométricos, tornando a equação adaptável a vários sítios (BINOTI et al., 2017; SCHMITT; ANDRADE, 2019; DANTAS et al., 2020; FERNANDES et al., 2021). O modelo generalista mais conhecido no setor florestal brasileiro é o de Campos et al. (1984),

que se baseia no uso de dados logaritmizados de diâmetro e altura dominante como variáveis preditoras. Todavia, a coleta de dados é um entrave para o uso desse modelo, que requer a identificação e medição da altura de mais árvores em campo, especificadamente, daquelas dominantes.

Na busca de alternativas mais eficientes para a estimativa da altura de árvores, adaptações em modelos hipsométricos clássicos podem ser adotadas para a melhoria do desempenho da modelagem sem intensificar a mensuração em campo. Apesar de incipiente, a inclusão de variáveis preditoras obtidas em nível de parcela tem sido pesquisada em substituição a altura dominante, como o diâmetro médio quadrático, diâmetro máximo, diâmetro dominante, média aritmética do diâmetro e outras (TOMÉ et al., 2007; FERRAZ FILHO et al., 2018; TÉO; SILVA, 2020). Outra alternativa promissora, é a inclusão de informações competitivas individuais da própria árvore como variável preditora para a estimativa de sua altura.

A competitividade entre árvores pode ser resumida na forma de índices ou expressões matemáticas que refletem o grau de supressão/dominância de cada árvore em relação às outras competidoras (HILL et al., 2016; COSTA et al., 2018; QUIÑONEZ-BARRAZA et al., 2018; YANG; HUANG, 2018; MINATTI et al., 2019). Os índices de competição independentes da distância é uma representação numérica do efeito cumulativo de todo o conjunto de características e interações bióticas e abióticas inerentes a uma árvore ou grupo de indivíduos ao longo do tempo, desconsiderando a posição espacial relativa de árvores dentro da unidade amostral (TENZIN et al. 2017; YANG; HUANG, 2018; LUSTOSA JÚNIOR et al., 2019).

Embora o uso de índices de competição seja comum em modelagens do crescimento e produção em nível de árvore individual (VIEIRA et al., 2018; CARRIJO et al., 2020), investigações científicas sobre sua aplicação na modelagem hipsométrica são escassas e podem subsidiar a quantificação de recursos florestais. Mediante exposto, o objetivo do presente trabalho foi avaliar alternativas para a modelagem hipsométrica generalista de eucalipto via regressão linear, com a inclusão de índices de competição independentes da distância como variáveis preditoras.

2 MATERIAL E MÉTODOS

O trabalho foi realizado com informações de 34 parcelas distribuídas aleatoriamente em povoamentos clonais de *Eucalyptus urophylla* S. T. Blake pertencentes a uma empresa florestal, localizados na região central de Minas Gerais. O clima da região é do tipo Cwa pelo sistema internacional de classificação de Köppen (ALVAREZ et al., 2013). Foram estabelecidas quatro unidades de manejo florestal (UMF) onde se realizou o inventário florestal aos 72 meses. As informações quanto às médias de temperatura e precipitação, área total de cada UMF, site, bem como o total de parcelas lançadas estão dispostas abaixo, conforme a tabela 1.

Tabela 1. Dados das Unidades de Manejo Florestal (UMF)

UMF	MÉDIAS		Área (ha)	Parcelas	Site (m)
	Temperatura (°C)	Precipitação (mm)			
1	22,7	1.259	87,91	11	29,26
2	23,4	1.043	42,74	6	29,81
3	23,4	1.043	77,21	10	24,94
4	23,0	1.189	85,57	7	23,12

Fonte: Próprio autor (2022)

A área útil de cada parcela e o espaçamento de plantio foram 400 m² e 3,0 × 2,5 m, respectivamente. Foram mensurados o diâmetro com casca à altura do peito (DAP – à altura de 1,30 m do solo, cm) de todos os fustes. Em cada parcela, tomaram-se a altura total (Ht, m) das 15 primeiras árvores e de quatro árvores dominantes (Hd, m), conforme conceito de Assmann (1970), equivalente a uma árvore dominante a cada 100 m². Assumindo a idade índice de 72 meses, a capacidade produtiva de UMF1 a UMF4 foram de: S = 29,26 m; S = 29,81 m; S = 24,94 m e; S = 26,12 m, respectivamente.

Calcularam-se sete índices de competição independentes da distância conhecidos no setor florestal (Tabela 2). Os índices (IC1 a IC3) representam a competição bilateral e assumem que os recursos de crescimento são disputados por todas as árvores vizinhas. Os demais índices IC4, IC5, IC6 e IC7 assumem como árvores competidoras aquelas de diâmetro maior que a árvore objetivo e, portanto, representam a competição unilateral, ou seja, árvores maiores não são afetadas por aquelas vizinhas menores.

Tabela 2. Índices de competição calculados para as árvores de eucalipto

Índice	Expressão	Interpretação
----- Competição bilateral -----		
IC1	$IC_1 = \sum_{j=1}^n \frac{DAP_j}{DAP_i}$	Quanto menor o índice, menor é a competição sobre a árvore objetivo.
IC2	$IC_2 = \frac{DAP_i^2}{\overline{DAP}^2}$	Quanto menor o índice, maior é a competição sobre a árvore objetivo.
IC3	$IC_3 = \frac{DAP_i^2}{q^2}$	Quanto menor o índice, maior é a competição sobre a árvore objetivo.
----- Competição unilateral -----		
IC4	$IC_4 = \sum_{i=1}^{nj} g_j$	Quanto menor o índice, menor é a competição sobre a árvore objetivo.
IC5	$IC_5 = \sum_{i=1}^{nj} g_j / DAP_i$	Quanto menor o índice, menor é a competição sobre a árvore i.
IC6	$IC_6 = \frac{DAP_i}{DAP_{max}}$	Quanto menor o índice, maior é a competição sobre a árvore i.
IC7	$IC_7 = \frac{DAP_i}{Dd}$	Quanto menor o índice, maior é a competição sobre a árvore i.

Em que: \overline{DAP} = média de DAP das árvores de setor (cm); q = diâmetro médio quadrático (cm); DAP_{max} = DAP da árvore mais grossa; Dd = média do diâmetro de árvores dominantes; g_j = área basal das árvores competidoras (m^2/ha) com DAP maior que o DAP da árvore-objetivo; i = i-ésima árvore-objetivo e; j = j-ésima árvore competidora.

Os dados foram divididos aleatoriamente em grupos de parametrização (70,0 % das amostras) e de validação (30,0 % das amostras), mutuamente exclusivos, empregando método randômico de amostragem sem reposição (método holdout). Nessa divisão, todas as parcelas foram contempladas com árvores em ambos os grupos (Tabela 3).

Tabela 3. Descrição de dados utilizados no ajuste hipsométrico de eucalipto aos 72 meses de idade, separados em grupos de parametrização e validação.

Estatística	Parametrização				Validação			
	UMF1	UMF2	UMF3	UMF4	UMF1	UMF2	UMF3	UMF4
----- cm -----								
DAP mínimo	11,30	13,05	3,44	9,99	3,82	12,06	9,33	9,89
DAP máximo	21,52	21,49	17,03	19,07	19,64	20,53	16,55	19,19
Média de Dd	19,37	19,24	15,90	17,35	19,39	19,24	15,91	17,43
----- m -----								
Altura mínima	20,60	22,50	6,80	19,90	7,30	21,10	19,50	21,00
Altura máxima	31,60	32,40	27,50	27,20	31,70	32,00	26,90	26,80
Média de Hd	29,48	29,85	24,91	26,11	29,53	29,82	24,95	26,12

Dd = diâmetro dominante. Hd = altura dominante.

Ajustaram-se 16 modelos hipsométricos generalistas (Tabela 4), sendo 2 modelos já consolidados no setor florestal de dupla entrada (DAP e altura dominante no primeiro e DAP e

diâmetro dominante no segundo) e 14 modelos, também de dupla entrada (DAP e índice de competição). Os modelos propostos foram estabelecidos a partir dos modelos tradicionais de Curtis (1967) e de Stoffels e Soest (1953), que possuem saída hipsométrica logaritmizada e se diferem em termos de variável preditora; o primeiro inclui o inverso de DAP e o segundo, o logaritmo de DAP. Todos os modelos foram ajustados a todo conjunto de dados do grupo de parametrização, isto é, sem estratificação. O método dos Mínimos Quadrados Ordinários (MQO) foi adotado nas análises de regressão.

Tabela 4. Modelos hipsométricos generalistas testados para a estimativa da altura de eucalipto aos 72 meses de idade

Id.	Modelos hipsométricos	Autor(es)
(1)	$Ln(Ht) = \beta_0 + \beta_1 \cdot (1/DAP) + \beta_2 \cdot Ln(Hd) + \varepsilon$	Campos et al. (1984)
(2)	$Ln(Ht) = \beta_0 + \beta_1 \cdot (1/DAP) + \beta_2 \cdot Ln(Dd) + \varepsilon$	-
(3)	$Ln(Ht) = \beta_0 + \beta_1 \cdot (1/DAP) + \beta_2 \cdot IC1 + \varepsilon$	Proposto
(4)	$Ln(Ht) = \beta_0 + \beta_1 \cdot (1/DAP) + \beta_2 \cdot IC2 + \varepsilon$	Proposto
(5)	$Ln(Ht) = \beta_0 + \beta_1 \cdot (1/DAP) + \beta_2 \cdot IC3 + \varepsilon$	Proposto
(6)	$Ln(Ht) = \beta_0 + \beta_1 \cdot (1/DAP) + \beta_2 \cdot IC4 + \varepsilon$	Proposto
(7)	$Ln(Ht) = \beta_0 + \beta_1 \cdot (1/DAP) + \beta_2 \cdot IC5 + \varepsilon$	Proposto
(8)	$Ln(Ht) = \beta_0 + \beta_1 \cdot (1/DAP) + \beta_2 \cdot IC6 + \varepsilon$	Proposto
(9)	$Ln(Ht) = \beta_0 + \beta_1 \cdot (1/DAP) + \beta_2 \cdot IC7 + \varepsilon$	Proposto
(10)	$Ln(Ht) = \beta_0 + \beta_1 \cdot ln(DAP) + \beta_2 \cdot IC1 + \varepsilon$	Proposto
(11)	$Ln(Ht) = \beta_0 + \beta_1 \cdot ln(DAP) + \beta_2 \cdot IC2 + \varepsilon$	Proposto
(12)	$Ln(Ht) = \beta_0 + \beta_1 \cdot ln(DAP) + \beta_2 \cdot IC3 + \varepsilon$	Proposto
(13)	$Ln(Ht) = \beta_0 + \beta_1 \cdot ln(DAP) + \beta_2 \cdot IC4 + \varepsilon$	Proposto
(14)	$Ln(Ht) = \beta_0 + \beta_1 \cdot ln(DAP) + \beta_2 \cdot IC5 + \varepsilon$	Proposto
(15)	$Ln(Ht) = \beta_0 + \beta_1 \cdot ln(DAP) + \beta_2 \cdot IC6 + \varepsilon$	Proposto
(16)	$Ln(Ht) = \beta_0 + \beta_1 \cdot ln(DAP) + \beta_2 \cdot IC7 + \varepsilon$	Proposto

Id. = Identificação; Ht = altura total (m); DAP = diâmetro à altura do peito (cm); Hd = altura dominante; Dd = diâmetro dominante; ε = erro aleatório; e β_0 , β_1 , β_2 e β_3 = coeficientes de regressão.

Foram selecionadas duas equações hipsométricas propostas, além daquelas provenientes do ajuste dos modelos (1) e (2), que são rotineiramente adotados no setor florestal. A seleção das equações mais precisas nas fases de parametrização e validação, se baseou nas seguintes medidas de precisão: significância dos parâmetros de regressão pelo teste t; menor raiz quadrada do erro médio (RQEM, %), menor média dos desvios absolutos ($|MDA|$, %), maior coeficiente de correlação de Pearson ($r_{Y\hat{Y}}$) e análise gráfica visual dos resíduos percentuais. A fim de se avaliar a presença de multicolinearidade dos modelos, calculou-se o Valor de Inflação da Variância (VIF)

Os pontos que extrapolaram a tendência geral dos dados não foram eliminados das análises estatísticas a fim de se verificar a capacidade da modelagem em lidar com *outliers* ou ruídos. Para diagnóstico de efeito estatístico, empregou-se 5% de significância em todas as análises. Estas foram efetuadas com auxílio do software R versão 3.5.2 (R CORE TEAM, 2018).

3 RESULTADOS

O valor de inflação da variância dos ajustes realizados foi baixo ($VIF < 4$). Os coeficientes e a qualidade de ajuste dos modelos hipsométricos generalistas para eucalipto aos 72 meses de idade se encontram na Tabela 5. Todos os coeficientes das equações foram significativos ($p \leq 0,05$), exceto para a equação (10). Esta equação foi descartada da análise gráfica subsequente. Em geral, as equações apresentaram poucos desvios (baixos valores de RQEM e MDA) e altas correlações ($r \geq 0,90$ na fase de parametrização e $r \geq 0,89$, na validação). Tomando-se como referência a fase de parametrização, a RQEM e MDA aumentaram em torno de 1,27 a 8,38% e de 0,35 a 8,64% na fase de validação. Notou-se pequeno aumento do coeficiente de correlação na fase de validação somente para a equação (2), de 0,06%.

Tabela 5. Coeficientes e qualidade de ajuste dos modelos hipsométricos generalistas para eucalipto aos 72 meses de idade

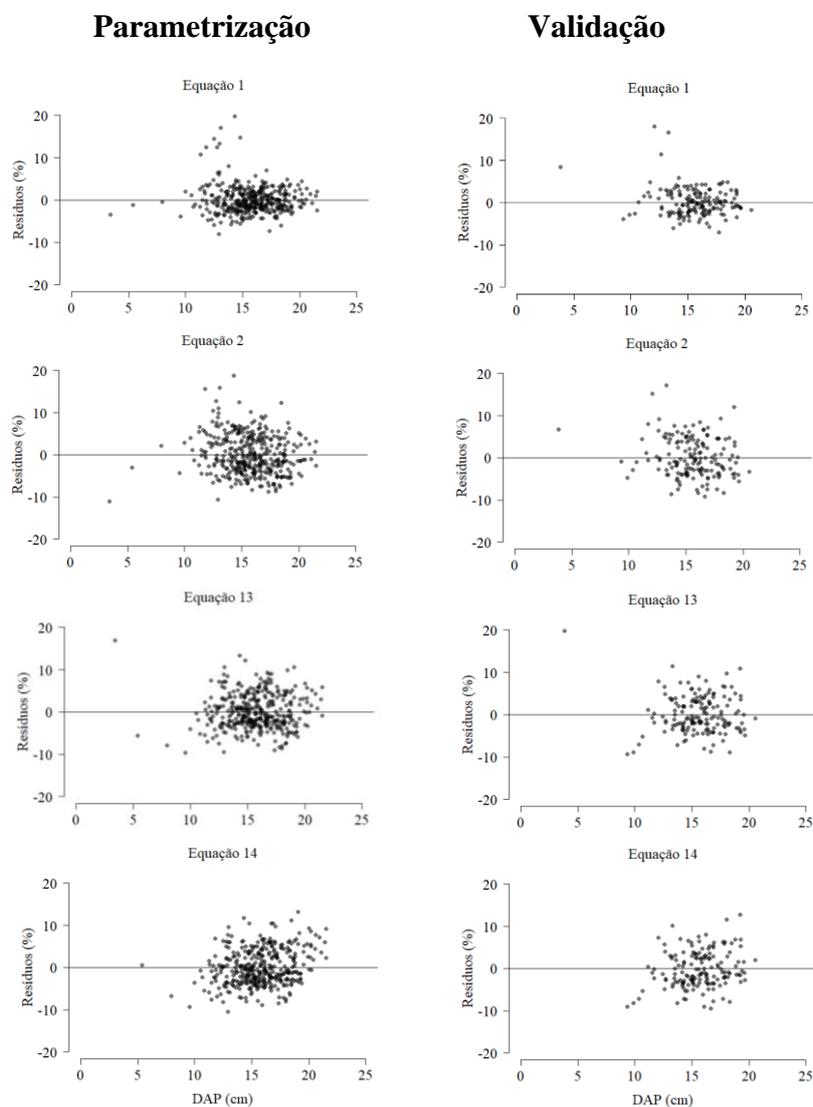
Modelo	β_0	β_1	β_2	Parametrização			Validação		
				RQEM	MDA	r	RQEM	MDA	r
(1)	1,6862*	-6,0668*	0,5960*	0,81	0,59	0,97*	0,83	0,62	0,96*
(2)	2,4971*	-6,3191*	0,4092*	1,20	0,99	0,92*	1,21	0,99	0,92*
(3)	3,7417*	-12,5132*	0,0075*	1,26	1,01	0,92*	1,36	1,07	0,91*
(4)	3,8209*	-7,7948*	-0,0463*	1,45	1,18	0,90*	1,51	1,22	0,89*
(5)	3,8221*	-7,7982*	-0,0481*	1,45	1,18	0,90*	1,51	1,22	0,89*
(6)	3,7451*	-7,7204*	0,0518*	1,42	1,15	0,90*	1,46	1,17	0,90*
(7)	3,8034*	-8,8640*	1,3285*	1,36	1,10	0,91*	1,38	1,11	0,91*
(8)	3,8803*	-7,9050*	-0,1199*	1,45	1,18	0,90*	1,51	1,23	0,89*
(9)	3,9114*	-8,0321*	-0,1419*	1,43	1,18	0,90*	1,48	1,21	0,89*
(10)	1,1692*	0,7486*	0,0008 ^{ns}	1,32	1,07	0,91*	1,43	1,16	0,89*
(11)	0,9948*	0,9034*	-0,1960*	1,13	0,91	0,93*	1,20	0,98	0,92*
(12)	0,9856*	0,9105*	-0,2094*	1,13	0,92	0,93*	1,19	0,97	0,93*
(13)	0,9225*	0,8304*	0,1498*	1,06	0,86	0,94*	1,09	0,90	0,94*
(14)	0,7159*	0,9080*	1,9054*	1,11	0,91	0,93*	1,15	0,93	0,93*
(15)	1,1876*	0,8656*	-0,3533*	1,22	1,00	0,92*	1,27	1,03	0,91*
(16)	1,1571*	0,8980*	-0,4081*	1,19	0,99	0,92*	1,21	1,00	0,92*

*, ^{ns} significativo e não significativo pelo teste t ao nível de confiança de 95% de probabilidade, respectivamente.

No que se refere às estatísticas de qualidade de ajuste, a equação (2) tendeu a oscilar menos entre fases de parametrização e validação. O modelo de Campos et al. (1984) ajustado, ou modelo (1), exibiu as maiores correlações e os menores valores de RQEM e MDA nas fases de parametrização e validação.

Dentre os modelos propostos (Tabela 4), as equações (13) e (14) tiveram os menores valores de RQEM ($\leq 1,15$) e MDA ($\leq 0,93$), além da maior correlação ($\geq 0,93$), durante parametrização e validação. Estas duas equações se basearam no modelo de Stoffels e Soest (1953) e a inclusão dos índices de competição IC4 e IC5 como preditores, respectivamente. Uma característica em comum destes índices é a inclusão do atributo área basal das árvores vizinhas competidoras na expressão matemática. Ambas as equações foram selecionadas para as análises de inspeção gráfica subsequentes (Figura 1).

Figura 1. Distribuição de resíduos percentuais das equações hipsométricas generalistas obtidas para eucalipto aos 72 meses de idade.



Apenas para fins gráficos, foram omitidos os resíduos percentuais da equação (14) referentes aos valores de 46,55% (DAP = 3,44 e IC5 = 0,24) e 47,39% (DAP = 3,82 e IC5 = 0,23) nas fases de parametrização e validação, respectivamente. A distribuição dos resíduos percentuais das equações selecionadas tendeu à homocedasticidade, exceto na equação (14). As equações (1) e (13) exibiram resíduos mais próximos ao eixo das abcissas, especialmente, no intervalo entre -10 a 10%.

4 DISCUSSÃO

Todas as equações hipsométricas geradas foram biologicamente consistentes, com coeficientes negativos associados ao inverso de DAP e positivos para as demais relações diretas com atributos biométricos (Tabela 5). É conveniente salientar que as estatísticas apresentadas nesta tabela não retratam o desempenho dos modelos hipsométricos, tratando-se apenas, das médias das variações das estimativas totais ou indicativo da qualidade de ajuste (SOUZA et al., 2016). Portanto, fez-se necessária a validação e análise gráfica de resíduos.

A inclusão da altura dominante na modelagem hipsométrica tem sido exaustivamente utilizada para ampliar o potencial de generalização das equações até talhões com diferentes potenciais produtivos. O modelo de Campos et al. (1984) ajustado apresentou a melhor qualidade de ajuste e desempenho estatístico para representar a relação hipsométrica de *E. urophylla* (Tabela 5 e Figura 1). Enfatiza-se que este modelo se difere do modelo de Curtis (1967) pela inclusão da altura dominante em sua expressão e possui, como limitação, a necessidade de informações de árvores dominantes durante a amostragem, tornando o inventário florestal mais dispendioso e laborioso.

Por outro lado, a inclusão de índice competição como variável preditora, independentes da distância e baseados em aspectos da estrutura horizontal, influenciou o desempenho preditivo dos modelos ajustados. Nas circunstâncias cuja amostragem não tenha abrangida a identificação e/ou coleta de informação hipsométrica de árvores dominantes, índices de competição podem ser analisados para a definição de equações generalistas para a estimativa da altura. Verificou-se que a inclusão de índices de competição favorece, em algumas ocasiões, a qualidade de ajustamento, reduzindo os desvios e ampliando o desempenho preditivo da modelagem generalista. Esta característica possui grande importância prática no processamento de dados, pois facilita a aplicação da equação hipsométrica para amplas áreas de cultivo e diminui a quantidade de estratificações e ajustes hipsométricos.

Os modelos generalistas propostos se fundamentaram em características competitivas individuais das próprias árvores. Embora a competição seja um fenômeno de alta complexidade biológica (HILL et al., 2016; SHARMA; BRUNNER, 2016; QUIÑONEZ-BARRAZA et al., 2018) e tenha sido sintetizada na forma de índice, a precisão do ajuste desses modelos foi considerada satisfatória. As equações provenientes dos modelos (10) a (16), baseadas na expressão do modelo de Stoffels e Soest (1953), exibiram qualidade de ajuste um pouco melhor em relação àquela que se baseou na inclusão do diâmetro dominante como variável preditora.

Apesar de que o ajuste do modelo (10) tenha resultado em coeficiente de regressão não significativo e, em comparação aos demais ajustes, poucos desvios (Tabela 5), não se verificou a presença de multicolinearidade, haja vista que, VIF acima de 10 é um indício claro de multicolinearidade (GUJARATI, 2000). Ressalta-se que diante de eventual presença da multicolinearidade, os coeficientes da regressão deixam de refletir os efeitos inerentes de particular variável independente sobre aquela dependente, representando parcialmente seu real efeito. Também, não se observou problemas de sub ou sobreparametrização nas equações obtidas, o que levaria a discrepâncias na qualidade de ajuste entre as fases de validação e parametrização. A validação é uma importante etapa para a escolha de um modelo hipsométrico livre de vieses e resíduos heterogêneos.

O uso indiscriminado de modelos hipsométricos deve ser visto com bastante cautela, pois dificuldades relacionadas a inconsistência biológica são comuns durante o processamento estatístico. A escolha apropriada de um modelo hipsométrico permite a obtenção de estimativas não enviesadas de altura e, conseqüentemente, do volume. A inclusão do índice de competição IC4 como variável preditora em modelos hipsométricos mostrou que pode ser uma alternativa viável em substituição ao uso de informações biométricas de árvores dominantes, reduzindo soma de quadrado dos resíduos e a intensidade de fustes amostrados para a modelagem hipsométrica generalista em povoamento equiâneos. Este índice representou a competição unilateral, aquela que implica em concorrência especialmente por radiação luminosa (SCHONS et al., 2020), que é comum em povoamentos cuja competição já se encontra estabelecida, em idades próximas a colheita florestal.

A modelagem hipsométrica é uma etapa fundamental para a estimativa da altura de árvores e quantificação volumétrica em inventários florestais de povoamentos equiâneos. Os resultados obtidos fornecem subsídios importantes para o desenvolvimento de futuras pesquisas sobre a hipsometria em povoamentos florestais empregando, particularmente, modelos de regressão lineares, facilmente ajustados e interpretados. A inclusão de preditores que representam aspectos relacionados as interações bióticas e abióticas na modelagem hipsométrica, como índices de competição, mostrou potencial para a melhoria preditiva sem comprometer a amostragem em campo e o realismo biológico.

5 CONCLUSÕES

A inclusão de índices de competição independentes da distância em modelos hipsométricos ampliam a capacidade de generalização de equações para talhões de eucalipto com distintas capacidades produtivas.

O índice de competição IC4, que representa a área basal de árvores vizinhas competidoras, favorece a qualidade de ajuste e desempenho preditivo da modelagem hipsométrica nos sítios estudados. Diante da ausência de informações da altura de árvores dominantes, a modelagem generalista pode ser melhor viabilizada com a inclusão desse índice como variável preditora no modelo de Stoffels e Soest (1953).

REFERÊNCIAS

- ALVAREZ, C. A.; STAPE, J. L.; SENTELHAS, P. C.; GONÇALVES, J. L. M.; SPAROVEK, G. Köppen's climate classification map for Brazil. **Meteorologische Zeitschrift**, v. 22, n. 6, p. 711–728, 2013.
- ASSMANN, E. **The principles of forest yield study**. New York: Pergamon, 1970. 506p.
- BINOTI, D. H. B.; DUARTE, P. J.; SILVA, M. L. M.; SILVA, G. F.; LEITE, H. G.; MENONÇA, 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.
- CAMPOS, J. C. C.; RIBEIRO, J. O.; PAULA NETO, F. **Inventário florestal nacional, reflorestamento**: Minas Gerais. Brasília, DF: IBDF, 1984. 126 p.
- CARRIJO, J. V. N.; FERREIRA, A. B. F.; FERREIRA, M. C.; AGUIAR, M. C.; MIGUEL, E. P.; MATRICARDI, E. A. T.; REZENDE, A. V. The growth and production modeling of individual trees of *Eucalyptus urophylla* plantations. **Journal of Forestry Research**, v. 31, n. 5, p. 1663-1672, 2020.
- COSTA, E. A.; FINGER, C. A. G.; HESS, A. F. Competition indices and their relationship with basal area increment of Araucaria. **Journal of Agricultural Science**, v. 10, n. 5, p. 198-2010, 2018.
- CURTIS, R. O. Height, diameter and height diameter age equations for second growth Douglas-fir. **Forest Science**, v. 13, n. 4, p. 365-375, 1967.
- DANTAS, D.; PINTO, L. O. R.; TERRA, M. C. N. S.; CALEGARIO, N.; OLIVEIRA, M. L. R. Reduction of sampling intensity in forest inventories to estimate the total height of eucalyptus trees. **Bosque**, v. 41, n. 3, p. 353-364, 2020.
- FERNANDES, P. R. S.; SOUSA, D. A.; COELHO, M. C. B.; SILVA, M. V. C.; LIMA, E. N. P.; ATAIDE, Y. S. B.; LIMEIRA, M. M. C. Equações hipsométricas para Pinus sp. na estação experimental de ciências florestais de Itatinga, São Paulo. **Jornal of Biotechnology and Biodiversity**, v. 9, n. 1, p. 96-106, 2021.
- 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.
- GUJARATI, D. N. **Econometria básica**. Pearson Makron Books: São Paulo, ed. 3, 2000. 846p.
- HILL, S.; LATIFI, H.; HEURICH, M.; MÜLLER, J. Individual-tree and stand-based development following natural disturbance in a heterogeneously structure forest: a LiDAR-based approach. **Ecological Informatics**, v. 38, p. 12-25, 2016.

LUSTOSA JÚNIOR, I. M.; CASTRO, R. C. O.; GASPAR, R. O.; ARAÚJO, J. B. C. N.; AQUINO, F. G. Competition indexes to evaluate tree growth in a semi-deciduous seasonal forest. **Floresta e Ambiente**, v. 26, n. 4, p. 1-12, 2019.

MINATTI, M.; SANQUETTA, C. R.; NETTO, S. P.; CORTE, A. P. D. Índices de competição dependentes da distância para *Araucaria angustifolia* em São João do Triunfo – PR. **Brazilian Journal of Biosystems Engineering**, v. 13, n. 3, p. 187-194, 2019.

QUIÑONEZ-BARRAZA, G.; ZHAO, D.; POSADAS, H. M. S.; CORRAL-RIVAS, J. J. Considering neighborhood effects improve individual dbh growth models for natural mixed-species forest in Mexico. **Annals of Forest Science**, v. 75, n. 78, p. 1-11, 2018.

R CORE TEAM. **R: A language and environment for statistical computing**. Vienna: R Foundation for Statistical Computing. 2018.

SANQUETTA, M. N. I.; SANQUETTA, C. R.; MOGNON, F.; CORTE, A. P. D.; RODRIGUES, A. L.; MAAS, G. C. B. Ajuste de equações hipsométricas para a estimação da altura total de indivíduos jovens de teca. **Científica**, v. 43, n. 4, p.400-406, 2015.

SCHMITT, T.; ANDRADE, V. C. L. Identidade de modelos hipsométricos para um plantio clonal. **Advances in Forestry Science**, v.6, n.2, p.583-587, 2019.

SCHONS, C. T.; FIGUEIREDO FILHO, A.; SANTOS, T. L. & NASCIMENTO, R. G. M. Índices de competição em nível de árvore individual para espécies da floresta ombrófila mista. **Scientia Forestalis**, v. 48, n. 128, e3275, 2020.

SHARMA, R. P.; BRUNNER, A. Modeling individual tree height growth of Norway spruce and Scots pine from national forest inventory data in Norway. **Scandinavian Journal of Forest Research**, v. 32, n. 6, p. 501-514, 2016.

SOUZA, R. R.; NOGUEIRA, G. S.; MURTA JÚNIOR, L. S.; PELLI, E.; OLIVEIRA, M. L. R.; ABRAHÃO, C. P.; LEITE, H. G. Forma de fuste de árvores de *Eucalyptus* em plantios com diferentes densidades iniciais. **Scientia Forestalis**, v. 44, n. 109, p. 33-40, 2016.

STOFFELS, A., SOEST, J. V. The main problems in sample plots. **Ned Bosbouw tijdschr**, v. 25, p. 190-199, 1953.

TENZIN, J.; TENZIN, K.; HASENAUER, H. Individual tree basal area increment models for broadleaved forests in Bhutan. **Forestry**, v. 90, p. 367-380, 2017.

TÉO, S. J.; SILVA, T. C. General height-diameter equation depending on the stand variables, for *Eucalyptus benthamii*. **Floresta e Ambiente**, v. 27, n. 4, e20180302, 2020.

TOMÉ, M.; RIBEIRO, F.; FAIAS, S. Relação hipsométrica geral para *Eucalyptus globulus* Labill. em Portugal. **Silva Lusitana**, v. 15, n. 1, p. 41-55, 2007.

VATRAZ, S.; ALDER, D.; SILVA, J. N. M. Índices de competição dependentes da distância do estrato arbóreo na Amazônia brasileira. **Espacios**, v. 37, n. 27, p. 1-11, 2016.

VERSACE, S.; GIANELLE, D.; FRIZZERA, L.; TOGNETTI, R.; GARFI, V.; DALPONTE, M. Prediction of competition indices in a Norway spruce and silver fir-dominated forest using LiDAR data. **Remote Sensing**, v. 11, p. 18, 2019.

VIEIRA, G. C.; MENDONÇA, A. R.; SILVA, G. F.; ZANETTI, S. S.; SILVA, M. M.; SANTOS, A. R. Prognoses of diameter and height of trees of eucalyptus using artificial intelligence. **Science of the Total Environment**, v. 619-620, p. 1473-1481, 2018.

YANG, Y.; HUANG, S. Effects of competition and climate variables on modelling height to live crown for tree boreal tree species in Alberta, Canada. **European Journal of Forest Research**, v. 137, p. 153-167, 2018.